

Waldemar MINKINA, Sebastian DUDZIK

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA

Termografia w podczerwieni – błędy i niepewności

Prof. dr hab. inż. Waldemar MINKINA

Ukończył w roku 1977 Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej, doktorat w 1983 r. w Instytucie Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, habilitacja w 1995 r. na Wydziale Automatyki Politechniki Lwowskiej. W roku 2006 uzyskał tytuł profesora nauk technicznych. Od 2007 profesor zwyczajny w PCz. Promotor 3 prac doktorskich. Specjalizuje się w problematyce dotyczącej szeroko rozumianej termometrii, termografii komputerowej, pomiarów ciepłych oraz nauk informatycznych.



e-mail: minkina@el.pcz.czest.pl

Dr inż. Sebastian DUDZIK

Ukończył w roku 2000 Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej. W 2007 r. obronił z wyróżnieniem pracę doktorską. Od 2008 roku jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Zakładzie Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych Politechniki Częstochowskiej. Specjalizuje się w tematyce termografii w podczerwieni ze szczególnym uwzględnieniem termografii ilościowej oraz badań nieniszczących z wykorzystaniem aktywnej termografii dynamicznej.



e-mail: sebdud@el.pcz.czest.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono zarys teorii błędów i niepewności występujących podczas bezstykowego pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Wskazano na różnicę pomiędzy pojęciami błędu i niepewności. Dodatkowo przeprowadzono dyskusję źródeł powstawania błędów i niepewności w tego typu pomiarach. Zaprezentowano wyniki analizy niepewności metodą Monte Carlo dla wybranych warunków pomiaru. Treść artykułu odnosi się do monografii autorów pod tytułem: "Infrared Thermography - errors and uncertainties" będącej aktualnie w druku w wydawnictwie John Wiley & Sons.

Słowa kluczowe: Termografia w podczerwieni, błędy, niepewności.

Infrared thermography – errors and uncertainties

Abstract

In the paper there is presented an outline of the theory of errors and uncertainties for non-contact temperature measurements with an infrared camera. The paper begins with an introduction. In this section, the model of the infrared camera measurement path is described and a difference between the error and uncertainty concept is pointed out. The next section deals with the errors of infrared thermography measurements [1, 3]. In this section an analysis of the source of errors is conducted as well [3, 4]. The exemplary results of the error analysis regarding with the emissivity errors are shown (Figs. 1-3). In Section 3 an uncertainty analysis of the infrared thermography measurements is performed [1-3, 5-12, 14]. The exemplary results of the uncertainty analysis with the Monte Carlo simulations are presented (Figs. 5, 6). These results are obtained for the commonly occurring measurement conditions. The paper ends with conclusions. In this section the quantitative conclusions from the error and uncertainty analysis are drawn. These conclusions can be very useful for thermographers taking the infrared thermography measurements in practical situations. The contents of this paper refers to the authors' monograph entitled "Infrared Thermography – errors and uncertainties", currently printed in John Wiley & Sons.

Keywords: Infrared thermography, errors, uncertainties.

1. Wstęp

W czasie kontaktów z użytkownikami systemów termowizyjnych często zadawano nam pytania: **jak oszacować dokładność pomiarów termograficznych, z jaką dokładnością przyjmować dane z pomiarów termograficznych**, stosowane następnie np. podczas analizy rozkładu pola temperatury wybranych obiektów z wykorzystaniem metod różnic skończonych (FDM – Finite Difference Method), elementów skończonych (FEM – Finite Elements Method) czy elementów brzegowych (BEM – Boundary Elements Method).

Odpowiedź na tak postawione pytania nie jest prosta, dlatego powstał niniejszy artykuł, w którym postarano się częściowo na nie odpowiedzieć. Warto podkreślić, że w literaturze problem ten nie został w pełni rozwiązany. Autorzy opisują go w bardzo różny sposób, specyficzny dla środowiska naukowego, które reprezentują:

lekarze, konserwatorzy zabytków, mechanicy, energetycy, informatycy itp. W niniejszym artykule rozwiązano go zgodnie z zaleceniami międzynarodowymi, podanymi w [1, 2]. Treść artykułu odnosi się do monografii autorów pod tytułem: "Infrared Thermography - errors and uncertainties", będącej aktualnie w druku w wydawnictwie John Wiley & Sons [3]. Celem jego powstania jest także usunięcie wielu nieporozumień dotyczących interpretacji wyniku pomiaru temperatury oraz realnej oceny metrologicznej dostępnych komercyjnie systemów termowizyjnych.

Jednym z nieporozumień jest błędna interpretacja podawanej w katalogach dokładności pomiaru termowizyjnego (ang. accuracy). Dokładność ta związana jest po pierwsze, z jakością kalibracji, zwanej też korekcją niejednorodności NUC (NonUniformity Correction) matrycy detektorów [4]. Im ta kalibracja jest lepsza, tj. dokładniejsze programowe doprowadzenie charakterystyk statycznych poszczególnych detektorów do jednej wspólnej, tym błąd pomiaru jest mniejszy. Dodatkowo na dokładność pomiaru wpływa również proces wzorcowania, przeprowadzany przez producenta kamery. Wartości wyznaczonych parametrów (R , B , F) [3, 13] charakterystyki statycznej toru przetwarzania są oczywiście również obciążone błędem. Dlatego też, jeśli w katalogu błąd ten podany jest następująco: $\pm 2^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$, to dla danego zakresu pomiarowego, należy zawsze przyjmować jego większą wartość. Dla zakresu pomiarowego $0\div 100^\circ\text{C}$ błąd wyniesie $\pm 2^\circ\text{C}$, zaś dla zakresu pomiarowego $100\div 500^\circ\text{C}$ $\pm 2\%$. Analogicznie jak poprzednio, dotyczy on wyidealizowanych warunków pomiaru, tj. spełniających zapisany w pamięci mikrokontrolera kamery model pomiarowy oraz wprowadzeniu do mikrokontrolera kamery parametrów modelu z zerowym błędem. W realnych warunkach, np. w sytuacji dużej odległości kamera – obiekt lub występowania promieniowania zakłócającego promieniowanie użyteczne obiektu, błąd ten może być oczywiście wielokrotnie większy. Wiadomo także, że w ekstremalnie trudnych warunkach atmosferycznych bezstykowy pomiar temperatury obiektu w ogóle nie jest możliwy.

Badania niepewności pomiaru termowizyjnego metodami analitycznymi są utrudnione. Wiąże się to ze skomplikowaną postacią modelu pomiaru [5-8]. Dlatego też dla celów analizy niepewności algorytmu przetwarzania, w niniejszej monografii zastosowano metodę propagacji rozkładów rekomendowaną przez Grupę Roboczą nr 1 Międzynarodowego Biura Miar [2]. Badania niepewności przeprowadzono zarówno dla skorelowanych jak i nieskorelowanych zmiennych wejściowych modelu. Pozwoliło to na wykonanie ilościowej oceny wpływu poszczególnych składowych na niepewność złożoną pomiaru temperatury kamerą termowizyjną.

2. Błędy pomiaru termograficznego

2.1. Wprowadzenie

Pomiar temperatury z zastosowaniem kamery termowizyjnej jest pomiarem pośrednim, bazującym na teorii własnego promieniowania elektromagnetycznego ciała. Z uwagi na skomplikowany

związek między promieniowaniem rejestrowanym przez detektor podczerwieni w urządzeniu pomiarowym a rzeczywistą temperaturą promieniującego ciała, wprowadzono model matematyczny pomiaru [3, 4]. W modelu tym wartość wskazywanej temperatury jest wynikiem pomiaru pośredniego, którego parametrami są: emisyjność ciała promieniującego ε_{ob} , temperatura otoczenia T_o , temperatura atmosfery T_{atm} , odległość d między kamerą i ciałem promieniującym oraz wilgotność względna atmosfery ω . Wymienione parametry, w przeciwieństwie do stałych R , B , F [3, 13] wzorcowania kamery (uwzględnianych również w ww. modelu oraz wczytanych na stałe do pamięci mikrokontrolera kamery) muszą być wprowadzone ręcznie do mikrokontrolera kamery przez użytkownika [3, 4]. Statyczny model pomiaru temperatury systemem termowizyjnym (bez uwzględnienia zmian pola temperatury, tj. taki, w którym czas integracji jest wystarczająco długi w porównaniu ze stałą czasową detektora) jest więc funkcją pięciu parametrów

$$T_{ob} = f(\varepsilon, T_o, T_{atm}, \omega, d) \quad (1)$$

Niedokładne oszacowanie wartości każdego z nich powoduje powstanie błędu wskazania temperatury. Błąd tego typu jest składową systematyczną błędów metody pomiaru temperatury z zastosowaniem kamery termowizyjnej.

Obecnie, znormalizowanym narzędziem oszacowania błędów pomiarów wydaje się być teoria niepewności pomiaru [1, 2]. W literaturze można spotkać także rozwiązania oszacowania błędu pomiaru temperatury systemem termowizyjnym bazujące na metodzie randomizacji i centryzacji błędów systematycznego [3]. Otrzymane w ten sposób oszacowanie pozwala na wyliczenie niepewności złożonej pomiaru, przy założeniu określonego rozkładu zmiennych losowych reprezentujących wyniki pomiarów wielkości wejściowych modelu pomiaru. W niniejszym paragrafie zaprezentowano odmienne podejście oszacowania błędów pomiaru temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych błędów pomiaru temperatury z wykorzystaniem modelu matematycznego pomiaru, wpisanego na stałe do pamięci mikrokontrolera kamery ThermoCAM PM 595 LW oraz w ściśle określonych warunkach (zadawane w trakcie symulacji „rzeczywiste” wartości wielkości wejściowych oraz błędów systematycznych tych wielkości) [3, 4]. Dla każdego przypadku przyjęto ustalony punkt pracy systemu pomiarowego oraz uwzględniono znaki błędów oszacowania parametrów. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach, co pozwala na ich łatwą interpretację. Wykresy te w praktyce mogą wskazać sposób minimalizowania błędów pomiaru temperatury z uwagi na możliwość oceny wpływu przeszacowania lub niedoszacowania wartości każdego z parametrów pomiaru. Stosownie do Międzynarodowej Skali Temperatury (MST-90), obliczenia przeprowadzono przyjmując wartości temperatury T w Kelwinach. Badania symulacyjne przeprowadzono przy zastosowaniu pakietu MATLAB.

Jako modele oszacowania parametrów atmosfery przyjęto bardzo złożone równania aproksymujące, dostarczone przez firmę FLIR [3, 4], które w bardzo uproszczonej postaci podaje wzór

$$P_{atm} = f(\omega, d, T_{atm}), \quad (2)$$

gdzie P_{atm} – współczynnik przepuszczania atmosfery.

Model ten jest bardzo złożony. Występuje w nim ponadto 8 współczynników dobranych metodą empiryczną. Współczynniki te są inne dla każdego zakresu pomiarowego kamery. Ze względu na umowę z firmą FLIR nie można tutaj podać pełnej wersji wzorów (1, 2), które w pełnej wersji zostały udostępnione autorom jedynie do celów badawczych.

Podana analiza metrologiczna nie dotyczy wyznaczania dokładności narzędzia pomiarowego, jakim jest kamera termowizyjna. Dokładność pomiarowa kamery termowizyjnej jest podawana przez jej producenta i wiąże się z procesem jej wzorcowania w ściśle określonych warunkach wzorcowania, określonych przez producentów kamer [3]. Przedstawiona analiza metrologiczna nie obejmuje także błędów pomiaru temperatury, kiedy ze względu na

zaistniałą sytuację pomiarową w kamerze należałoby zastosować inny model pomiarowy. Ten problem jest bardzo szeroki i wymaga napisania kilku oddzielnych prac.

W symulacjach dotyczących analizy wrażliwości modelu pomiaru kamerą termowizyjną (1), wygodnie jest przyjąć następującą definicję błędu względnego wyznaczania wielkości X :

$$\delta_{X\%} = \left(\frac{X_w - X}{X} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

gdzie: $\delta_{X\%}$ - błąd względny wyznaczania wielkości X , X_w - wartość wielkości X wskazana (obliczona) przez oprogramowanie kamery, X - wartość poprawna, założona dla celów symulacji.

Wielkość X oznacza tutaj: T_{ob} , ε_{ob} , T_o , T_{atm} , d oraz ω . Przykładowo, w symulacjach dotyczących błędów wyznaczenia temperatury obiektu $\delta_{T_{ob}}$ wzór (3) przyjmie postać:

$$\delta_{T_{ob}} = \frac{T_{obw} - T_{ob}}{T_{ob}} \cdot 100\% = \frac{\Delta T_{ob}}{T_{ob}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

gdzie: T_{obw} - temperatura obiektu wskazana (obliczona) przez oprogramowanie kamery, T_{ob} - temperatura obiektu rzeczywista, założona dla celów symulacji.

Wzór (4) jest w pełni uzasadniony, gdyż wartość T_{ob} jest w trakcie symulacji zadawana bezpośrednio. W przypadku, gdy poszukuje się błędów bezwzględnego ΔT_{ob} , wtedy można go obliczyć z przekształconego wzoru (4):

$$\Delta T_{ob} = \frac{\delta_{T_{ob}} \cdot T_{ob}}{100}. \quad (4')$$

W powyższych wzorach błąd bezwzględny odniesiono do temperatury bieżącej T_{ob} . Odnosząc go do zakresu pomiarowego kamery, który wynosił: $-40 \div 120^\circ\text{C}$, uzyskuje się następującą definicję błędu względnego $\delta_{T_{obz}}$ wyznaczania temperatury obiektu:

$$\delta_{T_{obz}} = \frac{T_{obw} - T_{ob}}{160} \cdot 100\% = \frac{\Delta T_{ob}}{160} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Znając odczytane z wykresu wartości błędów $\delta_{T_{ob}}$, po przekształceniach, $\delta_{T_{obz}}$ można obliczyć ze wzoru:

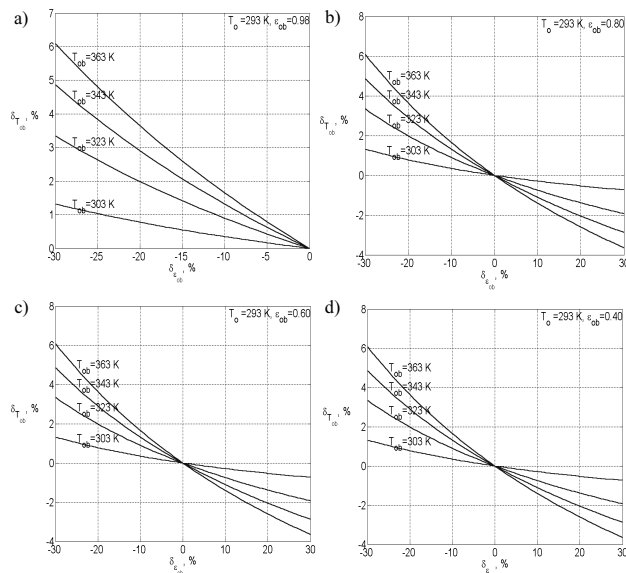
$$\delta_{T_{obz}} = \frac{\delta_{T_{ob}} \cdot T_{ob}}{160}. \quad (5')$$

W pomiarach rzeczywistych wartość T_{ob} może być np. temperaturą wzorca zastosowanego do wzorcowania kamery w zakresie pomiarowym, do którego odniesiono $\delta_{T_{obz}}$. Można zauważyć, że odniesienie błędu bezwzględnego ΔT_{ob} do temperatury bieżącej T_{ob} – wzór (4), czy do zakresu kamery – wzory (5), nie wpływa na jego znak. Podane w dalszej części wyniki dotyczą badań symulacyjnych wrażliwości modelu na błędy wielkości wpływowych, dlatego wygodniej było odnieść się tutaj do temperatury bieżącej T_{ob} . Analogiczne przekształcenia możliwe są do przeprowadzenia dla pozostałych wielkości oznaczonych symbolem X . Ze względu na ograniczenia objętościowe w niniejszym artykule ograniczono się jedynie do analizy wpływu błędnego oszacowania emisyjności ε_{ob} na błąd pomiaru temperatury systemem termowizyjnym. Wpływ tego błędu jest największy. Wyniki wpływu pozostałych składników: T_{atm} , T_o , ω , d przedstawiono w monografiach [3, 4]. Wyniki obliczeń odniesiono do błędów względnych. Operowanie na wielkościach bezwzględnych wydaje się być mniej czytelne. Co znaczy np. błąd bezwzględny $\Delta T_{ob} = 50 \text{ K}$? Czy to dużo, czy mało? Jeżeli np.: $T_{ob} = 2000 \text{ K}$, wydaje się to być mało ($\delta_{T_{ob}} = 2,5\%$) dla typowego bezstykowego pomiaru temperatury. Z przedstawionych niżej rezultatów symulacji, w sposób bardzo czytelny, można wyciągnąć wiele ciekawych wniosków ważnych dla praktyki pomiarowej.

2.2. Wpływ błędnego oszacowania ε_{ob}

Wyniki symulacji dotyczących wpływu błędu określenia wartości emisyjności obiektu ε_{ob} na błąd określenia jego temperatury przedstawiono na rys. 1 oraz rys. 2. Symulacje z rys. 1 dotyczą przypadku, gdy $T_{ob} > T_o$ oraz $T_{ob} > T_{atm}$ zaś z rys. 2 – gdy $T_{ob} \leq T_o$ oraz $T_{ob} \leq T_{atm}$.

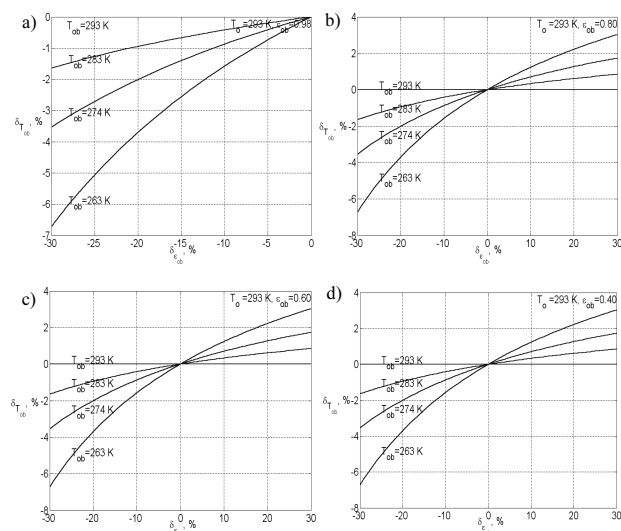
Błąd określenia wartości emisyjności obiektu ε_{ob} ma największy wpływ na błąd określenia temperatury obiektu. Przyjęcie zawyżonej wartości ε_{ob} powoduje mniejszy błąd niż zaniżonej – rys. 1. Przykładowo, dla $\delta_{\varepsilon} = +30\%$ błąd $\delta_{T_{ob}} \approx -(1 \div 4)\%$, zaś dla $\delta_{\varepsilon} = -30\%$ błąd $\delta_{T_{ob}} \approx +(2 \div 7)\%$ jeśli: $T_{atm} = T_o = 293\text{K}$, $T_{ob} = (300 \div 400)\text{K}$ oraz $\varepsilon_{ob} = 0.4 \div 0.98$. Błąd ten rośnie ze wzrostem T_{ob} i jest niezależny od wartości ε_{ob} .



Rys. 1. Wpływ błędu określenia wartości emisyjności obiektu ε_{ob} na błąd określenia jego temperatury ($T_{ob} > T_o$ oraz $T_{ob} > T_{atm}$) [3, 4]

Fig. 1. Influence of the object emissivity setting error ε_{ob} on the temperature measurement error T_{ob} ($T_{ob} > T_o$ and $T_{ob} > T_{atm}$) [3, 4]

Jeśli $T_{ob} \leq T_o$ oraz $T_{ob} \leq T_{atm}$ to z rys. 2 można zauważyć, że błąd $\delta_{T_{ob}} = f(\delta_{\varepsilon_{ob}})$ także jest niezależny od wartości ε_{ob} i silnie rośnie wraz z obniżaniem się wartości T_{ob} . Pomiarów w takich warunkach nie należy prowadzić.



Rys. 2. Wpływ błędu określenia wartości emisyjności obiektu ε_{ob} na błąd określenia jego temperatury ($T_{ob} \leq T_o$ oraz $T_{ob} \leq T_{atm}$) [3, 4]

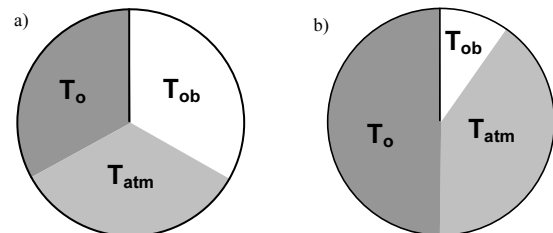
Fig. 2. Influence of the object emissivity setting error ε_{ob} on the temperature measurement error T_{ob} ($T_{ob} \leq T_o$ and $T_{ob} \leq T_{atm}$) [3, 4]

Z podanych wyżej rysunków 1, 2 oraz tych, których ze względów na ograniczenia objętościowe nie zamieszczono, dotyczących symulacji komputerowych modelu pomiarowego kamery termowizyjnej, można zauważyć zmianę znaku błędu $\delta_{T_{ob}}$ dla $T_{ob} > T_o$, $T_{ob} > T_{atm}$ oraz dla $T_{ob} \leq T_o$, $T_{ob} \leq T_{atm}$.

W przypadku, gdy $T_{ob} \approx T_o$, $T_{ob} \approx T_{atm}$ wartość błędu $\delta_{T_{ob}}$ zbliża się do zera, co jest spowodowane zmniejszaniem się wrażliwości modelu na zmiany danej wielkości. W przypadku, gdy $T_{ob} = T_o = T_{atm}$ występuje przypadek krytyczny związany z brakiem wrażliwości modelu na zmiany danej wielkości wejściowej X , gdzie X oznacza: ε_{ob} , T_o , T_{atm} , d , ω . Można to także określić, jako punkt osobliwy modelu. Opisane wyżej cechy wynikają z właściwości modelu obliczeniowego kamery.

Należy podkreślić, że w warunkach pomiaru praktycznego, gdy $T_{ob} = T_o = T_{atm}$, zgodnie z teorią pomiaru, błąd będzie z kolei rósł do nieskończoności. Potwierdza to dodatkowo podane uprzednio stwierdzenie mówiące o tym, że gdy $T_{ob} = T_o = T_{atm}$ wyniki pomiaru termowizyjnego nie są miarodajne.

Zaistniała sytuacja braku wrażliwości modelu na zmiany ε_{ob} w przypadku, gdy $T_{ob} = T_o = T_{atm}$ można wyjaśnić bardziej pogłębionym – rys. 3. Kamera mierzy sumę promieniowania obiektu, atmosfery i otoczenia. Każda z tych składowych jest proporcjonalna do natężenia promieniowania (które rośnie wraz z temperaturą) oraz emisyjności obiektu ε_{ob} , atmosfery ε_{atm} i otoczenia ε_o . Jeśli dodatkowo emisyjność obiektu będzie mała, wtedy mierzone natężenie promieniowania obiektu może przykładowo stanowić 30% użytecznego promieniowania dochodzącego do detektora kamery, zaś 70% to zakłócające promieniowanie atmosfery i otoczenia. Jeszcze gorszy przypadek wystąpi, gdy $\varepsilon_{ob} \ll \varepsilon_{atm}$, $\varepsilon_{ob} \ll \varepsilon_o$ oraz gdy $T_{ob} \ll T_o$, $T_{ob} \ll T_{atm}$ – rys. 3b. Wtedy udział użytecznego promieniowania obiektu w ogólnym bilansie strumieni docierających do detektora kamery może być jeszcze mniejszy.



Rys. 3. Objasnienie graficzne udziału poszczególnych składowych promieniowania docierającego do detektora w przypadkach krytycznych [3, 4]

Fig. 3. Graphical illustration of contributions from particular components of radiation arriving at the camera detector [3, 4]

3. Niepewności pomiaru termograficznego

3.1. Uwagi wstępne

W nowoczesnych systemach pomiarowych, wraz ze wzrostem stopnia ich złożoności, następuje ewolucja metod oceny dokładności pomiarów. Z jednej strony jest ona spowodowana coraz to większą komplikacją modeli pomiarowych. Rośnie liczba wielkości wejściowych a zależności pomiędzy wejściem i wyjściem modeli – są coraz bardziej skomplikowane. Utrudnia to szacowanie dokładności metodami klasycznymi, wykorzystującymi opis analityczny.

W dokładnych pomiarach porównawczych (takich jak np. pomiary wzorcowe) niezbędny jest opis warunków odniesienia w postaci zmiennych losowych o założonych rozkładach prawdopodobieństwa. W takiej sytuacji wygodniej jest posługiwać się pojęciem niepewności pomiaru. W znaczeniu ogólnym termin niepewność pomiaru oznacza wątpliwość co do jego wyniku. Tak pojęta niepewność nie definiuje żadnej konkretnej miary ilościowej. Wyraża jedynie brak dokładnej znajomości wartości wielkości mierzonej. Dlatego też, wynik pomiaru zawsze pozostaje estymatą wartości mierzonej. W znaczeniu szczegółowym nie-

pewność standardową pomiaru wyraża się najczęściej w postaci odchylenia standardowego, eksperymentalnego [9]:

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (q_k - \bar{q})^2}, \quad (6)$$

gdzie: N – liczba wyników pomiarów wielkości X , wykonanych w warunkach powtarzalności, q_k – wynik k -tego pomiaru, \bar{q} – średnia arytmetyczna N pomiarów – estymator wielkości oczekiwanej. Zgodnie z Zaleceniem INC-1 (1980), składniki niepewności pomiaru można zgrupować w dwóch następujących kategoriach [10, 11]: niepewność typu A – obliczana na podstawie zaobserwowanego rozkładu częstości wyników pomiarów oraz niepewność typu B obliczana na podstawie rozkładu częstości założonego *a priori*.

Podobnie jak w przypadku błędów, również w trakcie szacowania niepewności, często występuje problem oceny wpływu poszczególnych niepewności standardowych wielkości wejściowych złożonego modelu obliczeniowego na dokładność wyniku pomiaru. W takiej sytuacji niezbędne staje się wyznaczenie złożonej niepewności standardowej. Niepewność ta obliczana jest jako dodatni pierwiastek kwadratowy ze złożonej wariancji, opisanej zależnością [9]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (7)$$

gdzie $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ jest modelem pomiarowym, $u^2(x_i)$ jest wariancją i -tej zmiennej wejściowej tego modelu a y oznacza zmienną wyjściową.

Należy zaznaczyć, że taki zapis złożonej wariancji wyniku pomiaru obowiązuje przy założeniu braku korelacji pomiędzy zmiennymi losowymi wejściowymi, reprezentującymi rozkłady wyników pomiarów. Jeżeli występuje uzasadnione podejrzenie współzależności pomiędzy zmiennymi wejściowymi, przy wyznaczaniu złożonej wariancji (7), należy uwzględnić czynnik kowariancyjny [12]. Z uwagi na to, że w trakcie wyznaczania niepewności pomiaru pośredniego, wielkości wejściowe modelu traktuje się jak zmienne losowe, wyznaczone estymatory (odchylenia standardowe, wartości oczekiwane) pozostają również zmiennymi losowymi. Dlatego też niezbędne jest zdefiniowanie pojęć opisujących obliczone parametry w sposób probabilistyczny. Szacowanie złożonej niepewności standardowej zazwyczaj wiąże się z jednoczesną oceną prawdopodobieństwa, z jakim wynik pomiaru mieści się wewnątrz przedziału określonego przez tę niepewność. Do ścisłego określania tego prawdopodobieństwa wprowadza się pojęcie niepewności rozszerzonej:

$$U = k u_c(y), \quad (8)$$

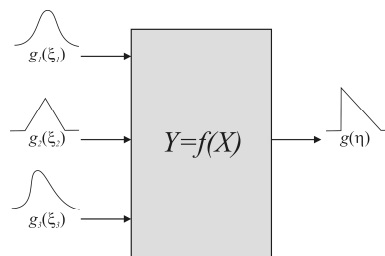
gdzie: k – współczynnik rozszerzenia.

Niepewność rozszerzona precyzuje granice przedziału niepewności na zadanym poziomie ufności. Wartość współczynnika rozszerzenia zależy od typu rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej wyjściowej modelu pomiaru. Dla przykładu, jeżeli na wyjściu modelu uzyskuje się zmienną losową y o rozkładzie normalnym, prawdopodobieństwo znalezienia wyniku pomiaru w przedziale od $y - u_c(y)$ do $y + u_c(y)$, czyli dla $k = 1$, jest równe około 68%. W przedziale od $y - 2u_c(y)$ do $y + 2u_c(y)$, czyli dla $k = 2$, ok. 95%. W przedziale od $y - 3u_c(y)$ do $y + 3u_c(y)$, czyli dla $k = 3$, około 99%. Pewną niedogodnością przy ustalaniu wartości współczynnika rozszerzenia jest wymóg dokładnego określenia typu rozkładu zmiennej wyjściowej modelu pomiaru. Dla modeli o wielu wejściach (duża liczba zmiennych wejściowych) można uznać, że obowiązującym jest centralne twierdzenie graniczne. W takim przypadku, typ rozkładu zmiennej wyjściowej przyjmuje się jako normalny. W praktyce może okazać się jednak, że występują różnice pomiędzy wynikami obliczeń niepewności rozszerzonej uzyskiwanymi przy założeniu rozkładu normalnego, szcze-

gólnie, gdy model pomiaru wykazuje silne nieliniowości a rzeczywisty rozkład zmiennej wyjściowej – asymetrię.

3.2. Metoda propagacji rozkładów

W sytuacji, gdy nie jest znany rozkład prawdopodobieństwa zmiennej wyjściowej modelu pomiaru, zachodzi problem określenia związku pomiędzy współczynnikiem rozszerzenia a przedziałem objęcia (poziomym ufności). Niestety, w praktyce najczęściej nieznany jest typ rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej wyjściowej (wyniku pomiaru). Biorąc pod uwagę powyższe utrudnienie, Wspólny Komitet ds. Podstawowych Problemów Metrologii opracował „Uzupełnienie nr 1” pt.: „Metody numeryczne propagacji rozkładów” [2]. W „Uzupełnieniu...” zawarł ideę określania dokładności w pomiarach pośrednich, ze szczególnym uwzględnieniem silnie nieliniowych i skomplikowanych modeli pomiaru (takich jak np. algorytm przetwarzania toru pomiarowego kamery termowizyjnej). Ilustrację metody propagacji rozkładów przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Ilustracja idei propagacji rozkładów

Fig. 4. Illustration of the idea of distribution propagation

Na rys. 4 przyjęto następujące oznaczenia: $g_i(\xi_i)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla możliwych wartości ξ_i , i -tej wielkości wejściowej X_i ; $g(\eta)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa dla możliwych wartości η , wielkości wyjściowej Y modelu pomiaru.

Propagacja rozkładów ma na celu obliczenie niepewności z wykorzystaniem metody Monte Carlo. Zasadniczym celem procedury obliczeniowej jest wyznaczenie statystycznego przedziału objęcia zmiennej wyjściowej na założonym poziomie ufności. Należy przy tym zauważyć, że procedura obliczeniowa daje poprawne wyniki nawet w przypadku silnie nieliniowych zależności funkcyjnych modelujących pomiar i asymetrycznych funkcji gęstości prawdopodobieństwa wejściowych zmiennych losowych.

3.3. Przedział ufności oraz złożona niepewność standardowa modelu pomiaru termograficznego

W trakcie badań niepewności algorytmu przetwarzania opartym na modelu (1) przeprowadzono symulacje, mające na celu oszacowanie złożonej niepewności standardowej oraz 95-cio procentowego przedziału ufności.

Procedura badawcza została wyczerpująco opisana w pracy [3]. Badania symulacyjne złożonej niepewności standardowej pomiaru temperatury z wykorzystaniem modelu (1) przeprowadzono dla 9 przypadków, w zależności od wartości estymat emisyjności obiektu ε_{ob} oraz jego temperatury T_{ob} (3 wartości estymaty emisyjności i 3 wartości estymaty temperatury obiektu). Symulacje przeprowadzono dla następujących wartości temperatur obiektu T_{ob} : 323 K (50°C), 343 K (70°C) oraz 363 K (90°C), co oznacza, że wyniki symulacji obowiązują dla temperatur obiektu mieszczących się w I zakresie pomiarowym typowej kamery (dla innego zakresu, obowiązują inne wartości odpowiednich stałych wzorcowania i współczynników kalibracji). W każdym przypadku wyznaczono 95-cio procentowy przedział ufności $I_{95\%}$. Wyznaczone przedziały porównano z przedziałami ufności obliczonymi dla rozkładu normalnego, który przyjmowany jest jako obowiązujący dla

zmiennej wyjściowej w zdecydowanej większości sytuacji pomiarowych. Założenie normalnego rozkładu zmiennej wyjściowej, wiąże się z przyjęciem wartości współczynnika rozszerzenia – dla 95-cio procentowego poziomu ufności – równej $k = 2$. Szerokość 95-cio procentowego przedziału ufności zależy od symetrii rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej wyjściowej modelu pomiaru, względem wartości oczekiwanej. W pracy [2] wprowadzono współczynnik α określający rząd kwantyla dla 95-cio procentowego prawdopodobieństwa objęcia p . Dla rozkładu symetrycznego, $\alpha = 0,025$. Aby określić wpływ asymetrii rozkładu na szerokość 95-cio procentowego przedziału ufności, dla każdego rozpatrywanego przypadku, przedstawiono zależność pomiędzy szerokością tego przedziału a rzędem kwantyla α [14]. Umożliwiło to porównanie minimalnej szerokości $I_{95\%}$ z szerokością przy założeniu normalnym symetrycznym rozkładzie zmiennej wyjściowej ($\alpha = 0,025$).

W symulacjach rozkładu zmiennej wyjściowej założono rozkłady jednostajne zmiennych wejściowych. Takie założenie wynikało z tego, że rozkład jednostajny jest skrajnie niekorzystny (najgorszy przypadek) z punktu widzenia obliczania złożonej niepewności standardowej. Dane wejściowe dla symulacji, tj. wartości estymat wielkości wejściowych oraz ich niepewności zestawiono w tab. 3 oraz 4.

Tab. 3. Wartości estymat wielkości wejściowych, przyjęte w badaniach złożonej niepewności standardowej modelu (1)

Tab. 3. Estimates of the inputs of model (1) assumed for simulations of components of the combined standard uncertainty

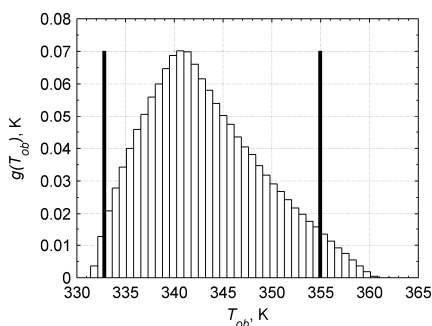
ε_{ob}	T_o (K)	T_{atm} (K)	ω	d (m)
0,9, 0,6, 0,4	293	293	0,5	10

Tab. 4. Wartości niepewności standardowych przyjęte w badaniach złożonej niepewności standardowej modelu (1)

Tab. 4. Standard uncertainties of the input quantities assumed for analysis of the combined standard uncertainty of model (1)

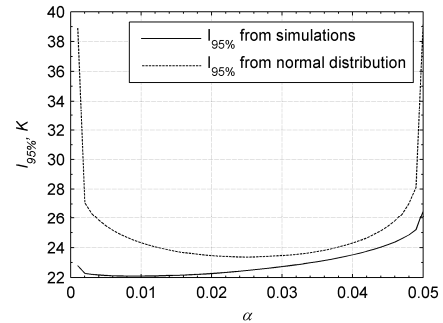
ε_{ob}	T_o (K)	T_{atm} (K)	ω	d (m)
0,09, 0,06, 0,04 (10 %)	9 (3%)	9 (3%)	0,05 (10%)	1 (10%)

Na rys. 6 przedstawiono funkcję gęstości prawdopodobieństwa zmiennej wyjściowej modelu (1) z zaznaczonymi granicami 95-cio procentowych przedziałów ufności. Granice te wyznaczono na podstawie dystrybuanty oraz przy założeniu rozkładu normalnego dla wybranej wartości emisyjności obiektu ($\varepsilon_{ob} = 0,6$) z tab. 3 oraz przykładowej temperatury $T_{ob} = 343$ K. Zależność szerokości 95-cio procentowego przedziału ufności od rzędu kwantyla α , przedstawiono na rys. 7. Przedział ten wyznaczono na podstawie dystrybuanty zmiennej wyjściowej oraz przy założeniu rozkładu normalnego dla wyżej wymienionej wartości emisyjności i temperatury obiektu.



Rys. 5. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej wyjściowej modelu (1) dla $T_{ob} = 343$ K i $\varepsilon_{ob} = 0,6$ – opracowanie własne

Fig. 5. Probability density function of model (1) output variable T_{ob} for $T_{ob} = 343$ K and $\varepsilon_{ob} = 0,6$ – the authors' study



Rys. 6. Zależność 95-cio procentowych przedziałów ufności od rzędu α dla $T_{ob} = 343$ K i $\varepsilon_{ob} = 0,6$ – opracowanie własne

Fig. 6. 95-percent coverage intervals vs. quantile of order α for $T_{ob} = 343$ K and $\varepsilon_{ob} = 0,6$ – the authors' study

4. Przykłady obliczeniowe

4.1. Obliczenie całkowitego błędu metody w pomiarze termograficznym

W niniejszym przykładzie przedstawiono sposób obliczenia całkowitego błędu metody w pomiarze temperatury kamerą termowizyjną ThermoCAM PM595. Temperatura wskazywana przez kamerę w wybranym punkcie termogramu wyniosła 363 K (90 °C). Do mikrokontrolera kamery wprowadzono następujące parametry pomiaru (wielkości wejściowe modelu (1)): $\varepsilon_{ob} = 0,6$, $T_{atm} = T_o = 293$ K, $\omega = 0,5$, $d = 100$ m. W celu oszacowania błędu pomiaru temperatury przyjęto następujące wartości błędów względnych wielkości wejściowych: $\delta_{\varepsilon_{ob}} = -10\%$, $\delta_{T_{atm}} = -3\%$, $\delta_{T_o} = -3\%$, $\delta_{\omega} = -10\%$, $\delta_d = -10\%$. W takim przypadku wartość składowej błędów związanej z emisyjnością $\delta_{T_{ob}}(\varepsilon_{ob}) \approx 1,8\%$ wyznaczono z rys. 1c. Wartości pozostałych składowych wyznaczono korzystając z wyników symulacji zaprezentowanych w pracach [3, 4]. Wartości te wyniosły odpowiednio: $\delta_{T_{ob}}(T_{atm}) \approx -0,2\%$; $\delta_{T_{ob}}(T_o) \approx 1,0\%$; $\delta_{T_{ob}}(\omega) \approx -0,05\%$; $\delta_{T_{ob}}(d) \approx -0,05\%$. Całkowity błąd względny modelu obliczono na podstawie zależności:

$$\delta_{T_{ob_{\%}}} = \sqrt{\delta_{T_{ob}}(\varepsilon_{ob})^2 + \delta_{T_{ob}}(T_{atm})^2 + \delta_{T_{ob}}(T_o)^2 + \dots + \delta_{T_{ob}}(\omega)^2 + \delta_{T_{ob}}(d)^2} \quad (9)$$

Błąd ten wynosi:

$$\sqrt{(1,8)^2 + (-0,2)^2 + (1,0)^2 + (-0,05)^2 + (-0,05)^2} \approx 2\%$$

4.2. Obliczenie 95-cio procentowego przedziału ufności metody w pomiarze termograficznym

W niniejszym przykładzie przedstawiono sposób obliczenia 95-cio procentowego przedziału ufności w pomiarze temperatury kamerą termowizyjną ThermoCAM PM595. Temperatura wskazywana przez kamerę w wybranym punkcie termogramu wyniosła 343 K (70 °C). Do mikrokontrolera kamery wprowadzono następujące parametry pomiaru (wielkości wejściowe modelu (1)): $\varepsilon_{ob} = 0,6$; $T_{atm} = T_o = 293$ K; $\omega = 0,5$; $d = 10$ m. Niepewności standardowe względne poszczególnych wielkości wejściowych, przyjęto jak w tab. 4. Zakładając rozkład normalny wyjściowej zmiennej losowej modelu pomiaru oraz symetryczne rozkłady prawdopodobieństwa zmiennych losowych wejściowych ($\alpha = 0,025$) szerokość 95-cio procentowego przedziału ufności odczytano z rys. 6, jako równą około 23,5 K.

Wynik pomiaru temperatury można więc przedstawić jako: $I_{95\%} = [343-23.5/2; 343+23.5/2]$ K, czyli $I_{95\%} = [331,25; 354,75]$ K. Oznacza to, że temperatura zmierzona T_{ob} mieści się w przedziale od 331,25 do 354,75 z prawdopodobieństwem 95%. Wynik powyżej przedstawionego pomiaru może też być wyrażony jako: $T_{ob} = (343 \pm 11,75)$ K, przy czym wartość 11,75 K (połowa szerokości 95-cio procentowego przedziału ufności) odpowiada rozszerzonej niepewności standardowej ($k=2$) przy założeniu normalnego rozkładu prawdopodobieństwa wyjściowej zmiennej losowej modelu (1). Dla innych wartości estymat lub niepewności wielkości wejściowych, niezbędnym będzie zastosowanie oprogramowania do wyznaczania niepewności opisanego w pracy [3]. Oprogramowanie to będzie dostępne na stronach internetowych wydawnictwa John Wiley & Sons.

5. Wnioski

Podsumowując wyniki symulacyjnej analizy błędów metody pomiaru termowizyjnego pod kątem oddziaływań systematycznych, należy stwierdzić, że największy wpływ na błąd pomiaru temperatury ma błąd określenia wartości emisyjności obiektu. Dlatego też, w przypadku pomiarów obiektów o niskiej emisyjności, dokładny pomiar termowizyjny w zasadzie nie jest możliwy. Innym krytycznym przypadkiem pomiaru jest sytuacja, w której pomiar dotyczy obiektu o temperaturze zbliżonej do temperatury otoczenia i atmosfery. W takim przypadku, promieniowanie tła (szumy) jest dużo większe niż promieniowanie od obiektu mierzonego (sygnał użyteczny). Z doświadczeń praktycznych autorów niniejszej monografii wynika, że zdecydowanie najczęściej, ma się do czynienia z sytuacjami, gdy obiekt mierzony ma temperaturę dużo większą niż temperatura atmosfery, czy otoczenia. Zupełnie innym zagadnieniem jest określenie, nieznannej temperatury otoczenia. W praktyce, z powodu braku jej dokładnej wartości, najczęściej przyjmuje się: $T_o = T_{atm}$.

Wszystkie powyższe spostrzeżenia, składają do wniosku, że do określenia błędu systemem termowizyjnym, należy zawsze podchodzić indywidualnie, oraz że sama analiza błędu pozostaje wciąż zagadnieniem otwartym.

Analizując wyniki symulacji złożonej niepewności standardowej temperatury obiektu $u_c(T_{ob})$ można sformułować następujące wnioski:

- Wartość złożonej niepewności standardowej silnie rośnie wraz ze zmniejszaniem się emisyjności obiektu. Dodatkowo, można zauważyć, że wzrost wartości niepewności jest tym szybszy im niższa jest temperatura obiektu.
- Porównując przedziały ufności wyznaczone na podstawie aproksymacji dystrybuanty zmiennej wyjściowej z przedziałami wyznaczonymi przy założeniu rozkładu normalnego, można zaobserwować, że występujące różnice są nieznaczne. Ogólnie, przyjęcie normalnego rozkładu zmiennej wyjściowej – uzasadnione centralnym twierdzeniem granicznym – jest bezpieczne z punktu widzenia niedoszacowania szerokości 95-cio procentowego przedziału ufności. Istotnie, jak można zauważyć z rys. 7, linia przerywana wyznaczająca szerokości przedziału dla rozkładu normalnego leży powyżej linii ciągłej wyznaczającej szerokości przedziału uzyskane z symulacji.
- Uwzględniając powyższy wniosek, można stwierdzić, że w przypadku wyznaczania niepewności rozszerzonej pomiaru temperatury na 95-cio procentowym poziomie ufności z wykorzystaniem modelu (1), bezpiecznym jest przyjęcie współczynnika rozszerzenia $k = 2$, tak jak dla rozkładu normalnego. Jak widać z przedstawionych wyżej wyników symulacji, przyjęcie $k = 2$, w każdym przypadku prowadzi do niewielkiego rozszerzenia 95-cio procentowego przedziału ufności, uzyskanego w wyniku symulacji. Innymi słowy, poziom ufności przedziału

wyznaczonego przy założeniu rozkładu normalnego wielkości wyjściowej rozpatrywanego modelu (wyników pomiaru temperatury) nieznacznie przekracza 95%, co potwierdza tezę o „bezpiecznym” oszacowaniu przedziału ufności.

Podsumowując analizę niepewności pomiarów termowizyjnych, należy stwierdzić, że pojęcie niepewności pozwala na znaczące uzupełnienie wiedzy o opisywanym modelu pomiaru. Z kolei, dzięki metodzie propagacji rozkładów, możliwe jest oszacowanie tak złożonej niepewności standardowej, jak i przedziałów ufności w pomiarach termowizyjnych. Dodatkowo można stwierdzić, że analiza niepewności stanowi doskonałe narzędzie badania dokładności pomiaru temperatury systemem termowizyjnym w przypadku występowania oddziaływań przypadkowych.

6. Literatura

- [1] Guide: “Guide to the Expression of uncertainty in Measurement”, ISO/TAG, 1995, wydanie polskie 1999 r. opracowane przez J. Jaworskiego.
- [2] Guide: „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Supplement 1. Numerical Methods for the Propagation of Distributions”, Dokument Międzynarodowego Biura Miar, 2004.
- [3] Minkina W., Dudzik S.: „Infrared thermography – errors and uncertainties” John Wiley & Sons, New York, Chichester 2009, ISBN-10: 0470747188; ISBN-13: 978-0470747186 (w druku).
- [4] Minkina W.: „Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody” Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004, ISBN 83-7193-237-5.
- [5] Minkina W., Dudzik S.: „Symulacyjna analiza niepewności algorytmu przetwarzania toru pomiarowego kamery termowizyjnej ThermoCAM PM 595” Materiały III Sympozjum „Metrologiczne Właściwości Programowanych Przetworników Pomiarowych” (MWPPP’2004), Gliwice, 22-23.XI.2004, Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 1670, seria „Elektryka” Z. 195, 2005 r., str.: 173-185.
- [6] Minkina W., Dudzik S.: „Simulation analysis of uncertainty of infrared camera measurement and processing path” Measurement, 39 (2006) Nr 8, pp. 758-763.
- [7] Minkina W., Dudzik S.: „Symulacyjna analiza wrażliwości modelu pomiaru temperatury systemem termowizyjnym” Pomiary Automatyka Kontrola 52 (2006) Nr 9, str. 56-59.
- [8] Dudzik S., Minkina W.: „Ocena wpływu korelacji zmiennych wejściowych modelu pomiaru kamery termowizyjnej na dokładność wyznaczania temperatury obiektów o niskiej emisyjności” Pomiary Automatyka Kontrola 53 (2007) Nr 2, str. 48-51.
- [9] „International vocabulary of basic and general terms in metrology”, 2nd edition, International Organization for Standardization (ISO), 1993.
- [10] “BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures 49”, 1981 (w jęz. francuskim).
- [11] “BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures 54”, 1986 (w jęz. francuskim).
- [12] Taylor J. R.: “An Introduction to Error Analysis. The Study of Uncertainties in Physical Measurements”, 2nd edition, University Science Books, Sausalito California, 1997.
- [13] TOOLKIT IC2 Dig 16 „Developers Guide” 1.00 AGEMA 550/570. Materiały zastrzeżone firmy FLIR, udostępnione autorom.
- [14] Dudzik S., Minkina W., “Application of the numerical method for the propagation of distributions to the calculation of coverage intervals in the thermovision measurements”, 9th International Conference on Quantitative Infrared Thermography QIRT, July 2-5, Kraków, str. 179-184, 2008.