

# METROLOGIA

## POMIARY TERMOWIZYJNE

**Waldemar Andrzej MINKINA**

POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, INSTYTUT ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA

### PODSTAWY POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH

#### Część III – Problemy metrologiczne, interpretacja wyników

Dr hab. inż. Waldemar Andrzej MINKINA



Profesor nadzwyczajny Politechniki Częstochowskiej; kieruje Zakładem Techniki Mikroprocesorowych, Automatyki i Pomiarów Ciepłych; obecnie także dyrektor Instytutu Elektroniki i Systemów Sterowania na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej, Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1983r., a doktora habilitowanego – w 1995r. Jest autorem i współautorem około 70 publikacji oraz 6 patentów. Specjalizuje się w problematyce dotyczącej szeroko rozumianej termometrii, termografii komputerowej oraz pomiarów ciepłych. Odbił wielokrotnie staże zagraniczne w Instytutach Miernictwa Uniwersytetów: Karlsruhe, Berlina Zachodniego, Drezna, Federalnym Urzędzie Miar (PTB w Berlinie), Sankt Petersburga i Lwowa. W zakresie termografii komputerowej ściśle współpracuje z Instytutem Miernictwa Uniwersytetu Rostockiego. Jest członkiem Sekcji Kształcenia Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, Polskiego Towarzystwa Techniki Sensorowej oraz Stowarzyszenia Elektryków Polskich, gdzie jest rzeczowniczą w trzech grupach.

#### Streszczenie

W artykule opisano przydatne w praktyce, podstawowe zagadnienia problematyki pomiarów termowizyjnych. Wskazano na problemy związane z metrologiczną interpretacją uzyskanych wyników. Przeanalizowano właściwości kamer krótkofalowych (*SWB* – Short Wave Band) i długofalowych (*LWB* – Long Wave Band). Opisano także budowę najczęściej obecnie stosowanego do celów badawczych studniowego, fotonowego detektora kwantowego *QWIP* (Quantum Well Infrared Photon detector) o najwyższej temperaturowej zdolności rozdzielczej. Artykuł stanowi kontynuację prac opublikowanych w numerze 1/2000 PAK.

**Słowa kluczowe:** pomiary w podczerwieni, termografia, pomiary temperatury, błędy pomiarów.

#### Abstract

In the paper there are described practically useful, basic problems of thermovision measurements. Issues connected with metrological interpretation of obtained results are pointed out. Features of both types of cameras: short (*SWB* – Short Wave Band) and long (*LWB* – Long Wave Band) are analysed. The structure of the *QWIP* (Quantum Well Infrared Photon) detector, of the highest temperature resolution, which is now most commonly used for research purposes, is also described. The paper is continuation of works published in the 1/2000 issue of *Pomiary Automatyka Kontrola*.

**Keywords:** infrared measurements, thermography, temperature measurements, uncertainties.

#### Uwagi wstępne

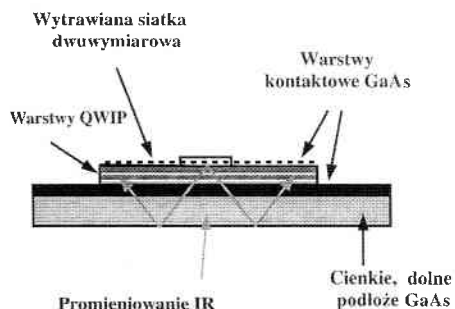
Niniejszy artykuł jest kontynuacją tematyki podjętej w pracach [1, 2], w których opisano podstawy teoretyczne pomiarów termowizyjnych, rys historyczny rozwoju, standardowe detektory promieniowania podczerwonego, błędy pomiarów termowizyjnych.

W niniejszej publikacji opisano problemy metrologiczne związane z interpretacją wyników pomiarów termowizyjnych. Zagadnienia te są mało znane w polskiej metrologicznej literaturze fachowej, zaś na świecie opisywane w sposób marginalny, najczęściej nie przez metrologów. Dlatego celem niniejszej publikacji jest przybliżenie tego zagadnienia.

W związku z faktem, że techniki termowizyjne obecnie na świecie są bardzo dynamicznie rozwijającą się dziedziną wiedzy, a istniejące, polskie i zagraniczne podręczniki nie opisują najnowszych rozwiązań w tej dziedzinie [3, 4], na początku zostanie skrótowo omówiony najnowszy detektor promieniowania podczerwonego typu *QWIP*. Będzie to uzupełnienie materiału o detektorach przedstawionego wcześniej. Są także niekiedy problemy z ustaleniem prawidłowej, polskiej terminologii metrologicznej w tej dziedzinie, gdyż powstające nowe rozwiązania nie mają odzwierciedlenia w nazewnictwie istniejącej normy [5]. Dlatego w niniejszej pracy, w przypadku braku polskiego terminu, przyjęto określenie wynikające bezpośrednio z tłumaczenia angielskiego.

#### 1. Współczesne kamery termowizyjne do badań naukowych

Obecnie dla celów naukowo-badawczych najczęściej stosuje się kamery z matrycowymi detektorami kwantowymi *QWIP* (Quantum Well Infrared Photon detector – Kwantowe, Studniowe, Fotonowe detektory Podczerwieni). Detektory *QWIP* opracowała Firma AT&T na początku lat 90-tych. Strukturę stanowią cienkie warstwy *AlGaAs* oraz *GaAs* – rys. 1. Dla zapewnienia optymalnych parametrów pracy wymagają schłodzenia do temperatury  $-203^{\circ}\text{C}$  ( $\sim 70\text{K}$ ) za pomocą chłodziwy Stirlinga wraz z naczyniem Dewara, czyli wymagają nieco większego schłodzenia niż typowe detektory chłodzone:  $-196^{\circ}\text{C}$  ( $\sim 77\text{K}$ ). Obecnie są to najczulsze detektory o temperaturowej zdolności rozdzielczej:  $20\text{--}40\text{mK}$ , dlatego stosowane są głównie do badań naukowych. Największą czułość widmową mają w paśmie długofalowym (*LW*)  $8\text{--}9\mu\text{m}$  o bardzo wąskiej szerokości  $1\mu\text{m}$ . Ich cechą charakterystyczną jest stosunkowo wysoka jednorodność poszczególnych elementów (pikseli) matrycy. Rejestracja obrazu odbywa się z dynamiką 14 bitową, tj. gwarantują możliwość uzyskania rozdzielczości przetworników analogowo-cyfrowych (*A/C*) równą  $2^{14}=16384$ .



Rys. 1. Struktura pojedynczego pikselu matrycy *QWIP* o rozmiarach  $30 \times 30 \mu\text{m}$  [6].

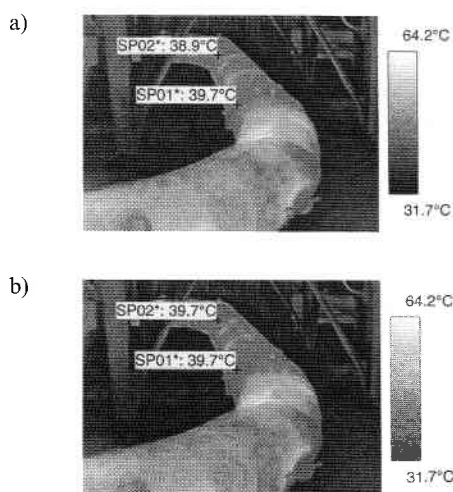
Detektory QWIP należą obecnie do najbardziej zaawansowanych na świecie. W zakresie dalszych badań nad detektorami kwantowymi planuje się stworzenie większych matryc, np. 640x480 pikseli – obecny standard to 320x240 pikseli, oraz opracowanie detektorów dwubarwowych, t.j. scalonych detektorów krótkofalowych (SW) i długofalowych (LW) [6]. Wydaje się, że w przyszłości stosowanie detektorów QWIP oraz niechłodzonych, mikrobolometrycznych matryc detektorowych [7] stanowić będzie główny kierunek w budowie kamer termowizyjnych.

## 2. Interpretacja wyników pomiaru temperatury metodami termowizyjnymi

### 2.1. Wpływ „grubości” warstwy atmosfery, tj. odległości obiektu od kamery

Atmosfera charakteryzuje się ograniczoną transmisją, która zależy od długości fali  $\lambda$  promieniowania podczerwonego – rys. 5 w [1], oraz od grubości warstwy, czyli inaczej mówiąc od odległości obiektu od kamery. O wpływie odległości na wartość wskazanej temperatury obiektu, można się przekonać analizując następujące rezultaty pomiarów [8].

Na rys. 2 przedstawiono rurociąg ciepłowniczy o równomiernej temperaturze na obserwowanym odcinku. Równomierność temperatury została uprzednio potwierdzona metodami stykowymi. Na rys. 2a można zauważyć, że temperatura na końcu rurociągu jest niższa. Zależy to od odległości i jest związane z ograniczoną transmisją atmosfery. Po wprowadzeniu prawidłowej wartości odległości dla końcowego odcinka rurociągu – rys. 2b, kamera pokazuje już jednakową temperaturę na całej długości. Wartość temperatury w danym punkcie oznaczono symbolem SP (Spot Point).



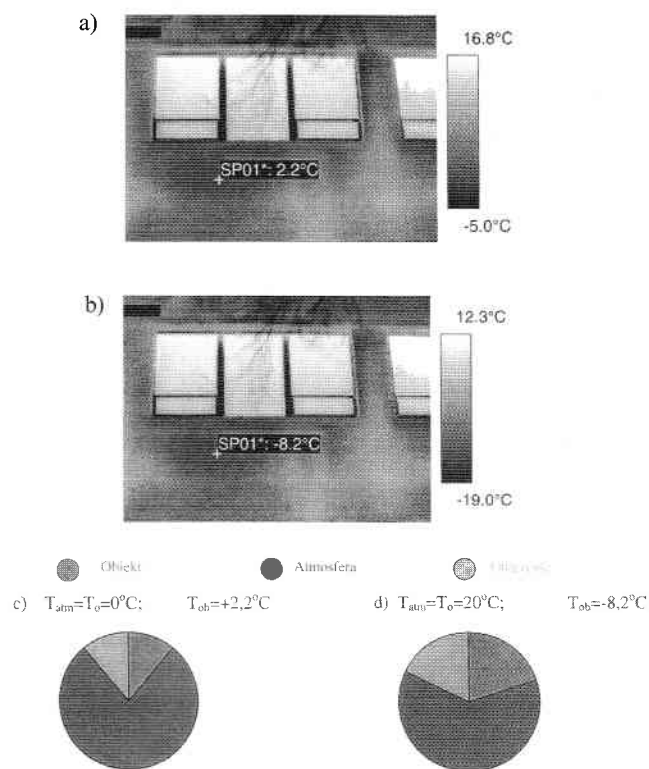
Rys. 2. Wpływ grubości warstwy atmosfery na wskazania kamery termowizyjnej.

### 2.2. Wpływ zadanej kamerze wartości temperatury atmosfery (otoczenia) na jej wskazania.

Przed przystąpieniem do pomiarów, oprócz odległości, należy do kamery wprowadzić jeszcze wartość: emisyjności obiektu, wilgotności atmosfery oraz temperatury atmosfery i otoczenia. Problematyka emisyjności i wpływu tego parametru na bezstykowe (pirometryczne) pomiary temperatury została przedstawiona w pracach [1, 2]. Szerzej można o tym przeczytać także np. w pracach [8, 9, 10].

O problemach związanych z interpretacją wyników w przypadku wprowadzenia nieprawidłowej wartości temperatury atmosfery i otoczenia, można się przekonać analizując rezultaty pomiarów

przedstawionych na rys. 3. Na rys. 3a zadano prawidłową wartość temperatury atmosfery  $T_{atm}$  i otoczenia  $T_o$ ,  $T_{atm}=T_o=0^\circ\text{C}$ . Kamera wskazała temperaturę obiektu (ściany)  $T_{ob}=+2,2^\circ\text{C}$ . Na rysunku 3b zadano nieprawidłową wartość  $T_{atm}=T_o=+20^\circ\text{C}$ . Kamera wskazała  $T_{ob}=-8,2^\circ\text{C}$ . W obydwu przypadkach zadano prawidłową, taką samą, wartość emisyjności ściany  $\epsilon=0,92$ . Różnica wskazanej temperatury obiektu wynika z faktu, że kamera termowizyjna mierzy zawsze całkowite natężenie promieniowania docierające do detektora. Im jest ono słabsze, tym kamera wskaże niższą temperaturę. Na rys. 3c, przy prawidłowym zadaniu temperatury atmosfery i otoczenia, gdzie:  $T_{atm}=T_o=0^\circ\text{C}$  widać, że do detektora dociera większe promieniowanie obiektu, a mniejsze otoczenia i atmosfery, niż w przypadku przedstawionym na rys. 3d. Dlatego kamera wskazała wyższą temperaturę obiektu:  $T_{ob}=+2,2^\circ\text{C}$ . Na rys. 3d, gdzie przyjęto:  $T_{atm}=T_o=20^\circ\text{C}$  widać, że do detektora dociera mniejsze promieniowanie obiektu, a większe otoczenia i atmosfery niż w przypadku przedstawionym na rys. 3c, dlatego kamera wskazała niższą temperaturę obiektu:  $T_{ob}=-8,2^\circ\text{C}$ .



Rys. 3. Wpływ w zadanej kamerze wartości temperatury atmosfery i otoczenia na jej wskazania.

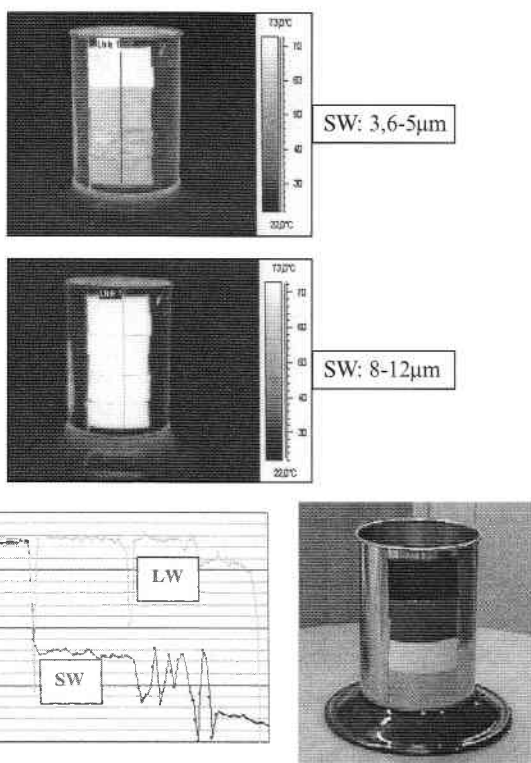
### 2.3. Która kamera jest lepsza, krótkofalowa czy długofalowa?

Jest to bardzo często zadawane pytanie, na które, jak się wydaje, bardzo trudno udzielić jednoznacznej odpowiedzi. O wadach i zaletach kamer krótkofalowych (SW) i długofalowych (LW) można między innymi przekonać się wykonując następujące, bardzo proste doświadczenie, przedstawione na rys. 4 [8].

Na puszkę metalową naklejono 6 taśm niemetalowych o różnej emisyjności i całość pod-grzano. Następnie zmierzono ich temperaturę za pomocą kamer SW (3,6-5 $\mu\text{m}$ ) oraz LW (8-12 $\mu\text{m}$ ). Do kamer wczytano tę samą wartość emisyjności  $\epsilon$ . Obydwie kamery powinny wskazać tę samą temperaturę. Tak jednak nie było. Kamera LW wskazała wyższą temperaturę niż SW, co oznacza, że w zakresie fal LW (8-12 $\mu\text{m}$ ), taśmy niemetalowe mają większe  $\epsilon$  niż w zakresie fal SW (3,6-5 $\mu\text{m}$ ). Taśmy niemetalowe charakteryzowały się

także emisyjnością selektywną w zakresie fal SW – widać różnice ich temperatury. W zakresie fal LW kamera wskazała jednorodną temperaturę. Potwierdzają to przebiegi izoterm podane w lewym dolnym rogu; na termogramach puszek metalowych są one zaznaczone liniami pionowymi.

Odwrotna sytuacja wystąpiła dla puszki metalowej. Kamera SW wykazała nieco wyższą temperaturę niż LW, co świadczy, że metale w zakresie fal krótkich mają wyższą emisyjność niż w zakresie fal długich (LW).



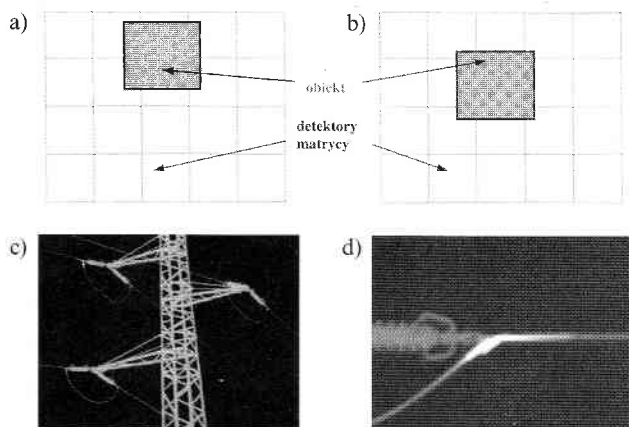
Rys. 4. Pomiary z zastosowaniem kamery krótkofalowej i długofalowej [8].

### 3. Rozdzielczość geometryczna kamery termowizyjnej

Innym rodzajem metrologicznego problemu występującego przy pomiarach termowizyjnych, jest problem pomiaru temperatury małych obiektów z zadanej odległości. Dotyczy on tzw. geometrycznej zdolności rozdzielczej kamery lub krótko rozdzielczości geometrycznej. Problem ten wyjaśnia rys. 5. Na rys. 5ab przedstawiono dwa przypadki naświetlenia detektora matrycy przez mały obiekt. Na rys. 5b obiekt przypadkowo jest ustawiony tak, że naświetla całkowicie przynajmniej jeden detektor, zaś na rys. 5a ten sam obiekt nie jest w stanie całkowicie naświetlić żadnego. Z rys. 5d można zauważyć, że temperatura uchwytu odciążowego mierzona z bliska jest wyższa niż temperatura mierzona z daleka – rys. 5c. Wynika to z faktu, że z bliskiej odległości optyka kamery gwarantuje pełne naświetlenie przynajmniej jednego detektora matrycy kamery. Po wprowadzeniu do kamery prawidłowej wartości emisyjności obiektu, odległości, temperatury otoczenia i wilgotności atmosfery, temperatura wskazywana odpowiada rzeczywistości. Na rys. 5cd oznaczono odpowiednio:

- IRmax – maksymalna temperatura występująca na całej powierzchni zdjęcia, określa ją maksymalna temperatura wybrana ze wskazań wszystkich detektorów matrycy,
- ARmax - maksymalna temperatura występująca na zaznaczonym obszarze, określa ją maksymalna temperatura wybrana ze wskazań detektorów naświetlonych w obszarze.

Można zauważyć także, że na rys. 5cd IRmax jest równe ARmax, co potwierdza dodatkowo prawidłowość wyznaczenia lokalizacji maksymalnych temperatur.



Rys. 5. Określanie minimalnego rozmiaru małego obiektu na przykładzie uchwytu odciążowego do połączeń mostkowych słupa odporowego linii wysokiego napięcia: usytuowanie obiektu względem matrycy detektorów – nie gwarantujące pełnego naświetlenia żadnego detektora a) oraz gwarantujące pełne naświetlenie przynajmniej jednego detektora b), c) wartość temperatury uchwytu mierzona z daleka – około 40 metrów, d) wartość temperatury uchwytu mierzona z bliska – około 7 metrów.

W celu uniknięcia opisanych wyżej problemów, przyjmuje się, że minimalna wielkość obiektu, naświetlająca detektor z danej odległości i przy zastosowaniu optyki o określonym kącie widzenia, powinna gwarantować pełne naświetlenie przynajmniej 3-4 detektorów matrycy. Aby to wyjaśnić, należy opisać dwa parametry charakteryzujące rozdzielczość geometryczną kamery: pole widzenia kamery (FOV – Field Of View) oraz chwilowe (minimalne) pole widzenia (IFOV – Instantaneous Field Of View).

#### 3.1. Pole widzenia kamery

Pole widzenia (FOV) określa obszar jaki z danej odległości  $l$  można obserwować za pomocą danej optyki zainstalowanej w kamerze. Jest ono określane w metrach i dotyczy kierunku obserwacji poziomej ( $H$  – horyzontalnej) oraz pionowej ( $V$  – wertykalnej). W tabeli 1 podano przykładowe wartości pola widzenia dla optyki  $24^\circ \times 18^\circ$ , w zależności od odległości.

$l$ , m	0,50	1,0	2,0	5,0	10	30	100
$H$ , m	0,20	0,41	0,81	2,0	4,1	12	41
$V$ , m	0,15	0,31	0,62	1,5	3,1	9,3	31

Tab. 1. Wartości pola widzenia (FOV) dla optyki  $24^\circ \times 18^\circ$ .

Dla podanej wyżej optyki, pole widzenia można obliczyć ze wzorów:

$$H = l \cdot \sin 24^\circ, V = l \cdot \sin 18^\circ.$$

#### 3.2. Chwilowe (wymagane, minimalne) pole widzenia

Chwilowe pole widzenia (IFOV) określa jaki obszar stanowi pole widzenia pojedynczego detektora (piksela) matrycy. Przykładowo dla optyki  $24^\circ \times 18^\circ$ , z odległości 1m podane w tabeli 1 pole widzenia  $H \times V$  wynosi  $0,41 \times 0,31$ m. Przyjmując, że kamera posiada matrycę składającą się z  $320 \times 240$  detektorów, chwilowe pole widzenia  $H_{\min} \times V_{\min}$  wyniesie:

$$\frac{0,41}{320} = \frac{0,31}{240} = 1,3 \text{ mm} \cdot 1,3 \text{ mm}$$

Oznacza to, że za pomocą optyki kamery 24°x18° wyposażonej w matrycę 320x240 detektorów, z odległości 1m można wykryć przegrzew na powierzchni 1,3mmx1,3mm. Obszar ten zwiększa się i zmniejsza proporcjonalnie do odległości l. Przykładowo dla l=100m wynosi 13mmx13mm.

Inny sposób obliczania IFOV polega na wyliczeniu w radiach kąta  $\alpha_{rd}$  rozwarcia optyki dla pojedynczego detektora:

$$\alpha_{rdH} = \frac{24\pi}{180 \cdot 320} = 0,00131rd \quad \text{a stąd} \quad H_{\min} = 1 \cdot \sin(0,00131) = 1,3 \text{ mm}$$

$$\alpha_{rdV} = \frac{18\pi}{180 \cdot 240} = 0,00131rd \quad \text{a stąd} \quad V_{\min} = 1 \cdot \sin(0,00131) = 1,3 \text{ mm}$$

Inaczej mówiąc IFOV jest to obszar na który, poprzez optykę, „patrzy” pojedynczy piksel matrycy i określa absolutnie dolną granicę rozmiaru mierzonego obiektu. **W praktyce pomiarowej przyjmuje się, aby minimalna wielkość obserwowanego obiektu wynosiła 3-4 IFOV.**

Rozdzielczość geometryczna kamery zależy od kąta rozwarcia zastosowanej optyki oraz od ilości detektorów (pikseli) w matrycy. Im optyka charakteryzuje się mniejszym kątem, a matryca posiada więcej detektorów, to jest lepsza rozdzielczość geometryczna kamery – można obserwować mniejsze obiekty. Są jednak oczywiste ograniczenia związane z powiększaniem ilości pikseli w matrycy oraz budowaniem soczewek w mniejszym kącie, czyli mniejszym polu widzenia.

## 4. Podsumowanie

Z lektury publikacji można zauważyć, że interpretacja wyników pomiarów termowizyjnych nie jest łatwa i wymaga pewnego doświadczenia. Nie jest także łatwa odpowiedź na postawione pytanie: która kamera jest lepsza – krótkofalowa (SWB), czy długofalowa (LWB)? Ogólnie zależy to od rodzaju mierzonego obiektu i warunków pomiaru. Można jedynie stwierdzić, że kamera długofalowa jest mniej wrażliwa na promieniowanie słoneczne, gdyż wy-

korzystywany zakres długości fal 8-14µm eliminuje wpływ tego promieniowania na wskazania.

Artykuł, ze względu na ograniczenia objętościowe, nie opisuje wszystkich problemów metrologicznych występujących przy pomiarach termowizyjnych. Przewidywane są do opublikowania kolejne części mówiące na przykład o parametrach metrologicznych kamer, pomiarze temperatury metali o wypolerowanej, lustrzanej powierzchni czy interpretacji wyników pomiarów temperatury obiektów na tle niebosłonu.

## Literatura

- [1] W.MINKINA, P. RUTKOWSKI, W.WILD: Podstawy pomiarów termowizyjnych, część I – istota termowizji i historia jej rozwoju oraz, część II – współczesne rozwiązania systemów termowizyjnych, błędy metody, Pomiary Automatyka Kontrola 46 (2000) Nr1, str.7-10 (cz.I) oraz str.11-14 (cz.II).
- [2] W. MINKINA: Technika pomiarów w podczerwieni w procesach technologicznych, Materiały VI Sympozjum „Metrologia w Systemach Jakości – 3”, Cedzyna koło Kielc, 16-18.10.2000, str.187-202.
- [3] G. RUDOWSKI: Termowizja i jej zastosowanie, WKiŁ, Warszawa, 1978.
- [4] X. MALDAQUE: Non destructive evaluation of materials by infrared thermography, London, Springer-Verlag, 1993.
- [5] PN-90/E-01005 „Technika świetlna, terminologia” Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa, 1991.
- [6] B. SCH÷NBACH: A highly sensitive LW-QWIP camera for demanding applications” Materiały 6th Conference on Infrared Sensors & Systems (IRS2), Erfurt, 9-11.05.2000, str.87-91.
- [7] J.L. TISSOT, F. ROTHAN, C. VEDEL, M. VILAIN, J.J. YON: Uncooled IREPA developments review, Quantitative InfraRed Thermography, 4 Conference QIRT’98, Łódź, 7-10.09.1998.
- [8] IR-BOOK, Materiały szkoleniowe Firmy FLIR, Level II (Infrared Training Center – itc, International), 2000.
- [9] K. CHRZANOWSKI: Non-contact thermometry – Measurement errors, Wydawnictwo SPIE (Society of Photooptical Instrumentation Engineers) – oddział w Polsce, Warszawa 2000.
- [10] TECHNISCHES MESSEN, 66 (1999) Nr 3 oraz Nr 9, monotematyczne zeszyty pod redakcją G. GERLACHA, w całości poświęcone tematyce pomiarów termowizyjnych.