

**Robert STRĄKOWSKI, Maria STRĄKOWSKA, Bogusław WIĘCEK**

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, INSTYTUT ELEKTRONIKI,  
Wólczajska 211/215, 90-924 Łódź

## Metrologiczna kamera termowizyjna z detektorem mikrobolometrycznym VOx

**Mgr inż. Robert STRĄKOWSKI**

Robert Strąkowski urodził się w 1986 r. W 2010 roku ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej. Jest współautorem 6 publikacji oraz jednego rozdziału w książce. W Zakładzie Układów Elektronicznych i Termografii PŁ prowadzi badania na temat bezkontaktowego pomiaru temperatury szybkozmiennych procesów termicznych w elektronice. Jego zainteresowania naukowe obejmują również przetwarzanie obrazów termograficznych.



e-mail: strakowski.robert@dokt.p.lodz.pl

**Mgr inż. Maria STRĄKOWSKA**

Ukończyła studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej, na kierunku Elektronika i Telekomunikacja, specjalności Przetwarzanie Sygnałów i Obrazów. W roku 2010 rozpoczęła studia doktoranckie. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje wokół metod przetwarzania obrazów termograficznych, problematyki pomiarów termowizyjnych oraz modelowania zjawisk termicznych.



e-mail: strakowska.m@gmail.com

**Dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK**

Specjalizuje się w termografii w podczerwieni i w modelowaniu zjawisk złożonej wymiany ciepła w elektronice. Jest autorem i współautorem ponad 250 publikacji. Bogusław Więcek jest członkiem komitetów naukowych: Quantitative Infrared Thermography, Thermal Engineering and Thermography oraz Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Jest organizatorem cyklicznej krajowej konferencji „Termografia i Termometria w Podczerwieni” – TTP.



e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl

### Streszczenie

W artykule opisano budowę kamery termowizyjnej zaprojektowanej i wykonanej w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Opisano blokowy schemat układu elektronicznego współczesnej kamery termowizyjnej. Omówiono proces akwizycji i korekcy obrazu termowizyjnego podczas jego transmisji na całej długości toru transmisyjnego kamery, od detektora do komputera. Przedstawiono operacje wykonywane na sygnale analogowym w układzie odczytu detektora oraz metody cyfrowej korekcy termogramu w czasie rzeczywistym zaimplementowane w procesorze sygnałowym.

**Słowa kluczowe:** termowizja, budowa kamery termowizyjnej, korekcy nie-jednorodności.

## Metrological thermovision camera with VOx microbolometer

### Abstract

In this paper construction of a new thermovision camera together with its parameters are presented. The camera was designed and realized in the Institute of Electronics at Technical University of Lodz. At first, the block diagram of a modern infrared camera was analyzed. It was divided into two parts: detectors and control-processing sections. First section, apart from VOx detector, contained also analog power suppliers, a focal plane array temperature stabilization circuit and a digital to analog converter. The second section consisted of a digital signal processor, SRAM and nonvolatile memories, a programmable logic device and the Ethernet interface for image transmission. The overall logic was implemented in a CPLD device for controlling the VOx detector. The image acquisition and correction processes along the whole transmission path are presented. Real time non-uniformity and bad pixel corrections performed by a powerful digital signal processor are described. Finally, the calibration process existing for every metrological camera and conclusions are given.

**Keywords:** thermovision, infrared camera construction, nonuniformity correction.

### 1. Wstęp

Współczesne kamery termowizyjne są zaawansowanymi analogowo-cyfrowymi urządzeniami elektronicznymi. Wykorzystywane

w kamerach detektory promieniowania podczerwonego, których rozdzielczość cały czas rośnie, wymuszają stosowanie coraz szybszych układów cyfrowych do obróbki i przesyłania danych w czasie rzeczywistym. Dlatego w obecnie konstruowanych kamerach stosuje się elementy elektroniczne, które jeszcze kilka lat temu można było spotkać np. w standardowych komputerach osobistych.

Do podstawowych zadań elektroniki niechłodzonej, bolometrycznej kamery termowizyjnej należą operacje korekcy niejednorodności matrycy detektorów, wadliwych bolometrów matrycy oraz kompensacja dryftu detektora. Podczas projektowania kamery termowizyjnej należy zadbać ze szczególną uwagą o odpowiednie zasilanie analogowej części elektroniki, gdyż jest to decydujący składnik wpływający na uzyskanie optymalnych parametrów szumowych matrycy detektorów.

Przedstawiona w artykule kamera (rys. 1), dedykowana do zastosowań medycznych, została skonstruowana i zbudowana w Zakładzie Układów Elektronicznych i Termografii Instytutu Elektroniki Politechniki Łódzkiej.



Rys. 1. Skonstruowana w Instytucie Elektroniki kamera termowizyjna  
Fig. 1. Thermovision camera constructed in the Institute of Electronics

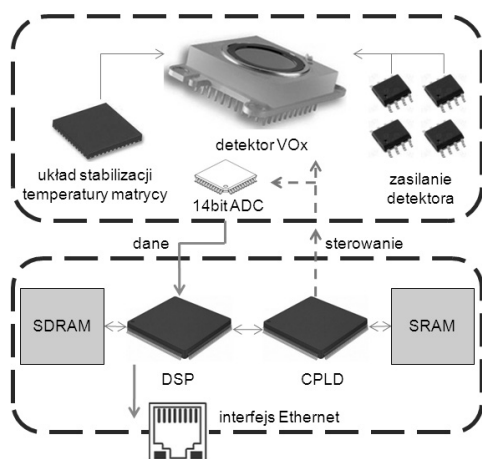
Tab. 1. Parametry skonstruowanej kamery termowizyjnej  
Tab 1. Parameters of the constructed thermovision camera

Detektor	VOx (Vanadium Oxide)
Rozdzielczość	288 x 384
Rozmiar piksela	25 $\mu\text{m}$
Zakres widmowy	LWIR (8-14 $\mu\text{m}$ )
NETD	50 mK
FOV	18°
F#	1
Interfejs	Ethernet 10 / 100 Mbps

## 2. Opis elektroniki kamery

W budowie standardowej kamery termowizyjnej, nie posiadającej zintegrowanego układu wyświetlania obrazu, można wyróżnić dwie podstawowe sekcje sprzętowe: sekcję detektora oraz sekcję sterująco-przetwarzającą (rys. 2). Podział budowy związany jest m.in. z podziałem elektroniki na część analogową i cyfrową.

Zastosowany detektor o rozdzielczości 384x288 pikseli wykonany z tlenku wanadu VOx (ang. *Vanadium Oxide*) umożliwia pomiar różnicy temperatury dwóch punktów na obrazie na poziomie NETD=50 mK (ang. *Noise Equivalent Temperature Difference*). W celu osiągnięcia maksymalnej rozdzielczości temperaturowej projektując kamerę termowizyjną należy spełnić dwa podstawowe warunki. Po pierwsze zastosować precyzyjne i niskoszumowe zasilanie części analogowej. W tym celu w sekcji detektora umieszczono kilka źródeł napięcia odniesienia, których parametr stabilności napięcia wyjściowego wynosi 10 ppm i wartość napięcia szumów jest rzędu pojedynczych mikrowoltów w paśmie do 1kHz. Zasilają one elektronikę detektora oraz część analogową 14-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Kolejnym warunkiem jest stabilizacja temperatury matrycy detektorów mikrobolometrycznych na zadanym poziomie. Zadanie to spełnia autonomiczny układ PID (ang. *Proportional Integrat Derivative Controller*) sterujący wbudowanym w detektor ogniwnem Peltier.



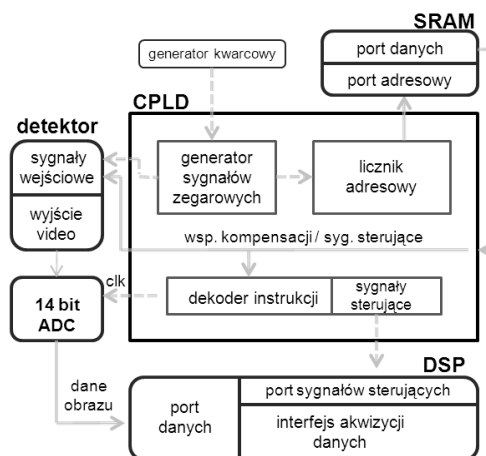
Rys. 2. Schemat budowy kamery termowizyjnej  
Fig. 2. Scheme of the thermovision camera construction

Zastosowana matryca detektorów wykonana z tlenku wanadu (VOx) wymaga ciągłego sterowania przy pomocy komend. System sterowania (rys. 3) zintegrowano w układzie programowalnym CPLD (ang. *Complex Programmable Logic Device*). Podczas pracy kamery zaimplementowana logika sterowania detektorem w odpowiednich odstępach czasu odczytuje kolejne komendy, z dedykowanej do ich przechowywania pamięci SRAM (ang. *Static Random Access Memory*), przesyłając je następnie do detektora. W czasie wysyłanych do detektora komend wbudowany w układ logiczny dekodery generuje również kilka dodatkowych sygnałów sterujących. Pierwszy z nich taktuje przetwornik analogowo-cyfrowy w celu synchronizacji momentu próbkowania wartości sygnału każdego piksela z wyjściem wideo detektora. Pozostałe generowane przez dekodery sygnały służą do sterowania niezależnym, równoległym interfejsem akwizycji danych procesora sygnałowego.

Po akwizycji ramki obrazu musi zostać poddany operacji korekcji błędnych pikseli i korekcji niejednorodności matrycy detektorów. Powyższe operacje muszą być wykonywane w czasie rzeczywistym, co wymaga zastosowania odpowiednio wydajnych układów obliczeniowych. W proponowanym rozwiązaniu zastosowano procesor sygnałowy DSP (ang. *Digital Signal Processor*) pracujący z szybkością 500 MHz. Na podstawie danych korekcji znajdujących się w podręcznej pamięci SDRAM (ang. *Synchronous*

*Dynamic RAM*) dokonuje on korekcji każdej ramki obrazu. Jego zadaniem jest ponad to:

- obsługa interfejsu sieciowego Ethernet, poprzez który skorygowany obraz jest wysyłany do komputera w celu wizualizacji,
- korekcja dryftu temperaturowego detektora,
- monitorowanie parametrów pracy kamery.

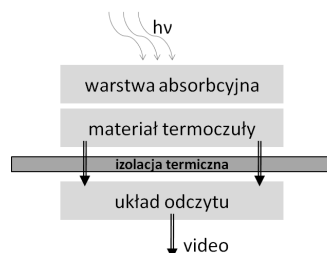


Rys. 3. Schemat działania systemu sterowania zaimplementowanego w układzie CPLD

Fig. 3. Working scheme of a control system implemented in the CPLD circuit

## 3. Akwizycja obrazu termowizyjnego

Wartością mierzoną przez zintegrowany układ odczytu detektora ROIC (ang. *Read-Out Integrated Circuit*) jest zmiana parametru elektrycznego detektora wywołana padającym na niego promieniowaniem podczerwonym obserwowanej sceny o gęstości mocy  $\Phi$ , w  $W/m^2$ . Energia promieniowania powoduje zmianę temperatury detektora, co skutkuje zmianą wartości rezystancji elektrycznej bolometru. Efektywność ogrzewania detektora poprzez radiacyjną wymianę ciepła zależy głównie od jego budowy. Typowy detektor bolometryczny, wchodzący w skład matrycy detektorów, to izolowany termicznie element, najczęściej membrana podtrzymywana przez dwa metalowe słupki, o grubości 100 nm i rozmiarze  $25 \mu m \times 25 \mu m$ , wykonany w technologii mikro-mechanicznej MEMS (ang. *MicroElectroMechanical Systems*). Taka budowa pozwala uzyskać bardzo małą wartość konduktancji termicznej detektor-otoczenie  $G_{th}$ , dzięki czemu elementy te mogą pracować w wysokiej temperaturze (bliskiej otoczeniu) i osiągać zadowalającą wykrywalność na poziomie  $10^7 cm \cdot H^{1/2}/W$ . Ponadto uzyskuje się minimalną możliwą wartość pojemności cieplnej  $C_{th}$ , gdyż detektor termiczny poddany jest zwykle działaniu promieniowania zmiennego w czasie. Detektor jest wykonany z materiału termoczułego pokrytego cienką warstwą specjalnego absorbentu, w celu efektywniejszego pochłaniania promieniowania (rys. 4) [1].

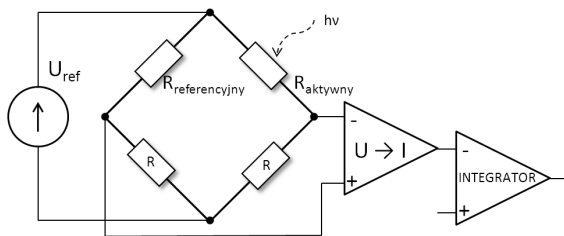


Rys. 4. Schemat warstwowej budowy detektora bolometrycznego  
Fig. 4. Scheme of the bolometer detector layer-based construction

Czułość detektora wyrażana jest poprzez temperaturowy współczynnik zmian rezystancji TCR (*ang. Temperature Coefficient of Resistance*).

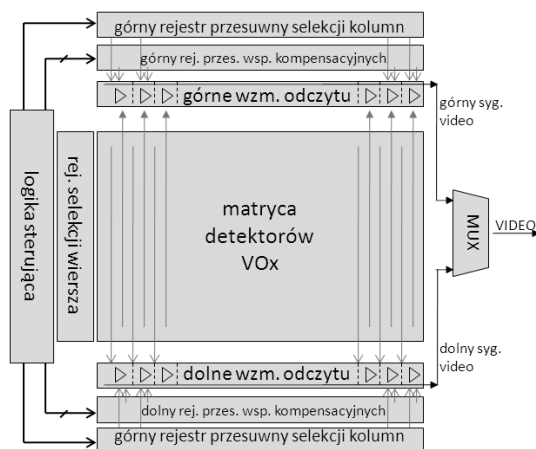
Dla tlenku wanadu ( $VO_x$ ) w temperaturze pokojowej TCR osiąga wartości 3 %/K [2]. Obecnie wykonywane matryce detektorów bolometrycznych poprzez zastosowanie tradycyjnej technologii wytwarzania układów scalonych, można zintegrować z układami odczytu wykonanymi w technologii CMOS [3].

W detektorze  $VO_x$  opisywanej kamery termowizyjnej zastosowano układ odczytu oparty na mostku Wheatstona (rys. 5). Element aktywny matrycy, pojedynczy detektor bolometryczny, jest jednym z elementów mostka. Padające na detektor promieniowanie podczerwone powoduje zaburzenie równowagi mostka i wytworzenie sygnału napięciowego. Rozwiązanie to pozwala zwiększyć dokładność odczytu zmiany rezystancji bolometru oraz polepszyć parametry pomiarowe detektora poprzez zastosowanie referencyjnego bolometru kompensującego zmiany rezystancji wynikające z samonagrzewania. Wytworzony sygnał napięciowy podawany jest na wzmacniacz transkonduktancyjny w celu zamiany na sygnał prądowy. Następnie sygnał jest integrowany przez określony czas w układzie całkującym w celu uzyskania odpowiedniej czułości. Zwiększenie czasu całkowania wpływa na zwiększenie czułości detektora. W praktyce czułość detektora i kamery zmienia się poprzez zmianę wartości pojemności integratora.



Rys. 5. Schemat układu odczytu z mostkiem Wheatstona  
Fig. 5. Scheme of the readout circuit with Wheatstone bridge

Budowa układu odczytu zastosowanego detektora bolometrycznego (rys. 6) pozwala przeprowadzić wstępny etap korekcji obrazu termowizyjnego w jego układzie, jeszcze przed konwersją analogowo-cyfrową [4]. Operacja ta nosi nazwę kompensacji niejednorodności matrycy detektorów. Podczas akwizycji kolejnej ramki obrazu z detektora, układ sterujący wraz z odpowiednimi komendami, wysyła 10. bitowe współczynniki kompensacyjne dla każdego piksela matrycy detektorów.



Rys. 6. Schemat blokowy układu odczytu detektora [4]  
Fig. 6. Block scheme of the detector readout circuit [4]

Przesłane współczynniki służą do korekcji wartości wzmocnienia sygnału każdej kolumny, podczas integracji sygnału dla kolejnego wiersza obrazu. Współczynniki kompensacyjne obliczane są dla każdego detektora tylko raz, podczas etapu kalibracji toru pomiarowego kamery. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala zmniejszyć niejednorodność matrycy do wartości mniejszej, niż 200 mV<sub>p-p</sub>. W praktyce odpowiada ona rozrzutowi wartości pikseli na poziomie mniejszym, niż 10% dynamicznego zakresu pracy kamery. Co więcej, procedura obliczania współczynników kompensacyjnych ustawia wyjściowy sygnał każdego detektora jak najbardziej środka dynamicznego zakresu pracy kamery dla mocy promieniowania, która pada w danej chwili na matrycę. Umożliwia to zmianę środka zakresu pomiarowego kamery do pożądanej wartości.

Wyjściowy sygnał wideo z matrycy detektorów, reprezentujący wartość napięcia proporcjonalną do mocy promieniowania podczerwonego padającego na każdy bolometr, poddany zostaje kwantyzacji poprzez przetwornik ADC (*ang. Analog Digital Converter*). Następnie dane z przetwornika ADC zostają pobrane przez równoległy port danych procesora sygnałowego. Po pobraniu danych obrazu procesor sygnałowy dokonuje korekcji niejednorodności matrycy detektorów.

Potrzeba wykonania procedury korekcji NUC (*ang. Non-Uniformity Correction*) wynika z rozrzutu charakterystyk przejściowych poszczególnych bolometrów matrycy. Rozrzut ten spowodowany jest rozrzutem technologicznym rezystancji elektrycznej, pojemności i rezystancji cieplnej, temperaturowego współczynnika rezystancji oraz wymiarów każdego detektora. Wynikiem rozrzutu niejednorodności charakterystyk detektorów matrycy bolometrycznej jest silnie zakłócony obraz, tzw. szumem ustalonym - FPN (*ang. Fix Pattern Noise*). W opisywanej kamerze termowizyjnej zaimplementowano dwupunktową metodę korekcji NUC [5, 6]. Jest to najczęściej stosowany algorytm korekcji we współczesnych kamerach termowizyjnych. Zakłada on aproksymację charakterystyk przejściowych detektorów matrycy w pewnym ustalonym zakresie mocy promieniowania. Dwupunktowa korekcja niejednorodności wykonywana jest według wzoru

$$U_{NUCij}(T) = g_{ij}U_{ij}(T) + o_{ij} \quad (1)$$

gdzie  $U_{NUCij}$  jest skorygowaną odpowiedzią detektora o współrzędnych  $ij$ , a  $U_{ij}$  rzeczywistą odpowiedzią tego detektora na pochłoniętą moc promieniowania podczerwonego ciała doskonale czarnego o określonej temperaturze. Symbol  $g_{ij}$  oznacza współczynniki wzmocnienia (*ang. gain*), a  $o_{ij}$  współczynniki przesunięcia (*ang. offset*) charakterystyki przejściowej detektorów. W celu wyznaczenia współczynników korekcji rejestrowane są dwa termogramy. Każdy z nich wykonywany jest dla jednorodnej temperatury powierzchni ciała czarnego, ale dla dwóch różnych wartości temperatury odniesienia. Następnie obliczona zostaje odpowiedź uśredniona matrycy o rozmiarze  $M \times N$  detektorów, odpowiednio dla niskiej ( $T_L$ ) oraz wysokiej ( $T_H$ ) wartości temperatury ciała czarnego według wzoru:

$$U_{sr}(T) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N U_{ij}(T) \quad (2)$$

Przyjmując, że obliczone wartości średnie są oczekiwanymi odpowiedziami matrycy na zadaną moc promieniowania, zgodnie ze wzorem (1), można utworzyć układ dwóch równań:

$$\begin{cases} U_{sr}(T_L) = g_{ij}U_{ij}(T_L) + o_{ij} \\ U_{sr}(T_H) = g_{ij}U_{ij}(T_H) + o_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

którego rozwiązaniem dla każdego detektora są wartości współczynnika wzmocnienia (4) i przesunięcia (5).

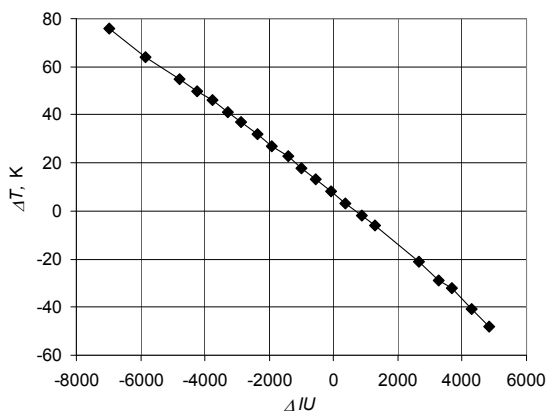
$$g_{ij} = \frac{U_{sr}(T_H) - U_{sr}(T_L)}{U_{ij}(T_H) - U_{ij}(T_L)} \quad (4)$$

$$o_{ij} = U_{sr}(T_L) - g_{ij}U_{ij}(T_L) \quad (5)$$

Każda matryca zawiera część detektorów, których działanie opisuje się jako niepoprawne. Producent wraz z detektorem dostarcza współrzędne wadliwych bolometrów, których odpowiedź podczas akwizycji obrazu termograficznego powinny zostać skorygowana. W opisywanym systemie zaimplementowano funkcję korekcji błędnych pikseli termogramu. Ze względu na wykorzystany interfejs przesyłu Ethernet obraz został podzielony na 8 pakietów danych. Współrzędne wadliwych detektorów zostały przekonwertowane na numer pakietu i odpowiadający mu numer wadliwego piksela w pakiecie. Podczas transmisji danych do komputera PC program procesora sygnałowego sprawdza numer aktualnie przesyłanego pakietu. Jeżeli w danym pakiecie znajduje się błędny piksel jego poprawna wartość obliczana jest na podstawie wartości pikseli sąsiadujących.

#### 4. Kalibracja kamery termowizyjnej

Kalibrację kamery termowizyjnej przeprowadzono przy użyciu ciała doskonale czarnego w zakresie temperatury od ok. 17 °C do 140 °C. Zmieniając wartość temperatury ciała doskonale czarnego, rejestrowano obrazy termowizyjne. Wyznaczono wartość średnią obrazu w obszarze środkowym dodatkowo uśredniając sygnał każdego piksela w czasie. Kalibracji dokonano przy stałej wartości temperatury otoczenia (obudowy kamery)  $T_a = 20$  °C, dla czasu integracji detektora  $t_m = 64$  µs i przy stabilizowanej wartości temperatury obudowy detektora  $T_{case} = 24$  °C. Krzywą kalibracji przedstawiono na rys. 6. Wykres przedstawiono jako przyrosty wartości temperatury i sygnału cyfrowego detektora ( wyrażonego w tzw. jednostkach izotermicznych IU) w odniesieniu do temperatury i sygnału detektora dla wewnętrznej migawki kamery. Wartość temperatury i sygnału migawki są monitorowane na bieżąco w kamerze podczas korekcji jednopunktowej jej dryftu. Korekcja ta jest wykonywana automatycznie, co ok. 1 min. Krzywa kalibracji wraz z parametrami termicznymi migawki jest wysyłana przez system transmisji w kamerze wraz z każdą ramką. Pomiar punktów kalibracyjnych krzywej kalibracji poprzedzony jest każdorazowo korekcją jednopunktową obrazu. Parametry termiczne migawki w czasie kalibracji są zapamiętywane w systemie elektronicznym kamery i przesyłane wraz z obrazem.



Rys. 7. Krzywa kalibracji wyrażona przyrostowo w odniesieniu do wartości temperatury i sygnału cyfrowego (IU) migawki

Fig. 7. Calibration curve as the difference between the black body temperature (measured signal) and shutter parameters

Podczas wyznaczania wartości temperatury badanego obiektu, najpierw obliczana jest różnica  $\Delta IU$  pomiędzy sygnałem detektora dla obiektu i migawki. Następnie przy wykorzystaniu krzywej kalibracji (rys. 7) obliczany jest przyrost temperatury względem temperatury migawki.

Warto zauważyć, że wykres na rys. 7 nie przecina układu współrzędnych w punkcie (0,0). Jest to wynikiem istnienia pasywnego promieniowania obudowy detektora, kamery i obiektywu. Niewielkie przesunięcie ok. 8 °C na osi temperatury i 500 IU na osi sygnału detektora należy uwzględnić przy obliczaniu temperatury mierzonego obiektu. W rzeczywistości krzywa kalibracji na rys. 7 obowiązuje jedynie dla temperatury otoczenia (obudowy kamery) jaka była w trakcie wykonania kalibracji. Im wyższa ta wartość, tym krzywa kalibracji będzie położona wyżej i odwrotnie, co oznacza, że należy przeprowadzić kalibrację dla różnych wartości temperatury otoczenia, oczywiście w warunkach ustalonych. Wartość tego przesunięcia można nieco zminimalizować stosując ekran radiacyjny w postaci wypolerowanego metalu umieszczonego za detektorem, który oddziela sekcję detektora od pozostałej przestrzeni we wnętrzu kamery. W kamerach pomiarowych należy stosować obiektywy o dużej liczbie otworowej F#, gdyż pozwala to na uzyskanie większego stosunku sygnału do szumu, czyli inaczej zwiększa się czułość kamery termowizyjnej.

W praktyce pomiarowej należy mierzyć wartość temperatury obudowy kamery i stosować właściwą krzywą kalibracji do wyznaczania wartości temperatury obiektu. Wystarczy wyznaczyć kilka krzywych kalibracji (np. 3) dla skrajnych wartości temperatury otoczenia i wartości ze środka zakresu pracy kamery, np. temperatury pokojowej. Pozostałe krzywe kalibracji wyznacza się metodą interpolacyjną.

#### 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono budowę i działanie kamery termowizyjnej opracowanej w Instytucie Elektroniki i przeznaczonej głównie do badań biomedycznych i nieniszczących. Opisano tor pomiarowy od detektora do sygnału (obrazu termowizyjnego), który transmitowany jest do komputera lub wyświetlany na ekranie monitora LCD. Omówiono korekcje jedno i dwupunktową niejednorodności matrycy oraz najważniejsze elementy kalibracji kamery.

#### 6. Literatura

- [1] Tissot J.L.: Uncooled infrared detectors: State of art. VII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczerwieni TTP2006. Politechnika Łódzka, Instytut Elektroniki, 2006.
- [2] Niklaus F., Vieider C. and Jakobsen H.: Mems-based uncooled infrared bolometer arrays – a Review. Proc. SPIE, Vol. 6836, 2007.
- [3] Orzanowski T., Madura H., Powiada E. and Pasierbiński J.: Analiza układu odczytu do matrycy detektorów mikrobolometrycznych. Pomiary Automatyka Kontrola, 9/2006.
- [4] Fraenkel A., Mizrahi U., Bykov L., Adin A., Malkinson E., Zabar Y., Seter D., Gebil Y., Kopolovich Z.: Advanced Features of SCD's Uncooled Detectors. Proc. SPIE, Vol. 5957, 2005.
- [5] Orzanowski T., Madura H., Sosnowski T., Bieszczad G.: Badanie niejednorodności odpowiedzi matrycy mikrobolometrycznej w kamerze termowizyjnej. Pomiary Automatyka Kontrola w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 2/2008.
- [6] Olbrycht R. and Więcek B.: Korekcja dryftu temperaturowego detektorów mikrobolometrycznych. Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 55, 11/2008.

otrzymano / received: 02.08.2011

przyjęto do druku / accepted: 05.09.2011

artykuł recenzowany