

Henryk POLAKOWSKI, Tadeusz PIĄTKOWSKI
WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI,
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Testowe promienniki podczerwieni

Dr inż. Henryk POLAKOWSKI

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1976). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1987 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na metrologii urządzeń podczerwieni. Adiunkt w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 100 publikacji, w tym artykuły, referaty, patenty i wdrożenia.



e-mail: hpolakowski@wat.edu.pl

Dr inż. Tadeusz PIĄTKOWSKI

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



e-mail: tpiatkowski@wat.edu.pl

Streszczenie

Jednym z najważniejszych parametrów oceny jakości kamery termowizyjnej jest jej rozdzielczość temperaturowa. Do jej oceny wymagane są kosztowne wzorce kontrastu. W pracy omówiono zasadę działania oraz praktyczną możliwość wytworzenia wzorcowego kontrastu termicznego za pomocą promiennika monolitycznego. Różnicę kontrastu termicznego uzyskano poprzez wytworzenie struktury mikrowłók na jego powierzchni. Zmiana wartości kontrastu uzyskiwana jest poprzez dobór odpowiedniej temperatury takiego promiennika.

Słowa kluczowe: kamera termowizyjna, emisyjność, rozdzielczość temperaturowa.

IR emitters for thermal camera testing

Abstract

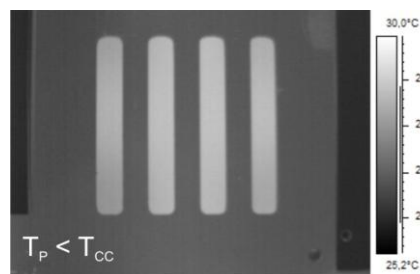
Comparative evaluation of the thermal resolution of infrared cameras can be performed by simultaneous observation of a precisely defined temperature difference (two standard blackbodies, each at different temperature) or thermal contrast obtained by any different method [1]. The standard testing procedure involves usually application of an expensive, precise blackbody and four-bar tests (Fig. 1) [2]. The paper deals with the possibility of obtaining the standard thermal contrast using a single monolithic IR emitter, by creating microcavity pattern on its surface. (Fig. 20 [8]). The results of numerical simulation of such an IR emitter are presented as a set of characteristics, expressing the relation between the effective emissivity and the shape coefficient (Fig. 4). The idea of creating the thermal contrast is discussed in Section 4. The possibility of achieving the thermal contrast desired value is shown on the thermal image of the proposed type of emitter (Fig. 6). The profile of the apparent temperature across the surface is shown in Fig. 7 (the emitter temperature $T=75$ oC). On the basis of thermographic measurements the relation between effective thermal contrast and the emitter temperature was determined (Fig. 9). By choosing the emitter sectors of small differences in emissivity it is possible to observe and evaluate the response of the tested infrared device to the very subtle changes of thermal contrast. The change in thermal contrast between the adjacent sectors is achieved by proper selection of the emitter temperature.

Keywords: thermal camera, emissivity, thermal resolution.

1. Wstęp

Subiektywne badania porównawcze temperaturowej zdolności rozdzielczej kamer termowizyjnych stosowanych na przykład do obserwacji dowolnej sceny termalnej, można wykonać dokonując równoczesnej obserwacji zadanej różnicy temperatury powierzchni dwóch wzorcowych ciał czarnych lub wytworzonego w inny sposób kontrastu termicznego. Standardowe badania wykonuje się zwykle przy wykorzystaniu drogiego wzorcowego źródła promieniowania cieplnego oraz dodatkowej przesłony z odpowiednio ukształtowanymi otworami [1]. Najczęściej stosowana jest przesłona wykonana z materiału o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła zawierająca odpowiednio rozmieszczone cztery prostokątne otwory o stosunku boków 7:1. [2]. Taki zestaw źródła

i przesłony stanowi tak zwany test czteropaskowy. Jest to jeden z typów radiacyjnych testów IR stosowanych przy testowaniu kamer oraz innych urządzeń obserwacyjnych na przykład celowników termowizyjnych. Obraz termiczny testu czteropaskowego zarejestrowany pomiarową kamerą termowizyjną przedstawia rys. 1. Jaśniejsze obszary przedstawiają powierzchnię ciała czarnego o temperaturze T_{cc} , widzianego przez przesłonę o temperaturze $T_p < T_{cc}$.



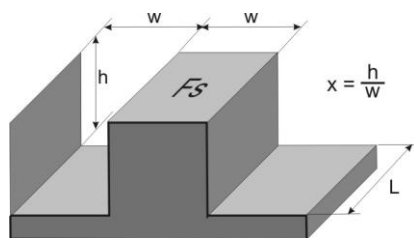
Rys. 1. Termogram testu czteropaskowego
Fig. 1. Thermal image of a four-bar test

Do wytworzenia wzorcowego kontrastu termicznego zaproponowano użycie monolitycznego promiennika [3], nazywanego dalej promiennikiem testowym. W tym przypadku kontrast termiczny obserwowany jest w jednej płaszczyźnie, jest to powierzchnia płytki promiennika utrzymywana w stałej temperaturze. Promienniki takie, mogą znaleźć zastosowanie w badaniach obserwacyjnych urządzeń termowizyjnych, jak również wielopasmowych pirometrów podczerwieni [4].

2. Zasada działania promiennika – podstawy teoretyczne

Jak wykazano w pracy [5] zdolność powierzchni metalicznej do wypromieniowania promieniowania cieplnego zależy między innymi od parametrów geometrycznych mikrostruktury powierzchni ciała stałego. W najprostszym przypadku mikrostrukturę można wytworzyć wykonując szereg regularnych równoległych nacięć w materiale o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła i posiadającym właściwości nieselektywnego promiennika termicznego. Powierzchnia promiennika o takiej strukturze emituje promieniowanie elektromagnetyczne zgodnie z rozkładem Plancka. W ograniczonym przedziale widmowym, a taka sytuacja występuje przy obserwacji promieniowania cieplnego przez kamery termowizyjne, warunek ten spełniają powierzchnie metali. Jeżeli wymiary kątowe nacięć obserwowanych przez kamerę termowizyjną są mniejsze od jej rozdzielczości kątowej obserwuje się obraz uśrednionego rozkładu mocy promieniowania cieplnego. W takim przypadku moc promieniowania z kilku nacięć padająca na pojedynczy detektor jest proporcjonalna do uśrednionej emi-

syjności efektywnej. Jej wartość jest zależna od emisyjności czolowych powierzchni płaskich F_s – rys. 2. oraz efektywnej emisyjności, sąsiadujących z nimi wnęk. Geometrię takiego regularnego układu równoległych nacięć można scharakteryzować współczynnikiem kształtu $x=h/w$, przy założeniu, że h oznacza głębokość, a w szerokość pojedynczego nacięcia, rys. 2.



Rys. 2. Schemat struktury wnękowej
Fig. 2. Micro-cavity structure

3. Numeryczne wyznaczenie emisyjności efektywnej

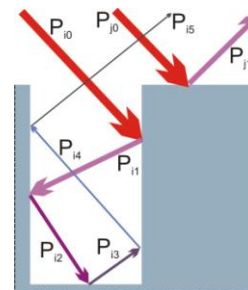
Wyznaczenie emisyjności efektywnej na drodze analizy wymiany ciepła przez promieniowanie jest dobrym oszacowaniem, jednak dokładniejsze obliczenie emisyjności możliwe jest na drodze symulacji cyfrowych. Symulacje takie pozwalają oprócz wyznaczenia globalnej wartości emisyjności wyznaczyć rozkład kątowy oraz mapę emisyjności. W zależności od złożoności zastosowanego algorytmu można w obliczeniach uwzględnić chropowatość powierzchni emitujących jak również nierównomierny rozkład temperatury w obszarze elementarnej wnęki emitującej. Metodami stosowanymi do symulacji tego problemu są metody Monte Carlo w połączeniu z śledzeniem promieni (ray tracing) [6]. Typowy algorytm wyznaczenia emisyjności polega na wytworzeniu siatki punktów na wszystkich powierzchniach emitujących promieniowanie. Kolejno z tych punktów emitowane są wirtualne promienie. Kąt emisji określany jest przez generator liczb losowych natomiast moc niesiona przez dany promień wynika z emisyjności podłoża i temperatury punktu emisji. Następnie śledzony jest przebieg promienia aż do opuszczenia promiennika albo do jego całkowitego pochłonięcia. Emisyjność efektywna jest ilorazem sumy mocy wszystkich promieni opuszczających promiennik do mocy promieniowania dla średniej temperatury. Wadą tego rozwiązania jest konieczność wyznaczenia siatki punktów na skomplikowanym kształcie promiennika. Rozwiązaniem tego problemu jest tzw. odwrotna metoda Monte Carlo [7].

W odwrotnej metodzie Monte Carlo następuje zamiana miejsca generacji promieni. Promienie są generowane na płaszczyźnie powyżej promiennika. W prostej metodzie jest to płaszczyzna wyjściowa. Dzięki odwróceniu biegu promieni wyznaczenie punktów siatki jest prostsze. Przy takim podejściu istnieje również dogodna możliwość zwiększenia ilości punktów testowych siatki, poprzez wstawienie nowych między węzły już istniejące.

Symulacji odwrotnego biegu promieni pozwala na analizę promieniowania w trzech wymiarach. Poniżej zostaną omówione założenia metody dwuwymiarowej, ze względu na prostszą interpretację fizyczną. Metoda obliczeń w trzech wymiar jest liniowym rozwinięciem podejścia dwuwymiarowego. Na rys. 3 pokazano schematycznie bieg dwu promieni w jednym z segmentów struktury nacinanej.

Grube czerwone strzałki oznaczają promienie wychodzące z węzłów siatki punktów testowych. Szerokość strzałki jest proporcjonalna do ilości energii związanej z danym promieniem. Na rysunku tym zamieszczono dwa typowe promienie. Promień z indeksem i jest promieniem wchodzącym do wnęki a promień z indeksem j promieniem odbijającym się do powierzchni czolowej. Przyjmuje się, że po dotarciu do powierzchni promiennika część energii każdego z promieni jest absorbowana a część odbi-

jana. Kierunek odbicia jest wyznaczany losowo. W ogólności rozkład kątowy odbicia zależy od przyjętego modelu chropowatości powierzchni. Przy założeniu rozpraszania lambertowskiego jest to rozkład równomierny.



Rys. 3. Bieg promieni w jednym z segmentów struktury nacinanej
Fig. 3. Ray tracing in a single segment of the structure

Przy pierwszym odbiciu od powierzchni, odbija się i wraca promieniowanie o mocy określonej wzorem:

$$P_{j1} = (1 - \varepsilon) P_{i0}. \quad (1)$$

Współczynnik odbicia $(1 - \varepsilon)$ wynika z faktu, że powierzchnie emitujące promiennika są nieprzezroczyste oraz ich emisyjność nie jest funkcją długości fali – są to ciała szare o emisyjności ε . W przypadku promienia wchodzącego do wnęki następuje szereg odbić od powierzchni. Schemat postępowania jest taki sam. W kolejnych miejscach padania promienia następuje absorpcja i odbicie. Moc promieniowania odbita jest zgodna z zależnością (1) z tym, że uwzględniana jest aktualna moc padająca. Dla promienia wchodzącego do wnęki moc promienia opuszczającego wnękę wynosi:

$$P_{i5} = (1 - \varepsilon)^5 P_{i0}. \quad (2)$$

Jeśli uwzględnić tylko ten promień to emisyjność efektywna wynosi:

$$\varepsilon_{ef} = 1 - (1 - \varepsilon)^5. \quad (3)$$

Dla dwóch przykładowych promieni padających:

$$\varepsilon_{ef} = 1 - \frac{(1 - \varepsilon)^5 + (1 - \varepsilon)}{2}. \quad (4)$$

Zależności (3) i (4) są tylko przykładowe i pokazują sposób obliczania emisyjności. Obliczenia dla całego promiennika przy założeniu błędu nie większego niż 10% wymagają poprowadzenia, co najmniej 10^4 promieni.

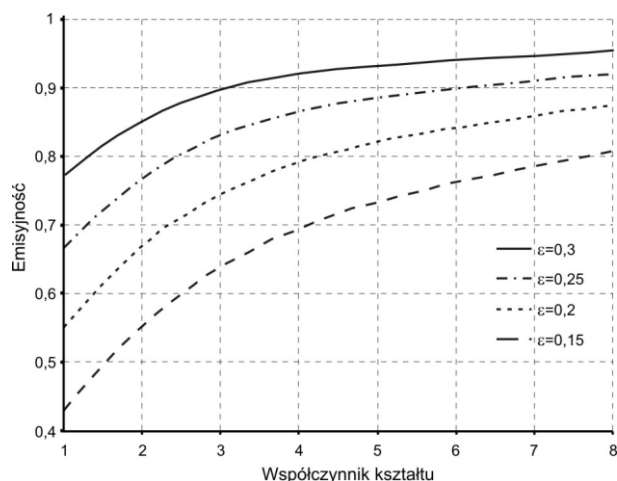
W celu wyznaczenia emisyjności należy poprowadzić dostatecznie dużą liczbę promieni. Liczba generowanych promieni określana jest przez użytkownika i wynika z oczekiwanej dokładności wyznaczenia emisyjności efektywnej. Brak jest prostej, analitycznej zależności między dokładnością obliczeń a liczbą wybranych promieni. Opracowany przez autorów program [5], oferuje możliwość obliczenia emisyjności struktury dla wybranych kształtów segmentu promiennika. W obliczeniach emisyjności efektywnej wykorzystywana jest zależność (5)

$$\varepsilon_{ef} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^I (1 - \varepsilon)^{N_i}}{I}. \quad (5)$$

gdzie:

I - liczba promieni testowych,
 N_i - liczba odbić dla promienia i

Rodzinę charakterystyk przedstawiającą zależność efektywnej emisyjności powierzchni promiennika, zawierającego regularną strukturę wnęk prostokątnych, od emisyjności powierzchni płaskiej, z której została ona wykonana przedstawia rys. 4, [5]. Zmianę emisyjności powierzchni płaskiej możemy dokonać dobierając odpowiednio materiał do wykonania takiego promiennika.



Rys. 4. Emisyjność efektywna struktury wnękowej dla wybranych emisyjności powierzchni płaskich

Fig. 4. Effective emissivity as a function of the emissivity of base material

4. Kontrast

Dla powierzchni metalicznych można przyjąć założenie, że ich emisyjność w ograniczonym przedziale widmowym, jest stała i nie zależy od długości fali promieniowania. Powierzchnia taka posiada cechy tzw. powierzchni szarej. Moc promieniowania pochodząca od fragmentu powierzchni składa się z promieniowania własnego i promieniowania otoczenia odbitego od tej powierzchni. Moc promieniowania własnego zależy od emisyjności ε_i i od jej temperatury T_s . Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana jest ona proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury wyrażonej w Kelwinach. Moc promieniowania odbitego od rozpatrywanej powierzchni jest proporcjonalna do współczynnika odbicia wynoszącego dla ciał nieprzezroczystych $(1-\varepsilon_i)$ oraz mocy promieniowania otoczenia odbitego od tej powierzchni. Moc ta wynika z prawa Stefana-Boltzmana dla ciała czarnego o temperaturze równej temperaturze otoczenia T_o . Ostatecznie moc promieniowania pochodząca od i -tej powierzchni wynosi:

$$P_i = \varepsilon_i \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon_i) \sigma T_o^4, \quad (6)$$

gdzie:

σ - stała Boltzmana.

Kontrast termiczny sąsiadujących ze sobą powierzchni, obserwowanych kamerą termowizyjną, jest proporcjonalny do różnicy mocy promieniowania docierającej do detektora od rozpatrywanej pary powierzchni i, j . W ogólności dla dowolnej pary i, j różnica ta wynosi:

$$\delta_{ij} = P_i - P_j = \sigma (\varepsilon_i - \varepsilon_j) (T_s^4 - T_o^4). \quad (7)$$

Przy stałych i różniących się od siebie wartościach emisyjności ε_i i ε_j znak kontrastu termicznego związany jest ze znakiem różnicy δ_{ij} - wzór (7) i zależy od temperatury testu oraz temperatury otoczenia. Przystrojenie na przykład temperatury testu pozwala uzyskać zmianę obserwowanego przez kamerę termowizyjną, kontrastu termicznego.

5. Wyniki eksperymentu

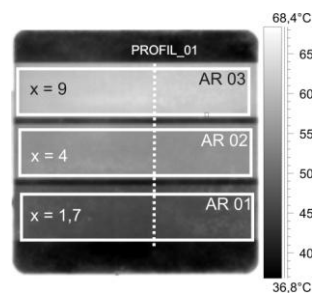
Dla sprawdzenia możliwości wytworzenia kontrastu termicznego oraz sterowania jego wartością, wykonano testowy promiennik z płyty duralowej o wymiarach 5x50x50 mm. Na powierzchni płyty wyznaczono trzy oddzielone od siebie prostokątne fragmenty (sektory) powierzchni AR01, AR02 i AR03 (rys 5). Na każdym z sektorów wykonano struktury wnękowe o współczynnikach kształtu x , odpowiednio $x=1,7$; $x=4$; oraz $x=9$. Powierzchnie te kształtowano w procesie elektroerozyjnego wycinania drutem WEDM (Wire Electro Discharge Machining) [8]. W ten sposób uzyskano trzy prostokątne sektory o zróżnicowanych wartościach efektywnej emisyjności.



Rys. 5. Płyta promiennika testowego

Fig. 5. Radiating surface of the proposed emitter

Weryfikację przewidywań teoretycznych wykonano dokonując zapisu sekwencji termogramów płytki promiennika testowego podgrzanej do temperatury istotnie wyższej od temperatury otoczenia. Rejestracje przeprowadzono dla temperatur z przedziału od 46°C do ok. 110°C. Pomiary dokonano kamerą termowizyjną *ThermaCAM P640*. Przykładowy termogram badanej płytki o temperaturze 75°C, mierzony metodą kontaktową czujnikiem termoparowym typu K, przedstawiono na rys. 6. Termogram przedstawia rozkład temperatur obserwowanych na powierzchni płytki promiennika, przedstawiony w odcieniach szarości (paleta *gray*). Aby dokonać ilościowej oceny tego rozkładu temperatury wykorzystano oprogramowanie *ThermaCAM Researcher Pro 2.9*.



Rys. 6. Termogram promiennika testowego

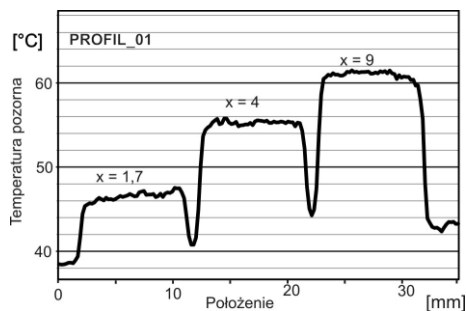
Fig. 6. Thermal image of the proposed emitter

W tym celu na powierzchni termogramu zaznaczono położenie prostokątnych obszarów AR01, AR02 oraz AR03 odpowiadających sektorom charakteryzującym się współczynnikami kształtu odpowiednio; $x=1,7$; $x=4$; $x=9$. Wzdłuż linii przerywanej PROFIL_01 przechodzącej przez te obszary wyznaczono profil temperatury pozornej, ustalony na powierzchni płytki - rys. 7.

Przykładowe wyniki analizy statystycznej, dla sektorów AR01, AR02 oraz AR03, wyznaczone z termogramu, przy pomocy programu *Termogram Researcher Pro 2.9*, zamieszczono w tabeli 1.

Wyznaczono wartość średnią temperatury T_{Avg} , odchylenie standardowe $Stdev$ oraz minimalne T_{Min} i maksymalne T_{Max} wartości temperatury radiacyjnej dla każdego z sektorów promiennika. Przy temperaturze promiennika 75°C, mierzonej metodą kontaktową, wartość średnia temperatury pozornej zmienia się od 46,1°C do 62,1°C. Aby ustalić zależność kontrastu termicznego

miedzy sektorami promiennika dokonano analogicznych pomiarów dla temperatury promiennika równej 46°C i 111°C.



Rys. 7. Profil temperatury pozornej na płytce promiennika testowego o temperaturze 75°C

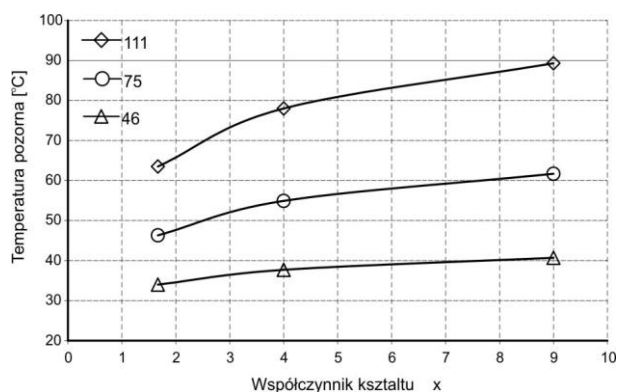
Fig. 7. Temperature profile across the surface at 75°C base temperature

Uzyskane przebiegi zmian obserwowanej temperatury pozornej od współczynnika kształtu przedstawiono na rys. 8. W każdym przypadku obserwuje się wzrost temperatury pozornej wraz ze wzrostem współczynnika kształtu. Przy wysokich wartościach współczynnika kształtu, emisyjność efektywna zbliża się do jedności. W takim przypadku obserwowana temperatura pozorna osiąga wartości bliskie wartościom mierzonym metodą stykową.

Tab. 1. Wyniki analizy termogramu promiennika testowego o temperaturze 75°C
Tab. 1. Analysis of emitter thermal image at 75°C base temperature

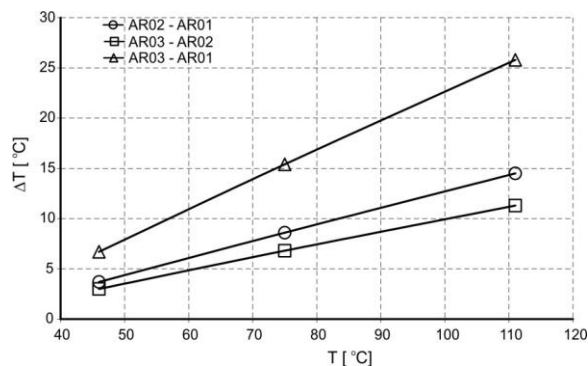
Parametr	T_{Min}	T_{Max}	T_{Avg}	Stdev
Sektor	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
AR01	44,4	49,4	46,1	0,6
AR02	52,8	56,9	54,9	0,5
AR03	58,5	64,3	62,1	0,8

Zmiana temperatury płytki promiennika prowadzi do zmiany obserwowanej różnicy temperatury pomiędzy powierzchniami sektorów AR01, AR02, AR03 – rys. 8.



Rys. 8. Zależność temperatury pozornej od temperatury promiennika
Fig. 8. Apparent temperature vs. base temperature

Na podstawie przedstawionych danych można wyznaczyć zależność różnic temperatury radiacyjnej pomiędzy sektorami płytki promiennika. W badanym zakresie temperatur zmiany te są liniowe, rys. 9. Na uwagę zasługuje fakt, że szybkość zmiany kontrastu ΔT na stopień zmiany temperatury płytki zależy od różnicy efektywnych emisyjności rys. 4., powierzchni promiennika.



Rys. 9. Zależność kontrastu termicznego powierzchni testowych od temperatury promiennika

Fig. 9. Thermal contrast between test surfaces vs. base temperature

6. Wnioski

Wykorzystując sektory promiennika testowego o względnie małych różnicach emisyjności możliwe jest analizowanie odpowiedzi badanych, obrazowych urządzeń termowizyjnych, na subtelne zmiany obserwowanej różnicy temperatury. Możliwa jest też sytuacja, gdy duże zmiany emisyjności wraz z dużymi zmianami temperatury promiennika i temperatury otoczenia wytwarzają duży kontrast termiczny często nieosiągalny ze względu na wymianę ciepła przez promieniowanie między płytą testu paskowego i ciałem czarnym, która zawsze występuje przy zastosowaniu klasycznych testów paskowych.

Odpowiednie dobranie temperatury testu umożliwia zmianę kontrastu termicznego pomiędzy poszczególnymi sektorami promiennika. Dla opisywanej konstrukcji promiennika testowego możliwe jest automatyczne ustawienie wymaganego kontrastu termicznego poprzez odpowiednie ustawienie temperatury testu względem temperatury otoczenia.

Przedstawione rozwiązanie umożliwia wykonanie promiennika również o innym rozkładzie zmian właściwości promiennych niż w standardowym teście. Możliwe jest wykonanie praktycznie dowolnego profilu temperatury na przykład liniowego lub schodkowego. Możliwości takie stwarza metoda precyzyjnego wykonywania nacięć o odpowiednim współczynnikiem kształtu. Urządzeniem sterowanym numerycznie.

7. Literatura

- [1] Holst G. C.: Testing and evaluation of infrared imaging systems, JCD Publishing Company 1993.
- [2] NATO STANAG no. 4349: Measurement of the minimum resolvable temperature difference (MRTD) of thermal camera. 1995.
- [3] Polakowski H., Piątkowski T., Dulski R., Trzaskawka P.: Segmentowy promiennik podczerwieni, zgłoszenie patentowe P. 392680, UP (2010).
- [4] Piątkowski T., Madura H., Chmielewski K.: Precyzyjne pomiary temperatury powierzchni metali pirometrem trzypasmowym, Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 234, s. 105-118, 2008.
- [5] Piątkowski T., Polakowski H., Sulej S., Zarański Z.: Zastosowanie struktur przestrzennych emiterów metalicznych do wytwarzania gradientowych promienników podczerwieni, 3rd International Scientific Conference with Expert Participation – MANUFACTURING 2010, 163.
- [6] Ballico M. J.: Modelling of the effective emissivity of a graphite tube black body, Metrologia, vol. 32, pp. 259-265, 1996.
- [7] Sapritsky V. I., Prokhorov A. V.: Spectral effective emissivities of nonisothermal cavities calculated by the Monte Carlo method, Applied Optics, vol. 34 No. 25, pp. 5645-6552, 1995.
- [8] Siwczyk M.: Obróbka elektroerozyjna, FN-T, Kraków 2000.