

Jarosław BAREŁA, Krzysztof FIRMANTY, Mariusz KASTEK, Henryk POLAKOWSKI
 WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA, INSTYTUT OPTOELEKTRONIKI, ul. Generała S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Precyzyjne ciało czarne z półprzewodnikowymi modułami termoelektrycznymi

Dr inż. Jarosław BAREŁA

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1997). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2004 w zakresie elektroniki - specjalność optoelektronika. Głównym obszarem jego pracy jest programowanie systemów mikroprocesorowych, projektowanie odbiorników promieniowania w zakresie podczerwieni, prowadzenie badań przyrządów noktowizyjnych i termowizyjnych. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 20 publikacji, w tym artykuły, referaty i wdrożenia.

e-mail: jbarela@wat.edu.pl



Dr inż. Mariusz KASTEK

Absolwent Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Od 1997 roku jest pracownikiem Wojskowej Akademii Technicznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2002. Zajmuje się pomiarami termowizyjnymi oraz problematyką detekcji obiektów w systemach czujników podczerwieni do systemów ochrony. Autor i współautor ponad 30 publikacji. Pracuje na stanowisku adiunkta-kierownika Zakładu Techniki Podczerwieni i Termowizji w Instytucie Optoelektroniki WAT.

e-mail: mkastek@wat.edu.pl



Dr inż. Krzysztof FIRMANTY

Absolwent Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w roku 2003 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 30 publikacji, w tym artykuły, referaty, patenty i wdrożenia.

e-mail: kfirmanty@wat.edu.pl



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



Streszczenie

Ciała czarne mają szerokie zastosowanie jako wzorcowe źródła promieniowania termicznego. Są stosowane we wszystkich systemach pomiarowych i kalibracyjnych urządzeń termowizyjnych. Ze względu na znaczną poprawę rozdzielczości termicznej i przestrzennej nowoczesnych pomiarowych i obserwacyjnych kamer termowizyjnych wzrosły wymagania na parametry ciał czarnych, które mogą być stosowane do testowania takich urządzeń. W artykule przedstawiono wymagania dotyczące parametrów ciał czarnych, matematyczny model ciała czarnego, podstawy algorytmów regulacji oraz wyniki pomiarów ciała czarnego wykonanego w Instytucie Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej.

Słowa kluczowe: ciała czarne, systemy termowizyjne, regulatory PID.

The accurate black body with Peltier modules

Abstract

Low temperature blackbodies are widely used as IR radiation standards. They are utilized in all measurement and calibration systems for thermal imaging devices. Significant improvement in both thermal and spatial resolutions of modern thermal cameras caused much higher requirements for blackbodies for the testing of such devices. In chapter one the requirements for low temperature blackbodies are outlined, to enable the testing of modern thermal cameras. Chapter two presents the mathematical model of a blackbody, with particular emphasis put on energy conversions in the device. In chapter three the shortened algorithm is presented for the control of a blackbody. The construction of a blackbody control unit designed at Institute of Optoelectronics, MUT is described in chapter four. The description contains the design guidelines for such a devices that require precise temperature regulation and stabilization. Chapter five contains the results of test measurements for the designed low temperature blackbody and control unit. The measurements were performed using FLIR Silver SC5600-M thermal camera and DP251 temperature meter by OMEGA. Summary of the test results is presented in chapter six.

Keywords: thermo vision system, black body, PID regulator.

1. Wstęp

Za ciało czarne uważa się urządzenie, które emituje maksymalną moc promieniowania, jaka może być emitowana przez ciało

znajdujące się w określonej temperaturze. Ciała czarne są głównym elementem systemów pomiarowych służących do wyznaczenia podstawowych parametrów urządzeń termowizyjnych. Powinny one mieć parametry umożliwiające wyznaczenie parametrów współczesnych urządzeń pomiarowych (np. kamer termowizyjnych). Współczesne wzorce promieniowania powinny charakteryzować się następującymi parametrami:

- zakres stabilizowanej temperatury absolutnej $+5\text{ °C} \div +70\text{ °C}$,
- zakres stabilizowanej temperatury różnicowej $\pm 10\text{ °C}$,
- stabilność krótkookresowa temperatury lepsza niż $\pm 0,002\text{ K}$,
- stabilność długookresowa temperatury lepsza niż $\pm 0,01\text{ K}$,
- jednorodność powierzchni $\pm 0,005\text{ K}$ (przy $|\Delta T| < 5\text{ °C}$),
- możliwie wysoka emisyjność.

Wielkość powierzchni emisyjnej jest uzależniona od rodzaju parametrów, które chcemy wyznaczać. Ponieważ takie źródła promieniowania muszą umożliwiać zarówno pracę powyżej jak i poniżej temperatury otoczenia dlatego elementem wykonawczym jest w nich półprzewodnikowy termoelement (moduł Peltiera).

2. Model matematyczny ciała czarnego

Wyznaczenie modelu matematycznego powierzchni promiennika ciała czarnego polega na określeniu związków występujących podczas zamiany mocy elektrycznej dostarczonej do promiennika, a mocą termiczną wypromieniowaną przez promiennik z uwzględnieniem wszystkich zjawisk występujących podczas tego procesu.

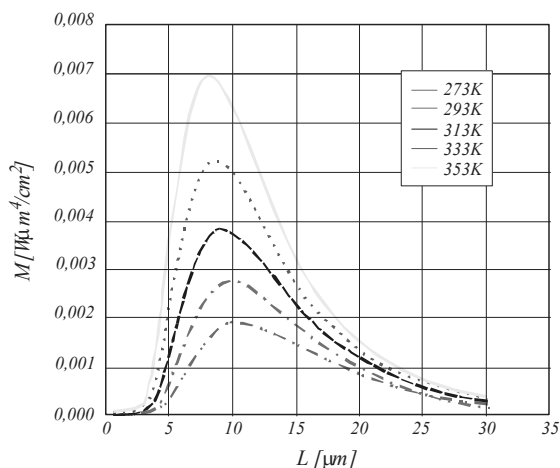
Wyznaczenie modelu przebiegało w dwóch etapach. W pierwszym wyznaczono zależność mocy emitowanego promieniowania od temperatury promiennika; w drugim zależność temperatury promiennika od mocy elektrycznej dostarczonej do modułu termoelektrycznego. Na podstawie wyznaczonych zależności możliwe jest wyznaczenie rozkładu widmowego emitowanego promieniowania przy danym poziomie dostarczonej mocy elektrycznej.

Wszystkie ciała, których temperatura bezwzględna jest większa od zera bezwzględnego wysyłają promieniowanie cieplne (termiczne). Wartość mocy emitowanego promieniowania, zgodnie z prawem Plancka, wynosi

$$M_{bb}(T, \lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (1)$$

gdzie: $c_1=3,741 \cdot 10^4 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{cm}^2$, $c_2=1,438 \cdot 10^4 \mu\text{mK}$, $k=1,3808 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Przykłady rozkładów widmowych emitancji ciała czarnego dla temperatur z zakresu 273÷353 K (krzywe Plancka) przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykłady rozkładów widmowych emitancji ciała czarnego w zakresie temperatur 273÷353 K

Fig. 1. Sample spectral emittance distribution over black body surface in the temperature range 273÷353 K

Ze względu na to, że emisyjność wytworzonego ciała czarnego jest mniejsza od jedności, moc emitowana przez to ciało dla danej długości fali będzie również mniejsza od przedstawionej na rysunku 1.

Drugi etap jest nazywany często modelem dynamicznym ciała czarnego. Jako że ciało czarne jest sterowane przez mikrokontroler (sterowanie odbywa się w dyskretnych odcinkach czasu), przyjęto dyskretny model transmitancyjny.

$$G(z) = \frac{T(z)}{u(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (2)$$

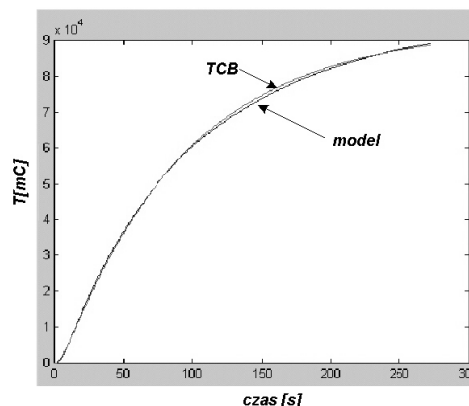
gdzie: $T(z)$ - temperatura promiennika, $u(z)$ - poziom sterujący, z^{-1} - operator opóźnienia, $a_0 \div a_n$, $b_0 \div b_n$ - współczynniki wielomianu.

Identyfikacja zaproponowanego modelu dyskretnego obiektu sprowadza się do wyznaczenia współczynników $a_0 \div a_n$, $b_0 \div b_n$ w równaniu (2).

Praktyczne wyznaczenie modelu ciała czarnego polegało na pobudzeniu go maksymalnym wymuszeniem, a następnie rejestrowaniu zmian temperatury. Zarejestrowane wartości temperatury i wymuszeń zaimportowano do oprogramowania Identification Tools z pakietu Matlab. W celu wyznaczenia modelu ciała należy określić okres próbkowania. Musi on być co najmniej o rząd wielkości mniejszy od najmniejszej stałej czasowej obiektu. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów przyjęto stałą próbkowania T_s równą 0,6 s. Dla takiej stałej czasowej wyznaczono model ciała czarnego jako:

$$G(z) = \frac{-0,0038z + 0,0115}{1,000z^2 + 1,5013z + 0,5135} \quad (3)$$

W celu weryfikacji modelu dokonano porównania zachowania uzyskanego w opracowanym modelu i zachowania się rzeczywistego ciała czarnego, a wyniki symulacji przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Porównanie odpowiedzi skokowej ciała czarnego z odpowiedzią skokową modelu

Fig. 2. The comparison between real and calculated step response

Kolejnym elementem modelu matematycznego jest wyznaczenie bilansu energetycznego modułu termoelektrycznego. Dokładną analizę bilansu energetycznego można znaleźć w literaturze [1-5]. Klasyczne rozwiązanie, przydatne do obliczeń inżynierskich przyjmuje postać [8]:

$$Q = \alpha T_{\text{gor}} I + \frac{1}{2} I^2 R - k(T_{\text{gor}} - T_z) \quad (4)$$

$$Q_0 = \alpha T_z I - \frac{1}{2} I^2 R - k(T_{\text{gor}} - T_z) \quad (5)$$

gdzie: Q - moc cieplna, W, Q_0 - wydajność chłodnicza, W, α - współczynnik siły termoelektrycznej, $\mu\text{V/K}$, k - współczynnik przenikania ciepła, $\text{W/m}^2\text{K}$, I - prąd, A, R - opór elektryczny, Ω , T_{gor} - temperatura strony gorącej modułu termoelektrycznego, T_z - temperatura strony zimnej modułu termoelektrycznego.

3. Algorytm stabilizacji temperatury

Ze względu na wymaganą dużą dokładność stabilizacji temperatury algorytm stabilizacji powinien umożliwiać precyzyjną regulację mocy dostarczanej do modułu termoelektrycznego. Powinien on uwzględniać zarówno specyfikę modułu termoelektrycznego jak i wahania temperatury zewnętrznej oraz proces starzenia się elementów konstrukcyjnych modułu termoelektrycznego. Z powyższych względów optymalnym rozwiązaniem jest cyfrowy stabilizator typu PID. Regulator PID jest najbardziej uniwersalnym typem regulatora pozwalającym na regulację parametrów obiektów o różnych charakterystykach. Model ciągłego regulatora PID można zapisać w postaci:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

gdzie: $u(t)$ - sygnał sterujący t , $e(t)$ - uchyb regulacji w chwili t , K_p - współczynnik wzmocnienia części proporcjonalnej, T_i - czas zdwojenia, T_d - czas wyprzedzenia.

Aby uzyskać cyfrowy regulator PID należy zastąpić działanie całkowania i różniczkowania różnicami skończonymi. Uzyskamy wówczas ogólną postać cyfrowego algorytmu regulacji PID w postaci:

$$u(n) = K_p \cdot \left([e(n) + \frac{T_p}{T_i} \cdot \sum e(n-1) + \frac{T_d}{T_p} \cdot (e(n) - e(n-1))] \right) \quad (7)$$

gdzie: $e(n)$ – uchyb w n -tym okresie próbkowania, T_p – czas próbkowania.

Istnieją dwa typy algorytmów regulacji w sterowaniu DDC (ang. Digital Direct Control): pozycyjna i przyrostowa. Na podstawie doświadczenia zdobytego przy praktycznych implementacjach algorytmów wybrano algorytm przyrostowy. Układ próbkowania sygnału wyjściowego obiektu regulacji na podstawie sygnału $y(t)$ wyznacza ciąg wartości dyskretnych $y(k)$. Algorytm regulacji na podstawie ciągów wartości dyskretnych uchybu regulacji $e(k)$ określa ciąg dyskretnych wartości sygnału sterującego $u(k)$. Na wyjściu regulatora cyfrowego znajduje się układ ekstrapolacji, który na podstawie tego ciągu wartości dyskretnych wypracowuje sygnał sterujący obiektu $u(t)$ dla każdej chwili czasu t . Po przekształceniu, dla zastosowanej aproksymacji trapezoidalnej, przyrostowy cyfrowy algorytm PID, będzie miał postać:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = q_0 \cdot e(k) + q_1 \cdot e(k-1) + q_2 \cdot e(k-2)$$

gdzie: $q_0 = K_p \left(1 + \frac{T_p}{T_i} + \frac{T_d}{T_p} \right);$

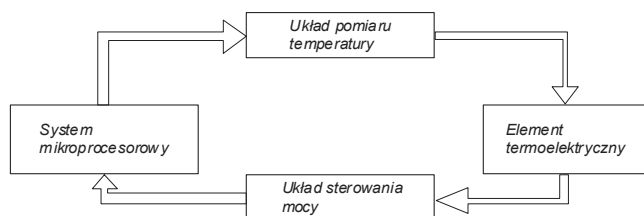
$$q_1 = -K_p \left(1 + 2 \frac{T_d}{T_p} - \frac{T_p}{2T_i} \right); \quad (8)$$

$$q_2 = K_p \frac{T_d}{T_p}$$

Sposób wyznaczenia wartości nastaw K_p , T_d , T_i szeroko opisany jest w literaturze [1-7].

4. System regulacji i kontroli temperatury powierzchni ciała czarnego

System regulacji i kontroli temperatury składa się z czterech zasadniczych bloków: modułu Peltiera (element termoelektryczny), układu pomiaru temperatury, układu sterującego mocą elektryczną dostarczaną do termoelementu, systemu mikroprocesorowego.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu regulacji i kontroli temperatury
Fig. 3. Block diagram of temperature control unit

Układ pomiaru temperatury ma za zadanie z dużą dokładnością pomierzyć temperaturę promiennika podczerwieni, otoczenia oraz drugiej strony modułu Peltiera. Temperatury te są niezbędne do wyznaczenia wszystkich parametrów koniecznych do układu regulacji. Ponieważ stabilność długookresowa temperatury powinna być lepsza niż $\pm 0,01$ K, to układ musi zapewniać pomiar temperatury z taką dokładnością. Uzyskuje się to stosując najlepsze czujniki temperaturowe, (kalibrowane PT100 klasy A), oraz algorytmy korekcyjne eliminujące szумы i poprawiające dokładność pomiaru temperatury.

Ponieważ elementem sterowanym jest termoelement (moduł Peltiera), najlepszą efektywność grzania lub chłodzenia uzyskujemy, gdy jest on zasilany napięciem optymalnym. Jest to możliwe tylko wówczas, gdy będziemy sterować czasem przepływu prądu przez termoelement, a nie napięciem zasilania. Dlatego do sterowania jego pracą wykorzystano regulatory PWM. W celu zapewnienia przepływu prądu w dwóch kierunkach przez termoelement regulator pracuje w układzie mostkowym zbudowanym z elementów przełączających. Czas przepływu prądu przez termo-

element jest wyliczany na podstawie wartości zmierzonych temperatur, parametrów kalibracyjnych, oraz parametrów termoelementu.

Całością pracy steruje układ mikroprocesorowy. Ma on za zadanie:

- sterowanie pracą przetwornika A/C,
- sterowanie stopniem wyjściowym mocy,
- wyliczanie parametrów sterujących stopniem wyjściowym mocy,
- wysyłanie i odbieranie danych do/z komputera,
- obsługa klawiatury,
- obsługa wyświetlacza LCD,
- odczyt parametrów kalibrujących z pamięci FLASH.

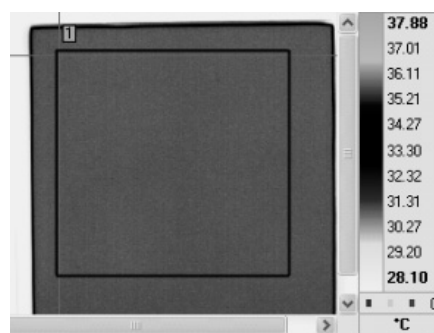
5. Wyniki pomiaru parametrów ciała czarnego

Wykonane powierzchniowe źródło podczerwieni zostało poddane badaniom, których celem było określenie jego stabilności oraz równomierności rozkładu temperatury na jego powierzchni. Pomiary przeprowadzono z użyciem pomiarowej kamery termowizyjnej typ Silver-SC5600-M firmy FLIR, która umożliwia przeprowadzenie rejestracji termogramów z częstotliwością 200 Hz oraz dokładnego miernika temperatury DP251 firmy OMEGA (rozdzielczość $0,001^\circ\text{C}$). Krótki czas rejestracji jest istotny przy określaniu krótkoczasowej stabilności powierzchniowego źródła podczerwieni.

Pomiary zostały przeprowadzone w dwóch cyklach pomiarowych: pierwszy dotyczył szybkości osiągnięcia zadanej temperatury, drugi cykl pozwolił określić parametry stabilności temperatury powierzchniowego źródła podczerwieni.

Pierwsza część przeprowadzonych pomiarów dotyczyła określenia parametrów czasowych zmiany temperatury źródła przy zmianie temperatury zadanej o $\Delta T = 5^\circ\text{C}$. W celu określenia czasu potrzebnego do osiągnięcia zadanej temperatury przeprowadzono 10 pomiarów dla trzech wartości temperatury początkowej T_p .

Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1. Parametr \bar{T}_K oznacza temperaturę końcową uśrednioną natomiast \bar{t} oznacza uśredniony czas osiągnięcia zadanej temperatury dla 10 kolejnych pomiarów. Czas osiągnięcia zadanej temperatury przy ustalonej $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ dla trzech wartości temperatury początkowej wynosił około 60 s.

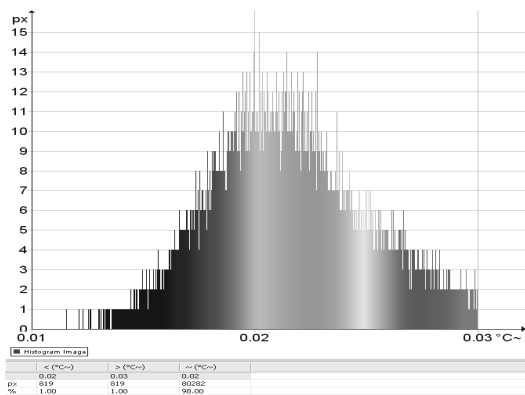


Rys. 4. Termogram powierzchni ciała czarnego o temperaturze 35°C
Fig. 4. Thermal image of a blackbody at 35°C

Tab. 1. Wyniki pomiarów parametrów czasowych powierzchniowego źródła promieniowania

Tab. 1. Time measurement results of the surface radiation Skurce

Temperatura początkowa T_p , $^\circ\text{C}$	Zmiana ΔT , $^\circ\text{C}$	Średnia temperatura końcowa \bar{T}_K , $^\circ\text{C}$	Średni czas \bar{t} , s
30	5	35,01	57,7
35	5	40,01	62,1
40	5	45,00	65,2

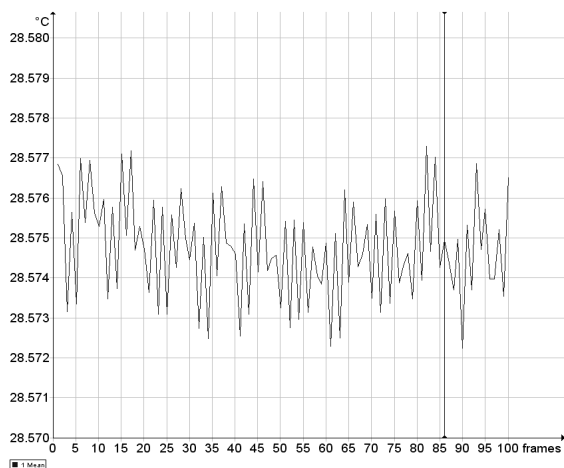


Rys. 5. Histogram rozkładu odchylenia standardowego temperatury na powierzchni ciała czarnego

Fig. 5. Standard deviation histogram of temperature over a black body surface

Dla każdego pomiaru wykonano rejestracje ciągłe, z których wybrano po kilka termogramów do określenia jednorodności rozkładu temperatury na powierzchni źródła. Jednorodność rozkładu temperatury na każdym zarejestrowanym termogramie określono przez analizę wybranych fragmentów powierzchni źródła w postaci dwóch kwadratów 10 cm x 10 cm przesuniętych w stosunku do siebie tak, aby różnica pomiędzy udziałem powierzchni jednego w stosunku do drugiego kwadratu wynosiła 30%. Następnie korzystając z programu do analizy termogramów wyznaczono wartości statystyczne opisujące jednorodność rozkładu temperatury na powierzchni:

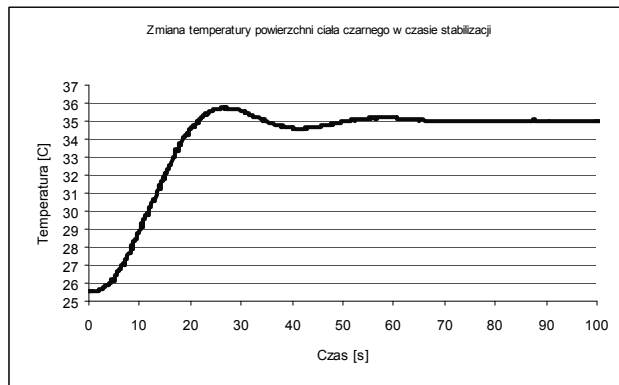
- temperatura minimalna T_{\min} ,
- temperatura maksymalna T_{\max} ,
- różnica temperatur $T_{\max} - T_{\min}$,
- wartość średnia temperatury \bar{T} ,
- odchylenie standardowe δT .



Rys. 6. Zmiana średniej temperatury na powierzchni ciała czarnego po ustabilizowaniu temperatury

Fig. 6. Fluctuations of mean temperature value at stabilized temperature

Wartości parametrów statystycznych określone były dla każdego wybranego kwadratu i porównywane ze sobą. W ten sposób oceniono jednorodność rozkładu temperatury na powierzchni źródła podczas dochodzenia do zadanej temperatury. Na rys. 7 przedstawiono przykładowe analizy rozkładu temperatury w czasie na powierzchni źródła. Podczas wszystkich rejestracji dla danych przedstawionych w tabeli 1 obliczono wartości statystyczne wymienione powyżej, dla każdej ustalonej powierzchni kwadratów porównawczych. Na podstawie analizy tych danych można określić jednorodność rozkładu temperatury na powierzchni źródła podczerwieni podczas procesu osiągnięcia zadanej temperatury. Z przeprowadzonych analiz matematycznych wynika, że jednorodność wynosi $0,015 \pm 0,022^\circ\text{C}$ po osiągnięciu zadanej temperatury.



Rys. 7. Zmiana temperatury powierzchni ciała czarnego w czasie stabilizacji

Fig. 7. Temperature change during stabilization process

6. Podsumowanie

Ciała czarne muszą posiadać parametry umożliwiające wiarygodny pomiar parametrów współczesnych urządzeń termowizyjnych. Wprowadza się więc coraz to nowe rozwiązania techniczne ciał czarnych oraz coraz bardziej skomplikowane algorytmy stabilizacji. Aby zapewnić wymaganą stabilizację, współczesne algorytmy stabilizacji muszą uwzględniać zarówno zmiany temperatury otoczenia jak i wymianę ciepła między promiennikiem a otoczeniem oraz radiatorom a otoczeniem.



Rys. 8. Ciała czarne wraz ze sterownikiem

Fig. 8. The black body and control unit

Przeprowadzone badania wykazały, że zaprojektowane i wykonane ciało czarne posiada parametry zbliżone do parametrów ciał czarnych oferowanych przez najlepszych producentów pomiarowego sprzętu termowizyjnego (SBIR, CI System).

7. Literatura

- [1] Michalski L., Kuźmiński K., Sadowski J.: Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych, WNT, Warszawa 1991.
- [2] Misztal H.: Sposób doboru stałej całkowania regulatorów PID dla stanu rozruchu, PAK 8/1992, s.184-185.
- [3] Mucai T.W.: Algorytm sterowania zastosowany w regulatorze Efronik Xs, typ U 496 PAK 3/1997, s.86-87.
- [4] Skoczkowski S.: Technika regulacji temperatury., PWP „No problems”, Warszawa 2000.
- [5] Stefański T.: Teoria sterowania cz. I, cz II, WPS Kielce 1996.
- [6] Astrom K.J., Hagglung: The Future of PID control. Control Engineering Practice 9 (2001).
- [7] Skoczkowski S., Osypiuk R., Pietruszewicz K.: Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody”, PWN Warszawa 2006.
- [8] Filin S.: Termoelektryczne urządzenia chłodnicze. IPPU Mastra Gdańsk 2002.