

Stanisław GALLA, Alicja KONCZAKOWSKAPOLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI, KATEDRA METROLOGII I OPTOELEKTRONIKI
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk**Zastosowanie termografii w diagnostyce i badaniach urządzeń elektronicznych****Dr inż. Stanisław GALLA**

Reprezentuje dyscyplinę elektronika, specjalność konstrukcja aparatury elektronicznej. Obszar zainteresowań: pomiary i badania EMC, konstrukcja aparatury i systemów do pomiarów EMC. Współautor jest zatrudniony na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, w Katedrze Metrologii i Optoelektroniki na stanowisku adiunkta.

e-mail: galla@eti.pg.gda.pl**Prof. dr hab. inż. Alicja KONCZAKOWSKA**

Reprezentuje dyscyplinę elektronika, specjalność miernictwo elektroniczne. Obszar zainteresowań: mechanizmy powstawania, analiza i pomiary szumów elementów elektronicznych oraz zakłóceń m.c.z., konstrukcja mierników i systemów do pomiarów szumów własnych elementów elektronicznych, ocena powiązań szumów z zakresu m.c.z. elementów elektronicznych z ich jakością i niezawodnością. Jest autorką i współautorką ponad 200 publikacji, w tym 4 monografii.

e-mail: alkon@eti.pg.gda.pl**Streszczenie**

Zaproponowano zastosowanie techniki termowizyjnej do oceny poprawności konstrukcji i działania urządzeń elektronicznych. Technika termowizyjną zastosowano do badania elementów ochronnych zasilacza AC/DC w czasie standardowych badań odporności na udary oraz do badania modułów GSM pracujących pod kontrolą nadrzędnego programu sterującego i płyty głównej centrali systemu przeciwpożarowego. Pomiary termowizyjne zastosowano do oceny przyrostu temperatury ww. urządzeń.

Słowa kluczowe: termowizja, odporność, diagnostyka, EMC.**Application of infrared thermography to diagnosis and testing of electronic equipment****Abstract**

In the paper there is proposed use of infrared thermography for assessing the validity of construction and operation of electronic devices. The most important advantages of this technique are the short time of studies and the ability of direct evaluation of results. It was found that for electronic devices it was appropriate to record infrared imagings in various states of their operation. Comparison of temperature increments from different states of operation enables validation of constructions from the heat discharge point of view. Investigations were performed for AC/DC power supplies, a GSM module, and the motherboard of a fire-fighting system using the camera VIGOCam v50. For AC/DC power supplies (Fig. 1) it was proposed to record infrared imagings during the surge immunity test (the standard EN 61000-4-5) in order to evaluate the quality of protective elements, varistors. From the imaging of the power supply immediately after the first surge (Fig. 2b) it was possible to evaluate the temperature increment on the varistor. It was stated that the accepted temperature increments on the varistor could be equal up to 30°C. The research results for the GSM module (Fig. 3) and the motherboard of the fire-fighting system (Figs. 4 and 5) are presented as imagings of the devices operating in a standby regime and with a full power. The areas with increased emission were identified. It was found that infrared thermography is very useful in the assessment of temperature distributions.

Keywords: thermography, immunity, diagnostic, EMC.**1. Wprowadzenie**

Weryfikacja jakości i poprawności działania urządzenia elektronicznego jest bardzo ważną procedurą badań wykonywaną przed wprowadzeniem danego urządzenia do sprzedaży. Jednym z podstawowych testów wykonywanych w ramach kontroli charakterystyk kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń jest badanie odporności na udary, wg normy EN 61000-4-5 [1]. Niejednokrotnie w ramach tego badania występują trwałe uszkodzenia badanego urządzenia, a szczególnie narażone są elementy ochronne. W czasie testu może dochodzić do znacznego obciążenia tych elementów, a nawet do ich zniszczenia [2]. Poprawność

dooboru elementów ochronnych można sprawdzić techniką termowizyjną.

W zakresie widma podczerwonego elementy lub urządzenia poddane znacznym przeciążeniom są wyraźnie widoczne. Z obrazów termowizyjnych można oszacować ich temperatury lub w wyniku badań porównawczych, przyrosty temperatury. W przypadku urządzeń cyfrowych o rozbudowanej funkcjonalności, zależnej od oprogramowania, można określić pracujące części urządzenia, związane z programowym załączaniem/wyłączaniem poszczególnych części układów.

2. Założenia podstawowe pomiarów termowizyjnych

Każde ciało o temperaturze powyżej 0 K (-273,15°C) wypromieniowuje energię. Temperatura obserwowanego obiektu (ciała doskonale czarnego) wyznaczana jest na podstawie prawa Stefana-Boltzmannia:

$$E = k_0 \cdot T^4 \quad (1)$$

gdzie:

E - moc emisyjna ciała czarnego,
 k_0 - stała Stefana-Boltzmannia $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,
 T - temperatura.

Z wzoru (1) wynika, że temperatura jest ściśle związana z mocą emisyjną danego obiektu, a tym samym i charakteryzującym go współczynnikiem emisyjności (jest to parametr mówiący ile razy promieniowanie ciała rzeczywistego jest mniejsze od promieniowania ciała doskonale czarnego). Emisyjność badanych obiektów jest funkcją temperatury, a badany obiekt jest z reguły charakteryzowany rozkładem temperatury na jego powierzchni.

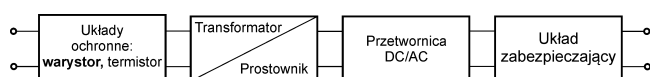
Wykonywanie pomiarów termowizyjnych urządzeń w zakresie widma podczerwonego (pasmo $0,75 \mu\text{m} < \lambda < 10^3 \mu\text{m}$, w zależności od długości fali λ [2, 3, 4]) wymaga uwzględnienia różnorodnych uwarunkowań zewnętrznych związanych zarówno z parametrami obserwowanego urządzenia, jak i ze środowiskiem w jakim wykonuje się pomiary (temperaturą, rozkładem temperatury, wilgotnością, odległością od obserwowanego urządzenia). Jednym z głównych parametrów, wpływającym znacząco na pomiary, jest współczynnik emisyjności badanego urządzenia. Przed wykonaniem pomiarów należałoby określić współczynnik emisyjności danego urządzenia, który zależy od wielu czynników, przede wszystkim od temperatury, od zastosowanych w konstrukcji materiałów i sposobu obróbki ich powierzchni zewnętrznej. Kamera termowizyjna również nie jest idealna i w dokładnych pomiarach konieczne jest uwzględnienie poprawek związanych z jej optyką i warunkami atmosferycznymi występującymi w czasie pomiarów [3, 4, 5, 6].

Kamera termowizyjna umożliwia pomiar rozkładu temperatur obserwowanych obiektów metodą bezkontaktową. Dokładne pomiary temperatury za pomocą metod bezstykowych nie są możliwe dla obiektów charakteryzujących się niejednorodnymi współczynnikami emisyjności. Elementy elektroniczne charakteryzują się bardzo dużą gamą kolorów, różnorodną fakturą obudowy i to w obrębie każdego elementu elektronicznego, których na obserwowanych płytkach z połączeniami drukowanymi jest zazwyczaj bardzo dużo. Dlatego też, w przypadku obserwacji elementów elektronicznych, a tym bardziej całych urządzeń elektronicznych, celowa jest ocena przyrostów temperatury badanego obiektu, co zaproponowano w pracy [7]. Wskazane jest więc wykonanie obserwacji w dwóch różnych stanach pracy urządzenia elektronicznego.

3. Przebieg badań

Badania przeprowadzono dla zasilaczy AC/DC (w celu oceny warunków pracy elementów ochronnych) oraz modułów GSM i płyty głównej centrali systemu przeciwpożarowego (w celu oceny warunków pracy całych urządzeń). Temperatura otoczenia w czasie prowadzonych badań była równa 23°C.

W zasilaczach AC/DC elementem, który obserwowano na tele całego układu był warystor umieszczony na wejściu zasilacza, jako element ochronny (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy zasilacza AC/DC
Fig. 1. Block diagram of the AC/DC power supply

Pomiary obrazów badanych elementów i urządzeń w zakresie widma podczerwonego wykonano kamerą termowizyjną typu VIGOCam v50, której podstawowe parametry podano w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe parametry kamery VIGOCam v50 [8]
Tab. 1. Typical data of the camera of type VIGOCam v50 [8]

Parametr	Wartość/Opis funkcji
Typ detektora	niechłodzona macierz bolometryczna (FPA)
Zakres spektralny	8 – 14 μm
Rozdzielczość obrazu	• 320 x 240 pikseli (60 ramek/s) • 384 x 288 pikseli (30 ramek/s)
Rozdzielczość termiczna	$\leq 0,065^\circ\text{C}$ (dla temperatury 30°C)
Zakresy pomiarowe	• zakres 1: – 20°C do 120°C • zakres 2: – 10°C do 400°C
Pole widzenia	15° x 11° (obiektów 35 mm) 9° x 7° (obiektów 60 mm)
Błąd bezwzględny	$\pm 2^\circ\text{C}$ lub $\pm 2\%$ zakresu pomiarowego
Korekcja	• korekcja temperatury otoczenia, • korekcja emisyjności, • korekcja wpływu atmosfery, uwzględniająca odległość od obiektu, temperaturę i wilgotność atmosfery
Obraz wizyjny	zapis obrazów na karcie SD, wbudowanej pamięci FLASH

Wszystkie zarejestrowane w czasie badań obrazy termowizyjne przedstawiono na rysunkach w odwróconej kolorystyce czarno-białej, tzn. im wyższa jest temperatura rejestrowana, tym obiekt na obrazie termograficznym jest ciemniejszy.

3.1. Badania zasilaczy AC/DC

W czasie przeprowadzania standardowego testu odporności na udary, wykonanego zgodnie z normą EN 61000-4-5 [1], zarejestrowano w określonych momentach czasu obrazy termowizyjne zasilacza. Do generacji udarów zastosowano generator UCS500N, który został połączony za pomocą wewnętrznej sieci sprzęgającej, o impedancji obwodu na poziomie 2 Ω (dla sprzężeń L – N) oraz 12 Ω (dla sprzężeń L – PE, N – PE). Udry testowe, o wartości 1 kV, były podawane seriami po 5 udarów o polaryzacji dodatniej i 5 udarów o polaryzacji ujemnej, a czas pomiędzy kolejnymi seriami wynosił 20 sekund. Liczba serii udarów podawanych między linie L-N, zgodnie z normą, była równa 10. Obrazy termowizyjne zasilaczy rejestrowano obiektywem 60 mm z odległości 1,25 m. Zdjęcia badanego zasilacza wykonywano co 5 sekund.

3.2. Moduły GSM i centrala systemu przeciwpożarowego

Badania modułu GSM i centrali systemu przeciwpożarowego przeprowadzono w dwóch stanach pracy: podczas stanu spoczynku oraz przy pełnej mocy nadawczej. Obrazy termowizyjne rejestrowano obiektywem 35 mm z odległości 0,75 m.

4. Wyniki pomiarów

4.1. Termografia w badaniach odporności na udary zasilaczy AC/AD

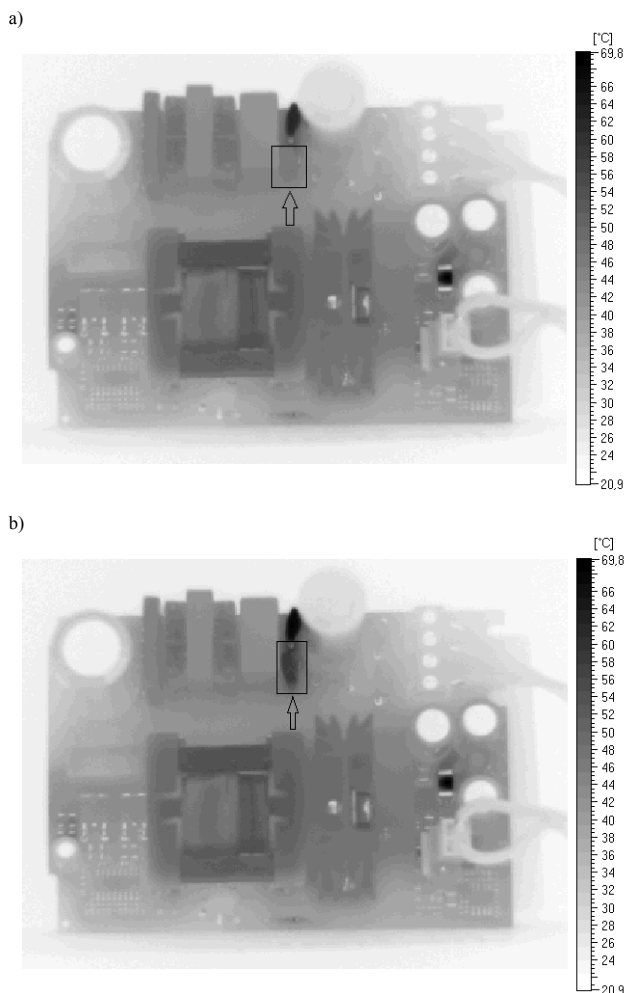
Celem przeprowadzonych badań była ocena pracy elementu ochronnego, warystora, w zasilaczu AC/DC, oraz oszacowanie maksymalnego przyrostu temperatury na warystorze, który nie będzie powodował jego uszkodzenia.

Na rys. 2a przedstawiono obraz termowizyjny zasilacza AC/DC, pracującego przy pełnym obciążeniu (3 A/18 V), zarejestrowany przed podaniem udaru testowego. Prostokątem i strzałką zaznaczono pozycję elementu ochronnego, warystora, umieszczonego pomiędzy liniami zasilania L–N.

Natomiast na rys. 2b przedstawiono obraz zarejestrowany bezpośrednio po podaniu udaru, przez impedancję sprzężenia 2 Ω , o wartości 1 kV, pierwszego w serii pomiarowej. Pole prostokąta zaznaczonego na rys. 1b (warystor ochronny) jest ciemniejsze, niż odpowiadające mu pole na rys. 2a. Oszacowano, że przyrost temperatury na warystorze ochronnym jest rzędu 10°C. Natomiast na pozostałych obszarach zasilacza nie widać zmian temperatury, w stosunku do obszarów z rys. 2a, które byłyby widoczne jako ciemniejsze pola. Po dalszych udarach, zarejestrowano przyrosty temperatury w zaznaczonym prostokącie rzędu 20°C.

Przeprowadzono również badanie niszczące zasilacza AC/AD podając serię udarów o wartości 1 kV i zmniejszając czas pomiędzy udarami z 20 do 10 sekund, a także zwiększając normatywną liczbę udarów. Zniszczenie warystora nastąpiło po 36 udarze (zarejestrowany przyrost temperatury na warystorze wynosił ponad 45°C).

Na podstawie wszystkich przeprowadzonych badań zasilaczy AC/DC stwierdzono, że jeżeli w trakcie standardowych badań odporności na udary, przyrost temperatury na warystorze ochronnym będzie rzędu 30°C, to należy zasilacz poddać szczegółowym badaniom w celu wykrycia powodu nieprawidłowego przyrostu temperatury na warystorze. W tym przypadku zasilacz nie może zostać zakwalifikowany jako poprawnie działający i przekazany do sprzedaży.



Rys. 2. Obrazy termowizyjne zasilacza AC/DC a) przed podaniem udarów, b) bezpośrednio po podaniu pierwszego udaru
 Fig. 2. Imagings of the power supply AC/AD in the infrared frequency range a) before the surge, b) immediately after the first surge

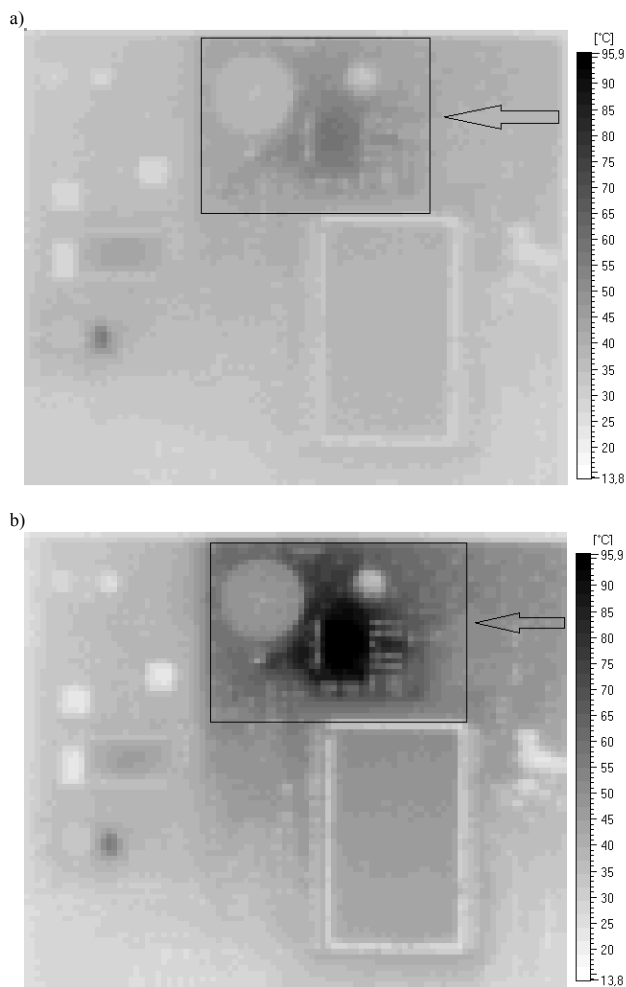
4.2. Termografia w badaniach weryfikacyjnych stanu pracy urządzenia

Celem przeprowadzonych badań, obejmujących moduł GSM pracujący pod kontrolą nadrzędnego programu sterującego oraz płytę główną centrali systemu przeciwpożarowego, było oszacowanie przyrostów temperatury i określenie obszarów o największych przeciążeniach temperaturowych badanych urządzeń.

Dla modułu GSM oszacowano przyrosty temperatury na podstawie obserwacji modułów w dwóch stanach pracy: podczas oczekiwania na połączenie (stan spoczynku, rys. 3a) oraz w stanie połączenia modułu GSM (rys. 3b) przy pełnej mocy nadawania (2 W mocy dostarczanej do anteny).

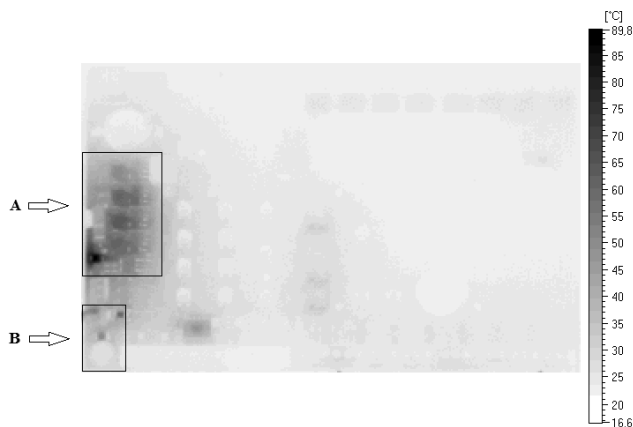
Na zarejestrowanych obrazach termowizyjnych zaznaczono prostokątem obszar modułu, w którym zaobserwowano wyraźny przyrost temperatury. W tym obszarze zaprojektowany został zasilacz modułu.

Obraz termowizyjny na rys. 3b został zarejestrowany po 3 minutach pracy modułu z pełną mocą. Porównując oba obrazy termowizyjne wyraźnie widać różnicę w poziomie czerni w obszarze, który zajmuje zasilacz na rys. 3b, a zarejestrowany przyrost temperatury zasilacza wynosił około 42°C. Analizując wyniki przeprowadzonych badań, projektanci modułu GSM doszli do wniosku, że układ zasilacza został nieprawidłowo zaprojektowany i tak wykonany moduł GSM nie będzie działał prawidłowo. Konieczne jest zaprojektowanie modułu w taki sposób, żeby przyrost temperatury przy pełnym obciążeniu był mniejszy od 25°C.



Rys. 3. Obrazy termowizyjne modułu GSM, a) w czasie oczekiwania na połączenie, b) w trakcie pracy przy pełnej mocy nadawania
 Fig. 3. Imagings of the GSM unit in the infrared frequency range, a) standby regime, b) during working with full power

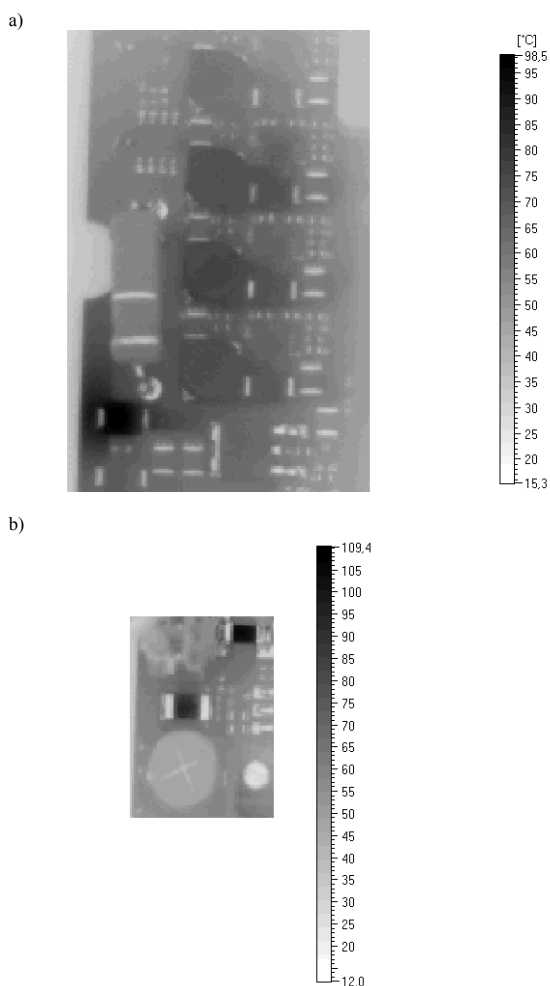
Celem badań płyty głównej centrali systemu przeciwpożarowego było oszacowanie rozkładu temperatur i określenie obszarów o największych przeciążeniach temperaturowych. Na rys. 4 przedstawiono zarejestrowany obraz termowizyjny płyty głównej centrali systemu przeciwpożarowego podczas wykonywania tzw. testu obciążenia, symulującego długotrwałą pracę centrali w warunkach obciążenia znamionowego.



Rys. 4. Obraz termowizyjny płyty głównej centrali systemu przeciwpożarowego
 Fig. 4. Imaging of the motherboard of a fire-fighting system in the infrared frequency range

Na zarejestrowanym obrazie termowizyjnym widoczne są wyraźnie obszary o lokalnie zwiększonej temperaturze, które oznaczono symbolami A i B. Na rys. 5a przedstawiono powiększenie obszaru A, a na rys. 5b powiększenie obszaru B. Wyraźnie na termogramach zawierających obszary A i B, można rozpoznać najbardziej obciążone elementy takie jak: diody, cewki, przetwornice zasilające, rezystor pomiarowy i bezpiecznik wielokrotny. Oszacowane wartości temperatury na najbardziej obciążonych elementach były rzędu 90°C i 100°C. Rzeczywiste wartości temperatury w tych obszarach mogą być jednak inne, gdyż nie oszacowano współczynników emisyjności poszczególnych elementów. Jednakże temperatury w obszarach zaznaczonych jako A i B, są wyraźnie wyższe od temperatury pozostałych części centrali, a różnica może być nawet rzędu 50°C.

Z obrazu przedstawionego na rys. 5a wynika, że przetwornice nie są tak samo obciążone, przetwornica pierwsza od góry ma niższą temperaturę, niż pozostałe, o około 10°C.



Rys. 5. Obrazy termowizyjne płyty głównej centrali systemu przeciwpożarowego o zwiększonej emisji termicznej, a) zespół przetwornic, b) rezystor pomiarowy

Fig. 5. Images of the motherboard of a fire-fighting system in the infrared frequency range with increased thermal emission a) the DC converters unit, b) the measuring resistor

Analiza warunków pracy przetwornic powinna umożliwić wyjaśnienie tej sytuacji. Konieczne jest zaprojektowanie płyty głównej centrali systemu przeciwpożarowego w taki sposób, aby pokazane powyżej obszary nie wykazywały tak dużych przeciążeń.

5. Wnioski

Przedstawione przykłady oceny rozkładu temperatur, a dokładniej przyrostu temperatur, pokazują możliwości zastosowania

techniki termograficznej w procesie badania konstrukcji elektronicznych. Oczywiście koszt zakupu nowoczesnej kamery termograficznej jest nadal stosunkowo wysoki, jednakże efekty oceny konstrukcji są istotne.

Za nowatorską należy uznać propozycję rejestracji obrazów termowizyjnych w czasie standardowego testu odporności na udary, co zaprezentowano na przykładzie zasilacza AC/DC [2]. Na podstawie badań stwierdzono, że istnieje możliwość przerwania testu odporności na udary w przypadku znacznego zbliżenia się do granic wytrzymałości danego układu bez powodowania jego uszkodzenia oraz możliwość oszacowania jakości warystora na podstawie przyrostu temperatury w kolejnych seriach pomiarowych. Wymaga to jednak od personelu wykonującego badania termowizyjne znajomości zachowania się poszczególnych elementów elektronicznych w warunkach nietypowych (typowe zachowanie elementów przedstawiono w pracy [7]).

Badania urządzeń pracujących pod kontrolą nadrzędnego programu sterującego, mające na celu określenie stanu pracy tego urządzenia, czasami mogą być utrudnione, jeżeli program działa nieprawidłowo. Takich nieprawidłowości nie zauważono w czasie przeprowadzonych dla modułu GSM, sterowanego programowo.

Należy podkreślić, że obrazowanie termiczne umożliwia ocenę konstrukcji na etapie prototypu pozwalając na weryfikację przed przeprowadzeniem długotrwałych badań w krytycznych warunkach środowiskowych, tzw. badań trwałości. Rejestrowane obrazy termowizyjne wskazują jednoznacznie, które z komponentów danego układu są nadmiernie obciążone, jak również umożliwiają ocenę rozkładu i przyrostów temperatur w czasie kolejnych etapów badania. Jednakże podczas prowadzonych prac należy z ostrożnością podchodzić do uzyskanych obrazów termowizyjnych, jako wzorców wartości temperatur. Wynika to z ograniczeń uniemożliwiających ustalenie dokładnych parametrów emisyjności danej powierzchni składającej się z wielu różnorodnych elementów elektronicznych. Bardziej celowe jest skoncentrowanie się na oszacowaniu przyrostów temperatury w obserwowanym obszarze.

Biorąc pod uwagę fakt, że pomiary temperatury badanych obiektów są obciążone raczej dużą niepewnością pomiarów, tak jak w niniejszym artykule, w dalszych badaniach przewidywana jest analiza przyrostów temperatury w czasie badania urządzeń pracujących pod kontrolą nadrzędnego programu sterującego i bez sterowaniu programowego.

6. Literatura

- [1] EN 61000-4-5: 2006, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test.
- [2] Galla S.: Wykorzystanie termowizji w badaniach odporności. Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, Nr 2/2012, s. 36-38.
- [3] Vavilov V.P.: Basics of Infrared Thermography. Conference "Quantitative Infra Red Thermography – QIRT'1998, Łódź, 7-10 Sept. 1998.
- [4] Chrzanowski K.: Non-contact thermometry – Measurement errors. Wydawnictwo SPIE (Society of Photooptical Instrumentation Engineers) – Oddział w Polsce, Warszawa 2000.
- [5] Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J.: Termometria – przyrządy i metody. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998.
- [6] Minkina W., Rutkowski P., Wild W.: Podstawy pomiarów termowizyjnych. Część I – istota termowizji i historia jej rozwoju. Część II – współczesne rozwiązania systemów termowizyjnych, błędy metody. Pomiary Automatyka Kontrola, 46/ 2000, Nr 1, s. 7-14.
- [7] Hulewicz A.: Kamera termowizyjna w diagnostyce urządzeń elektronicznych. Elektronika, Nr 7/2012, s.107-110.
- [8] www.vigo.com.pl/

otrzymano / received: 21.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013

artykuł recenzowany / revised paper