

Arkadiusz HULEWICZ*

DIAGNOSTYKA TERMOWIZYJNA W ELEKTROTECHNICE

Tematyka artykułu dotyczy badań związanych z pomiarami termowizyjnymi i ich wykorzystaniem w diagnostyce urządzeń elektronicznych. W dobie wzrastającej liczby urządzeń elektronicznych ważną rolę odgrywa wczesne zdiagnozowanie nieprawidłowości ich pracy. Ponieważ uszkodzenia elementów często są poprzedzone wzrostem temperatury, skutecznym sposobem ich diagnozowania jest wykorzystanie kamery termowizyjnej. W artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia obejmujące pomiary termowizyjne, zwrócono uwagę na występujące źródła błędów w pomiarach kamerami termowizyjnymi oraz zaprezentowano zastosowaną aparaturę pomiarową. Dla trzech wybranych kamer termowizyjnych przeprowadzono badania porównawcze, prezentujące wpływ czynników zakłócających na poprawność wyniku pomiaru. Zaprezentowano również możliwości diagnostyczne opisanych kamer oraz wyniki pomiarów termowizyjnych dla wybranych elementów elektronicznych.

SŁOWA KLUCZOWE: kamera termowizyjna, współczynnik emisyjności, promieniowanie podczerwone

1. WSTĘP

Intensywny rozwój technologiczny i związana z nią wzrastająca liczba urządzeń elektronicznych i energetycznych wymusiła konieczność cyklicznego monitorowania prawidłowości ich działania. Jedną z metod skutecznie wykorzystywaną we wczesnym diagnozowaniu pracy elementów elektronicznych i energetycznych są badania termowizyjne. Umożliwiają one wczesne zlokalizowanie elementów, które mogą ulec uszkodzeniu, co pozwala uniknąć awarii całego urządzenia oraz zminimalizować koszty naprawy. Zaproponowana przez autora diagnostyka termowizyjna okazała się skuteczną metodą, ponieważ uszkodzenia elementów często poprzedzone są wzrostem temperatury. Dodatkowo, w porównaniu do innych metod pomiaru temperatury, termowizja umożliwia diagnostykę urządzeń podczas pracy.

Termowizja jest metodą badawczą, która pozwala w sposób zdalny i bezdotykowy ocenić rozkład temperatury na powierzchni badanego obiektu. Wartość

* Politechnika Poznańska.

zmierzonej temperatury ocenia się na podstawie obserwacji promieniowania podczerwonego emitowanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego [1–3]. Zarejestrowane kamerą termowizyjną promieniowanie podczerwone przekształcane jest na światło widzialne o mocy zależnej od temperatury badanego ciała oraz innych parametrów. W obrazie kamery termowizyjnej obiekty o określonej temperaturze przyjmują przypisaną im barwę i tworzą w ten sposób mapę rozkładu temperatury na powierzchni badanego ciała.

Postęp, jaki nastąpił w technologii półprzewodnikowej oraz optyce podczerwieni umożliwił rozwój termowizji, w związku z czym zwiększyła się dokładność i czułość kamer, a także obniżyła się ich cena. Pozwoliło to na wykorzystanie kamer w wielu dziedzinach nauki (współcześnie termowizja znajduje zastosowanie w przemyśle, budownictwie, energetyce, elektronice, medycynie oraz ratownictwie morskim i górskim) [1, 4].

Emitowane przez ciało promieniowanie podczerwone charakteryzuje się różną mocą, zależną od jego temperatury. Pomiar oraz rejestracja tego promieniowania przeprowadzona dla urządzeń elektronicznych i energetycznych umożliwia ocenę rozkładu temperatury oraz zmian jej wartości w czasie. Pozwala to odpowiednio wcześniej zdiagnozować ewentualne zagrożenia, które mogą wystąpić w terminie późniejszym oraz interweniować, aby uniknąć niespodziewanych awarii i związanych z tym postojów. Możliwość diagnostyki urządzenia podczas pracy, przy pełnym obciążeniu (niemożliwe w przypadku innych metod) czyni termowizję bardzo praktyczną i wyjątkową metodą, pozwalającą na ocenę stanu urządzenia. W artykule przedstawiono przykładowe wyniki badań przeprowadzonych na wybranych elementach elektronicznych pracujących w nominalnych warunkach pracy oraz przy przekroczeniu parametrów granicznych. Zwrócono również uwagę na najważniejsze źródła błędów, jakie występują podczas pomiaru kamerami termowizyjnymi oraz przeprowadzono badania porównawcze dla trzech wybranych kamer termowizyjnych, które pozwoliły określić, jaki wpływ mają te zakłócenia na dokładność pomiaru.

2. POMIARY TERMOWIZYJNE

Termowizja jest metodą pomiarową pozwalającą bezdotykowo ocenić rozkład temperatury na powierzchni badanego ciała. Podstawą tych pomiarów jest promieniowanie podczerwone emitowane przez obiekt, o falach dłuższych od promieniowania widzialnego, ale nieprzekraczających 1000 μm . Emisja promieniowania umożliwia ocenę rozkładu temperatury na obiekcie, bez ingerencji w jego wnętrze, co znacznie ułatwia i skraca czas pomiarów [3]. Termowizja jest więc metodą całkowicie bezinwazyjną, szybką (wynik badania dostępny jest natychmiast) oraz umożliwia zobrazowanie temperatury na powierzchni

całego badanego obiektu (histogramy, wykresy). Wymaga jednak dużych nakładów związanych z zakupem kamery termowizyjnej oraz umiejętności obsługi, gdyż wykonanie prawidłowego zdjęcia termowizyjnego jest trudne i wymaga specjalistycznej wiedzy.

Podczas wykonywania pomiarów termowizyjnych istotna jest wartość współczynnika emisyjności ε badanego obiektu, odległość obiektywu kamery od tego obiektu, wartość współczynnika przepuszczalności atmosfery oraz kąt obserwacji α . Emisyjność ε charakteryzuje właściwości promienne ciał rzeczywistych i zależy od parametrów fizyko-chemicznych (stan fizyczny powierzchni, temperatura oraz skład chemiczny) [5]. W większości przypadków parametr ten jest charakterystyczny i niepowtarzalny dla danego obiektu, jego duża wartość ułatwia pomiar temperatury kamerą termowizyjną, natomiast wartość bliska zeru świadczy o utrudnieniach. Podczas pomiaru wartość emisyjności badanego obiektu powinna być znana i ustawiona w parametrach kamery.

Dokładność pomiaru kamerą termowizyjną zależy również od kąta obserwacji α oraz odległości od obiektu l . Przekroczenie granicznej wartości kąta obserwacji wprowadza do wyniku pomiaru błąd o nieznannej wartości, znacznie przekraczającej wartość błędu określonego przez producenta [5]. Zwiększająca się odległość badanego obiektu od kamery również zwiększa błąd pomiaru, gdyż zmniejsza się gęstość mocy promieniowania docierającego do detektora. Efektem tych zmian jest zmniejszenie wartości sygnału wyjściowego detektora.

Wpływ na dokładność pomiarów termowizyjnych mają również panujące warunki atmosferyczne, gdyż detektory zastosowane w większości kamer termowizyjnych reagują na docierające do ich powierzchni promieniowanie. W związku z tym, podczas pomiarów należy zwracać uwagę na warunki atmosferyczne, gdyż mgła, deszcz, nasłonecznienie oraz powierzchnie odbijające wpływają na dokładność pomiarów termowizyjnych.

Poza wymienionymi parametrami, na dokładność pomiarów termowizyjnych mają również wpływ czynniki związane z samą kamerą i jej budową. Kamery termowizyjne i ich parametry często uzależnione są od przeznaczenia (obserwacyjne lub pomiarowe) i różnią się między sobą przede wszystkim oprogramowaniem, wyposażeniem oraz ceną. Budowa kamery termowizyjnej jest natomiast niezmienna i w jej skład wchodzi: matryca detektorów promieniowania podczerwonego wraz z układem chłodzenia, obiektyw dostosowany do pracy w zakresie podczerwieni, tor wzmocnienia i odczytu sygnału oraz układy rejestracji, analizy i wizualizacji obrazu.

Detektor podczerwieni jest przetwornikiem energii promieniowania podczerwonego na inną wielkość fizyczną (prąd, napięcie, rezystancję lub ładunek elektryczny). Jego rozdzielczość wpływa na dokładność pomiaru, gdyż im jest ona większa, tym obraz uzyskany podczas pomiaru jest ostrzejszy i wyraźniejszy. Niska rozdzielczość detektora nie pozwoli uzyskać dobrej jakości obrazu. Z rozdzielczością detektora często łączona jest rozdzielczość termiczna, która

określa zdolność do rozróżniania zmian wartości temperatury w obrazie termowizyjnym [6].

Poza wspomnianym detektorem ważnym elementem kamery termowizyjnej jest obiektyw, którego zadaniem jest zebranie oraz skupienie na powierzchni detektora promieniowania emitowanego przez obiekt. Dodatkowo, poprawia on stosunek sygnału do szumu poprzez dobór odpowiedniej przepuszczalności widmowej obiektywu (elementy optyczne obiektywu muszą charakteryzować się wysoką przepuszczalnością w zakresie pracy kamery oraz małą poza tym zakresem) [3]. Detektory kamer mogą być pojedyncze, linijkowe oraz tworzące matrycę detektorów. Pod względem zasady działania detektory można podzielić na termiczne i fotonowe. Detektory termiczne działają na zasadzie absorpcji promieniowania padającego na powierzchnię detektora, w wyniku czego następuje zmiana temperatury detektora, prowadząca do zmian właściwości elektrycznych lub optycznych. Detektory fotonowe wykorzystują koncentrację nośników ładunku w materiale półprzewodnikowym, która zmienia jego rezystancję lub natężenie płynącego prądu [2].

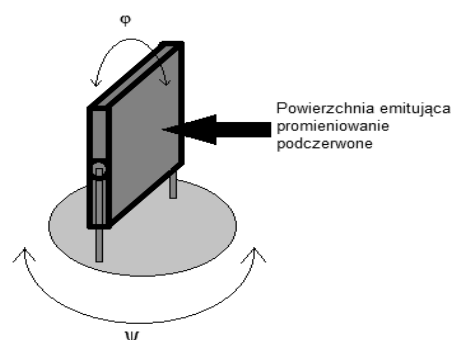
3. DIAGNOSTYKA TERMOWIZYJNA

Współcześnie, termowizja ma zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, w tym również w elektronice. Wykorzystywana jest ona w trakcie badań laboratoryjnych oraz podczas kontroli urządzeń elektronicznych i energetycznych [7, 8], umożliwiając ocenę jakości chłodzenia elementów oraz ich prawidłowego doboru, ocenę wydzielanej mocy strat, a także lokalizację uszkodzonych podzespołów oraz połączeń.

Podczas prawidłowej pracy urządzeń elektronicznych i energetycznych temperatura przyjmuje ustaloną i niezmienną wartość, którą można monitorować z wykorzystaniem zdjęć termowizyjnych. W wyniku uszkodzenia określonego elementu lub wystąpienia usterki na styku, przez który przepływa prąd o dużym natężeniu następuje wzrost temperatury, który może być zdiagnozowany na podstawie obrazu termicznego z kamery. Poprawne zdiagnozowanie takich uszkodzeń jest możliwe tylko przy prawidłowej interpretacji zdjęć termowizyjnych, podczas której należy zwrócić uwagę na emisyjność, współczynnik odbicia, kąt obserwacji oraz odległość od badanego obiektu. W związku z tym badania termowizyjne są szczególnie często wykorzystywane w badaniach porównawczych, w których badany element porównywany jest z działającym poprawnie [9, 10].

W artykule zaprezentowano wyniki badań termowizyjnych przeprowadzonych dla diody LED i układu scalonego UCA6400 pracujących w warunkach znamionowych oraz granicznych. Przedstawiono również termogramy przykładowego urządzenia energetycznego oraz wpływ czynników zakłócających na

wynik pomiaru dla trzech wybranych kamer, rejestrujących obiekt (promiennik podczerwieni) o znanej temperaturze (rys. 1). Wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie zakresów temperatury prawidłowej oraz nieprawidłowej pracy elementów oraz ocenę przy jakich czynnikach zakłócających wynik pomiaru obarczony jest najmniejszym błędem.



Rys. 1. Promiennik podczerwieni

4. KAMERY TERMOWIZYJNE

Podczas opisanych w artykule badań wykorzystano dwie kamery firmy FLIR (ThermaCAM E25 i ThermaCAM E50) oraz kamerę termowizyjną VigoCam V50 firmy VIGO. Kamera ThermaCAM E25 (rys. 2) wyposażona jest w niechłodzony detektor mikrobolometryczny o rozdzielczości 160x120 pikseli i czułości 0,2 °C (200 mK). Posiada pamięć wewnętrzną umożliwiającą rejestrację do 100 obrazów, a zakres temperaturowy wynosi od -20 °C do +250 °C.



Rys. 2. Kamera FLIR ThermaCam E25 [11]

Kamera FLIR E50 (rys. 3) wyposażona jest w detektor mikrobolometryczny o rozdzielczości 240x180 pikseli. Zakres temperaturowy wynosi od -20 °C do +650 °C, a zastosowany akumulator pozwala wykonywać pomiary przez czas czterech godzin.



Rys. 3. Kamera FLIR E50 [12]

Kamera termowizyjna VigoCam V50 (rys. 4) wyposażona została detektor mikrobolometryczny o rozdzielczości 384x288 pikseli, przy zakresie temperaturowym podzielonym na podzakres od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ oraz podzakres od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Została ona wyposażona w 3.5 calowy wyświetlacz LCD, wskaźnik laserowy oraz kamerę video. Zastosowane podzespoły gwarantują dużą rozdzielczość termiczną ($0,065\text{ }^{\circ}\text{C}$) oraz przestrzenną ($0,7\text{ mrad}$).

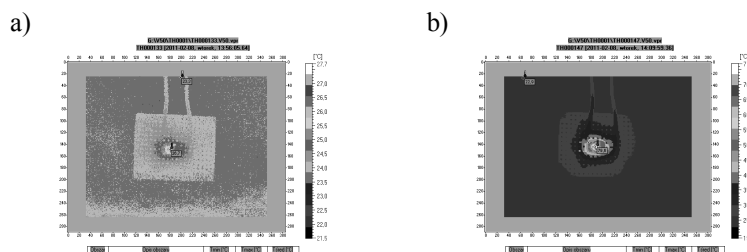


Rys. 4. Kamera VigoCam V50 [13]

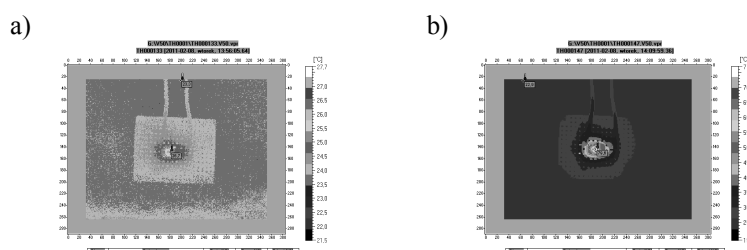
4. WYNIKI BADAŃ

Podczas badań elementów elektronicznych obciążono je prądem znamionowym oraz prądem przekraczającym parametry graniczne. Analizując zmiany temperatury diody LED, przez którą przepływał zadany prąd można zauważyć, że w stosunku do prądu znamionowego 10 mA (rys. 5a) jego dziesięciokrotny wzrost (do 100 mA) spowodował zmianę temperatury z $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $79,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 5b) [14].

Podobne wyniki uzyskano dla zdjęć termowizyjnych układu scalonego UCA6400, który przy obciążeniu prądem 25 mA pracuje poprawnie, a zarejestrowana temperatura wynosi $25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 6a). Dla prądu o wartości 70 mA (prądu, przy którym nastąpiło uszkodzenie) układ osiąga temperaturę $79,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rys. 6b) [14].

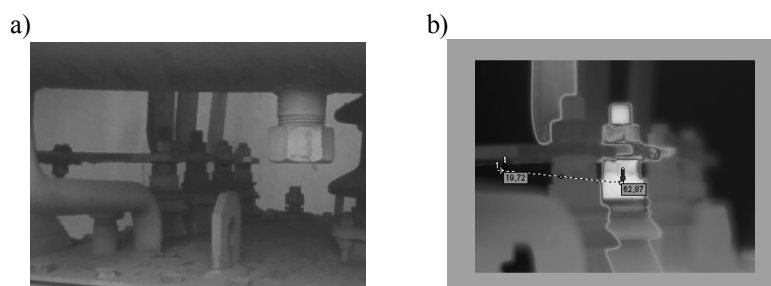


Rys. 5. Wyniki badań dla diody LED [14]



Rys. 6. Wyniki badań dla układu scalonego UCA6400 [14]

W podobny sposób można przeprowadzić diagnostykę urządzeń energetycznych. Przykładowy obraz wykonany kamerą VigoCam V50 przedstawia termogram (rys. 7b) oraz zdjęcie (rys. 7a) transformatora o podwyższonej temperaturze na jednym z zacisków po stronie nN.



Rys. 7. Zdjęcie (a) oraz termogram (b) transformatora

Jak już wspomniano zaprezentowane wyniki badań mają charakter porównawczy i polegają na odniesieniu zarejestrowanych aktualnie obrazów termowizyjnych urządzenia do obrazów zarejestrowanych podczas jego prawidłowej pracy (obrazów wzorcowych). Bezpośredni odczyt temperatury może być obarczony dużym błędem spowodowanym wymienionymi w artykule czynnikami zakłócającymi.

Tabela 1. Zależność temperatury T od odległości l kamera termowizyjna – promiennik, dla kąta $\psi = 0^\circ$ oraz współczynnika emisyjności $\varepsilon = 0,94$

l [m]	FLIR E25	FLIR E50	Vigo V50
	T [°C]	T [°C]	T [°C]
0,5	103,0	115	102,1
1,0	102,0	114	101,1
1,5	102,0	114	99,9
2,0	101,0	113	99,7
2,5	102,5	113	99,7
3,0	100,0	113	99,3
3,5	100,5	113	98,2
4,0	100,5	113	98,0
4,5	100,0	112	97,8
5,0	100,5	111	97,7

Tabela 2. Zależność temperatury T od kąta ψ , dla odległości $l = 1$ m oraz współczynnika emisyjności $\varepsilon = 0,94$

ψ [°]	FLIR E25	FLIR E50	Vigo V50
	T [°C]	T [°C]	T [°C]
0	103,5	114	100,4
10	103,5	114	99,8
20	104,5	115	99,5
30	104,0	115	99,5
40	104,0	113	99,5
50	104,0	113	98,2
60	100,5	113	97,6
70	98,5	110	95,6
80	94,0	101	87,0

W celu określenia wpływu tych czynników badaniu poddano trzy kamery, za pomocą których określano znaną temperaturę promiennika podczerwieni przy różnych odległościach, kątach oraz ustawionych w kamerze wartościach współczynnika emisyjności. Zgodnie z zaleceniami, podczas pomiarów określających wpływ odległości i kąta wartość ustawionego w kamerze współczynnika emisyjności wynosiła 0,94, (wartość emisyjności powierzchni czynnej promienni-

ka). Pomiary przeprowadzono przy braku oświetlenia oraz zasłoniętych oknach. Temperatura otoczenia wynosiła 24,5 °C, a badanego promiennika 114 °C. Kąt zmieniany był w poziomie od 0° do 90°, a odległość w zakresie od 0,5 m do 5 m. Wyniki uzyskane podczas pomiarów przedstawiono w tabelach 1–3.

Tabela 3. Zależność temperatury T od współczynnika emisyjności ε dla odległości $l = 1$ m oraz kąta $\psi = 0^\circ$

ε [-]	FLIR E25	FLIR E50	Vigo V50
	T [°C]	T [°C]	T [°C]
0,1	–	480	356,9
0,2	–	307	240,6
0,3	209,0	235	190,5
0,4	175,5	197	162,1
0,5	150,5	170	140,9
0,6	134,0	151	126,1
0,7	123,5	136	115,5
0,8	113,0	125	104,9
0,9	106,0	116	100,1
1	98,5	110	93,0

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z pomiarami termowizyjnymi, ich wykorzystaniem w diagnozowaniu urządzeń elektronicznych i energetycznych oraz czynnikami wpływającymi na dokładność pomiaru. Przeprowadzone badania pozwalają stworzyć bazę obrazów termowizyjnych, na podstawie których możliwa jest poprawna interpretacja termicznego rozkładu diagnozowanych urządzeń. Pomimo, że pomiary termowizyjne należą do badań nieinwazyjnych, to w przypadku diagnozowania urządzeń niezbędny jest demontaż ich obudowy, w przeciwnym wypadku przeprowadzenie właściwej interpretacji zdjęć termowizyjnych jest niemożliwe.

Opisana w artykule metoda umożliwia wczesne zdiagnozowanie pojawiających się uszkodzeń, co pozwala na uniknięcie usterki lub odpowiednio wczesne zlokalizowanie istniejącej już usterki. Działanie takie pozwala uniknąć uszkodzenia całego urządzenia oraz obniżyć koszty związane z naprawą. Zasadniczą wadą przedstawionej metody jest cena kamer termowizyjnych oraz wpływ czynników zakłócających na wynik pomiaru temperatury. W związku z tym

konieczne jest ich uwzględnienie lub odniesienie aktualnych pomiarów do wspomnianej bazy obrazów termowizyjnych.

Przeprowadzone badania porównawcze pozwalają stwierdzić, że dla każdej z trzech kamer wynik pomiaru temperatury był poprawny dla kąta ψ mniejszego od 50° , przy czym tylko dla jednej kamery wynik ten był zbliżony do temperatury promiennika. Podobne zależności są zauważalne przy zmianach odległości kamera – promiennik podczerwieni, podczas których wskazania są najbardziej zbliżone do zadanej temperatury przy odległości nie większej niż 1,5 m. Po przekroczeniu tej odległości wynik pomiaru przyjmuje niższe wartości, przy czym zmiany te są niewielkie. Największy wpływ na wynik pomiaru zauważalny jest przy niewłaściwym doborze współczynnika emisyjności.

Reasumując można stwierdzić, że termowizja znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach życia. Diagnostyka termowizyjna zapewnia utrzymanie odpowiedniego stanu technicznego urządzeń elektronicznych i energetycznych, ich ciągłej kontroli oraz pozwala uniknąć wysokich kosztów związanych z usunięciem ewentualnej usterki. Jednak, aby to zapewnić konieczne jest wykonanie dalszych pomiarów, które pozwolą stworzyć kolejne obrazy wzorcowe oraz umożliwią dobór właściwego współczynnika emisyjności, co zagwarantuje poprawną ocenę uzyskiwanych obrazów termowizyjnych.

LITERATURA

- [1] Rudkowski G.: Termowizja i jej zastosowanie, WKiŁ, Warszawa, 1978.
- [2] Więcek B., De Mey G.: Termowizja w podczerwieni, podstawy i zastosowania, Wydawnictwo PAK, Warszawa, 2011.
- [3] Minkina W.: Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2004.
- [4] Madura H.: Pomiary termowizyjne w praktyce, Wydawnictwo PAK, Warszawa, 2004.
- [5] Wiczyński G., Litwa M.: Wpływ kąta obserwacji na wynik pomiaru temperatury kamerą termowizyjną, Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania, nr 6, 2008, s. 147–148.
- [6] <http://www.izolacje.com.pl/artukul/id1391,kamery-termowizyjne-do-badania-stanu-izolacji> 25.01.2017.
- [7] Sebok M., Gutten M., Kucera M.: Diagnostics of electric equipments by means of thermovision, Przegląd elektrotechniczny, nr 10, 2011, s. 313–317.
- [8] Szydłowski, K.: Diagnostyka stanu urządzeń elektroenergetycznych metodą termografii, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 3, 2005, s. 36–38.
- [9] Adamczewski W.: Zastosowania termowizji w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych w budynkach mieszkalnych, przemysłowych, biurowych i użyteczności publicznej, Elektroinstalator, nr 10, 2008, s. 2–4.
- [10] Minkina W., Dudzik S.: Infrared thermography: errors and uncertainties, John Wiley & Sons, Chichester 2009.
- [11] <http://www.tequipment.net/FlirB2.html> 25.01.2017.

- [12] <http://www.ivytools.com/FLIR-E50-Infrared-Thermal-Imaging-Camera-p/flir-e50.html> 25.01.2017.
- [13] <http://www.vigo.com.pl/produkty/kamery-termowizyjne/Materialy-Archiwalne/vigocam-v5> 25.01.2017.
- [14] Bernatowicz J.: Termowizja w diagnostyce urządzeń elektronicznych. Praca inżynierska wykonana pod kierunkiem dr. inż. Arkadiusza Hulewicza, Politechnika Poznańska, Poznań 2011.

THE INFRARED DIAGNOSTICS IN THE ELECTRICAL ENGINEERING

The subject of this article concerns the studies related to the infrared measurements and their usage in the diagnosis of electronic devices. In the era of the increasing number of electronic devices, the early diagnosis of abnormalities of their work plays an important role. Because of the damage of the elements are often preceded by the increase of the temperature, the effective way of diagnosing them is the use of the infrared camera. In this article the basis issues including infrared measurements were presented, the common errors in the infrared measurements was highlighted and the used measurement equipment was presented. The comparative studies that show the impact of interfering factors on the correctness of the measurement result were carried out for the three selected infrared cameras. The diagnostic capabilities of the described camera and the results of the infrared measurement for the selected electronic elements were also presented.

(Received: 09. 02. 2017, revised: 15. 02. 2017)