

Leszek RÓŻAŃSKI

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Wykorzystanie termograficznych metod pomiaru temperatury w diagnostyce termicznej obiektów i urządzeń energetycznych**Dr inż. Leszek RÓŻAŃSKI**

Ukończył automatykę i metrologię elektryczną na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej oraz fizykę na Wydziale Matematyki Fizyki i Chemii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Jest autorem kilkudziesięciu publikacji i wydrukowanych referatów związanych z techniką termowizyjną. Zajmuje się teorią oraz konstrukcją systemów zobrazowania termalnego, diagnostyką termalną oraz wykorzystaniem systemów wizyjnych w metrologii wielkości geometrycznych. Brał udział w kilkudziesięciu konferencjach krajowych i zagranicznych m.in. we Francji, Niemczech, Austrii, Chorwacji na Litwie i Węgrzech.

leszek.rozanski@put.poznan.pl

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania termograficznych metod pomiaru temperatury w diagnostyce termicznej obiektów i urządzeń energetycznych. Uwagę skoncentrowano na diagnostyce bazującej na termografii w podczerwieni. W skrócie omówiono metodykę badań oraz kryteria diagnostyczne stosowane w Energetyce Poznańskiej S.A. Przedstawiono własne doświadczenia związane ze stosowaniem systemów termograficznych krótkofalowych (SW) i długofalowych (LW). Wymieniono problemy badawcze, których rozwiązanie może zwiększyć efektywność diagnostyki termalnej w energetyce. Opisano stanowisko przeznaczone do okresowego wzorcowania i sprawdzania właściwości metrologicznych systemów wykorzystywanych w diagnostyce termalnej.

Abstract

Possibilities applications of radiational methods of temperature measurements in thermal diagnostics of the electrical power devices have been presented. Special attention has been concentrated on IR thermography. Methods of investigations and diagnostically criterions have been shown. Own experiences connected with usage of LW and SW IR systems has been presented. A computerised measuring system intended for among others thermographs calibration and examination of metrological features of these devices has been described.

Słowa kluczowe: diagnostyka termalna, termografia w podczerwieni**Keywords:** thermal diagnostics, IR thermography**1. Wprowadzenie**

Potencjalną aplikacją dla diagnostyki termalnej jest każde miejsce, każdy proces, w którym można posłużyć się temperaturą jako wskaźnikiem prawidłowości przebiegu zjawiska lub też jako sygnałem zagrożenia lub uszkodzenia. Przez obserwację stanów termicznych obiektów można stawiać diagnozy, oceniać jakość i prawidłowość wykonania i eksploatacji, optymalizować konstrukcje i prognozować przyszłe stany techniczne badanych obiektów [1, 2, 3]. Kontrola cieplnych reżimów pracy urządzeń elektroenergetycznych ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego eksploataowania systemu energetycznego. Niezastąpione i niezwykle efektywne metody pomiarowe i badawcze - termografia i pirometria - bazują na detekcji promieniowania podczerwonego emitowanego przez diagnozowane obiekty. Termograficzne metody badawcze i diagnostyczne, zastosowane po raz pierwszy w energetyce w Szwecji, przyniosły w krótkim czasie wręcz spektakularne efekty (między innymi kilkukrotnie zmniejszono liczbę awarii spowodowanych przegrzewaniem się elementów [4]). W pierwszych latach stosowania termografii w Polsce udało się zapobiec kilkudziesięciu awariom o zasięgu krajowym [5]. Korzyści płynące ze stosowania termografii w energetyce związane są głównie ze zwiększeniem bezpieczeństwa pracy oraz obniżeniem kosztów eksploatacji systemu (skrócenie czasów przestojów,

zapobieganie poważnym awariom aparatów i urządzeń, zredukowanie kosztów kontroli dzięki diagnozowaniu pod pełnym obciążeniem).

2. Charakterystyka obszaru zastosowań

Diagnostyka termograficzna znajduje zastosowanie we wszystkich ogniach systemu wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej począwszy od elektrowni, poprzez linie przesyłowe, stacje energetyczne, linie średniego napięcia, stacje lokalne aż po końcowego odbiorcę. W przypadku elektrowni/elektrociepłowni termografy mogą być wykorzystane w badaniach [6]:

- urządzeń energetycznych (osłony kotłów, rurociągi wodne i parowe, węzły ciepłne);
- składowisk węgla, składowisk z paliwem płynnym;
- urządzeń elektroenergetycznych (generatory, transformatory, zespoły prądowłórcze);
- wybranych urządzeń mechanicznych.

W procesie diagnozowania stanu linii energetycznych termografia wykorzystywana jest do:

- wykrywania wadliwych styków śrubowych i prasowych (typowy odcinek 100 km dwuprzewodowej 3-fazowej linii przesyłowej ma około 4000 zestyków);
- wykrywanie upływności występujących na powierzchniach izolacyjnych.

W procesie kontroli i oceny stanu urządzeń i aparatów stacji rozdzielczych termografy mogą być wykorzystywane do wykrywania:

- wadliwych zestyków (wyłączników, odłączników, rozłączników, przekładników prądowych i napięciowych, przepustów izolacyjnych, transformatorów, dławików w.cz., baterii kondensatorów, odgromników, bezpieczników, układów tyrystorowych, układów sterowania),
- przegrzewania się transformatorów oraz przekładników.

Ogólnie można stwierdzić, że wszystkie typy zestyków (łączeniowych i nie łączeniowych) są potencjalnymi miejscami uszkodzeń związanymi z nagrzewaniem. Są różne przyczyny powstawania „gorących punktów”. Do najczęstszych z nich należą:

- powstawanie warstw nalotowych (Al_2O_3 , Ag_2S , Cu_2O),
- uszkodzenia wewnętrzne materiału lub niewłaściwa konstrukcja połączenia,
- zabrudzenia powierzchni styków, obłuzowanie połączenia, starzenie lub płynięcie materiału),
- korozja galwaniczna,
- wady materiałowe.

Trzeba pamiętać, iż podczas badań termograficznych możliwe jest obserwowanie „gorących punktów” lub „gorących obszarów”, które nie są związane z występowaniem stanów awaryjnych. Mogą one powstać w wyniku:

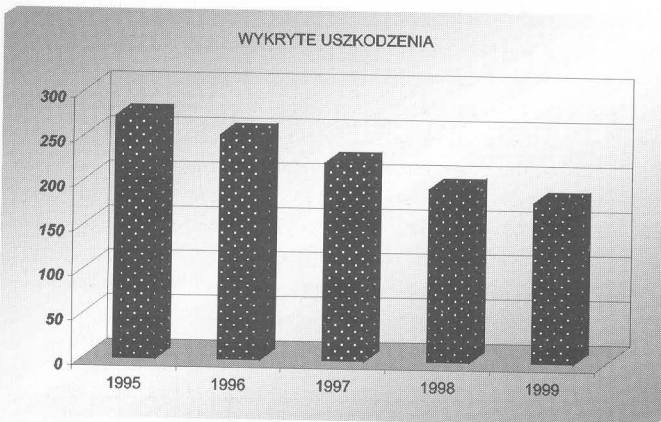
- odbić promieniowania pochodzącego od ciepłych obiektów,
- odbić promieniowania słonecznego,
- nagrzewania badanego obiektu przez promieniowanie słoneczne,
- wzrostu obciążenia,
- przepływu prądów indukcyjnych w materiałach magnetycznych.

3. Uwarunkowania i podstawowe zasady tele-detekcyjnych metod diagnostycznych stosowanych w energetyce

W przypadku wykrywania podczas badań termograficznych elementów/urządzeń „podejrzanych” o wadliwe działanie konieczne jest dokonanie prawidłowego pomiaru temperatury tego elementu.

Rekomendacja działań jakie należy podjąć w celu usunięcia występujących nieprawidłowości musi opierać się na przesłankach dotyczących charakteru obciążenia, wartości obciążenia, usytuowania badanego elementu względem innych elementów przewodzących prąd, oczekiwanego w przyszłości poziomu obciążenia przenieszonego przez uszkodzony element, sposobu pomiaru (bezpośredni, pośredni - poprzez obserwacje innych elementów będących w kontakcie kondukcyjnym z badanym elementem). Wieloletnie doświadczenia (wiedza heurystyczna) wskazuje, że odkrywane stany awaryjne należy podzielić na 3 kategorie. Pierwsza kategoria (kat. C) to te stany, w których przyrost temperatury (mierzony względem średniej temperatury badanego pola) jest mniejszy od 5°C (zaleca się naprawę podczas najbliższego przeglądu). Drugi stan (kat. B) dotyczy przedziału temperatur od 5°C do 35°C (zaleca się szybką naprawę z uwzględnieniem możliwości dokonania stosowanych wyłączeń odbiorców). W przypadku przyrostów większych od 35°C (kat. A) zalecana jest naprawa niezwłoczna.

W literaturze przedmiotu wymienione są także przedziały: do 10°C, 10-30°C i powyżej 30°C [7]. Podane zalecenia dotyczą stanu 50% obciążenia. Aby oszacować przyrost temperatury przy obciążeniu, które jest inne niż 50% należy wykorzystywać prawo Joule'a. Przyjmuje się, że badania muszą być prowadzone przy obciążeniu większym od 30% obciążenia znamionowego. Z inżynierskiego punktu widzenia pomiary termograficzne należy wykonywać minimum 2 razy w roku: przed okresem maksymalnego obciążenia (aby uniknąć awarii w tym okresie) i tuż przed końcem tego okresu, aby zaplanować remonty. Zaleca się także wykonywanie badań bezpośrednio po wykonaniu naprawy, po to by sprawdzić jej skuteczność. Wyniki badań wykorzystywane są nie tylko do wskazywania miejsc, w których winny być przeprowadzane naprawy. Coraz częściej wyniki tych badań stanowią jedną z najistotniejszych przesłanek branych pod uwagę przy tworzeniu harmonogramu przeglądów i remontów poszczególnych obiektów systemu energetycznego (np. w Energetyce Poznańskiej S.A. - rys. 1). Dzięki temu racjonalizuje się procedury związane z eksploatacją tych obiektów.



Rys. 1. Liczba „gorących punktów” wykrytych metodą termograficzną w GPZ-tach E.P. S.A. w latach 1995-99

Fig. 1. Number of „hot points” find out by means of IR thermographical methods at the E.P.S.A. GPZ distribution boards in years 1995-99

Istotnym mankamentem stosowanych kryteriów diagnostycznych jest to, że jednakową wagę przywiązuje się do wszystkich urządzeń i elementów systemu energetycznego. Każde z urządzeń ma inną budowę co sprawia, że tempo degradacji struktur technicznych poszczególnych urządzeń może być różne. Różne jest też ich znaczenie z punktu widzenia stabilności oraz bezpieczeństwa całego systemu (podsystemu). Wypływa stąd wniosek dotyczący potrzeby uwzględnienia w przyszłości tych faktów przy formułowaniu zaleceń diagnostycznych. Potrzebne są badania, które uwzględnią różnorodność właściwości eksploatacyjnych oraz hierarchię ważności poszczególnych elementów systemu energetycznego.

4. Możliwości wykorzystania termografu TE-93 w diagnostyce obiektów energetycznych

Barierą ograniczającą rozwój diagnostyki termograficznej w Polsce były (i w pewnym stopniu są nadal) bardzo wysokie ceny sprzętu termograficznego. Próba przełamania tych ograniczeń było opracowanie



na Politechnice Poznańskiej systemu termograficznego TE-93, którego cechy metrologiczne i użytkowe kształtowano m.in. z myślą o wykorzystaniu tego przyrządu w energetyce (rys. 2).

Rys. 2. Termograf TE-93
Fig. 2. Thermograph TE-93

Cechą charakterystyczną tego termografu są jego niewielkie wymiary, stosunkowo mały ciężar i łatwość obsługi. Przyrząd umożliwia obserwację obiektu w czasie rzeczywistym, jego rejestrację na dyskietce a także analizę zobrazowania termalnego wyświetlanego na ekranie monitora. Istnieje również możliwość przesyłania informacji z termografu do komputera. Podstawowe dane techniczne termografu TE-93 są następujące: rozdzielczość termiczna 0,15°C (NETD dla 30°C), rozdzielczość kątowna 2,5 mrad (dla obiektu 12°C), zakres pomiarowy od 0 do 1000°C, obszar czułości spektralnej od 3 -5,6 μm. W monitorze termografu następuje przetworzenie sygnału analogowego z kamery na postać cyfrową. Wbudowany komputer ze stacją dysków 3,5 cala pozwala m.in. na:

- pomiar temperatury w określonym punkcie obrazu,
- konwolucyjną filtrację obrazu,
- odczyt/zapis z/na dyskietki/-tkę.

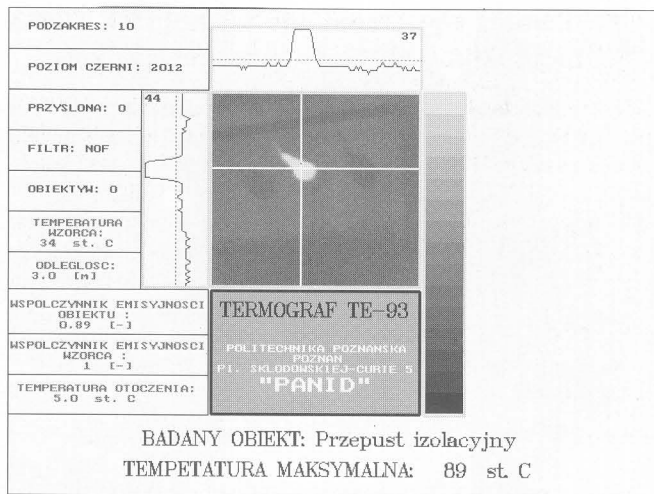
Obrazy tworzone przez termograf TE-93 mogą być „przenoszone” do komputera klasy IBM PC albo za pomocą łącza szeregowego albo na zasadzie odczytywania obrazu zapisanego uprzednio na dyskietce.

Autor opracował program, który umożliwia dokonywanie pełnej analizy obrazów termalnych w komputerze klasy IBM PC (przykładowy termogram pokazano na rys. 3). Program ten pozwala między innymi na:

- tworzenie barwnych i czarno-białych termogramów,
- wyznaczanie histogramów,
- tworzenie odwzorowań profilowych,
- wyznaczanie temperatur średnich i modalnych,
- tworzenie reliefów termalnych,
- prezentowanie serii i sekwencji zobrazowań.

Termograf TE-93 był przez ponad siedem lat intensywnie wykorzystywany do diagnozowania stanu linii i aparatów elektrycznych głównie w Zakładach Energetyki Poznańskiej S.A. (m.in. badania prowadzono w kilkudziesięciu GPZ-ach i ponad tysiącu stacjach typu MST i RS). Wymienione właściwości metrologiczno-użytkowe, bogate oprogramowanie pozwalają na łatwe sprostanie wszystkim zadaniom pomiarowym spotykanym w termograficznej diagnostyce urządzeń i aparatów oraz linii przesyłowych.

Termograf TE-93 jest urządzeniem pracującym w tzw. krótkofalowym (SW) pasmie promieniowania podczerwonego. Okazuje się, że w pewnych sytuacjach cechy metrologiczne i użytkowe urządzeń z takim właśnie obszarem czułości spektralnej są gorsze od cech urządzeń pracujących w pasmie długofalowym (LW). Chodzi tutaj przede wszystkim o badania diagnostyczne prowadzone w warunkach, gdy wizowane obiekty są nasłonecznione. Systemy SW nie są, w przeciwieństwie do systemów LW, odporne na zakłócenia wywołane przez refleksy słoneczne. Przeprowadzone badania porównawcze termografów TE-93 i ThermaCAM 2000 (nowoczesny system klasy LW) potwierdziły to spostrzeżenie. Inna ważną zaletą systemu ThermaCAM 2000 jest jego dobra rozdzielczość geometryczna (trzykrotnie lepsza od rozdzielczości termografu TE-93).



Rys. 3. Termogram wadliwego izolatora
Fig. 3. The faulty insulator thermogram

5. Uwarunkowania metrologiczne diagnostyki termalnej obiektów energetycznych

Podstawowym narzędziem pomiarowym wykorzystywanym w diagnostyce termalnej obiektów są termografy pracujące w podczerwieni. Systemy termograficzne mierzą temperaturę badanego obiektu pośrednio; bezpośrednio mierzą moc promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekt. Promieniowanie emitowane przez badany obiekt zostaje przetworzone przez strukturę detekcyjną systemu na sygnał elektryczny, który to sygnał jest nośnikiem informacji o temperaturze tego obiektu. Temperatura wyznaczana jest z wykorzystaniem charakterystyki termometrycznej termografu zapisanej w pamięci specjalizowanego komputera, przeznaczonego m.in. do sterowania procesem odtwarzania pól temperaturowych wizowanych przez kamerę termografu. Do struktury detekcyjnej termografu poza promieniowaniem emitowanym przez obiekt (a więc promieniowaniem „niosącym” informacje o temperaturze tego obiektu) dociera także promieniowanie otoczenia odbite od obiektu oraz promieniowanie własne atmosfery „generowane” na odcinku drogi między badanym obiektem a kamerą termografu. Poza tym na detektor pada promieniowanie emitowane przez wewnątrz samej kamery. Każda ze wymienionych składowych promieniowania docierającego do detektora ma inny rozkład gęstości widmowej mocy promienistej, który zależy m. in. od stanu atmosfery (wilgotność, ciśnienie, zawartość dwutlenku węgla, zamglenie, zapylenie itd., właściwości emisyjnych obiektu, właściwości emisyjnych elementów kamery... itd.). Wszystko to sprawia, że odtwarzanie temperatury obiektu dokonywane jest w wyniku realizacji procedur obliczeniowych uwzględniających wpływ, jaki na użyteczny sygnał pomiarowy, mają wymienione wyżej czynniki. Bazuje się na podstawowej zależności wiążącej warunki pomiaru panujące w trakcie wykonywania realnych badań z warunkami panującymi podczas wzorcowania kamery (podczas wyznaczania tzw. krzywej kalibracyjnej):

$$I = \varepsilon_o \tau_a \tau_r I(T_o) + (1 - \tau_a) I(T_a) + (1 - \varepsilon_o) \tau_a \tau_r I(T_r) \quad (1)$$

gdzie: T_o - temperatura obiektu, T_a - temperatura otoczenia układu obiekt - termograf, T_r - radiacyjna temperatura otoczenia, ε_o - średni współczynnik emisyjności obiektu, τ_r - średnia tłumienność atmosferyczna związana z rozpraszaniem promieniowania, τ_a - średnia tłumienność atmosferyczna związana z absorpcją promieniowania, I - wartość sygnału na wyjściu toru pomiarowego termografu, $I(T_o)$ - wartość sygnału na wyjściu toru pomiarowego termografu odwzorowująca w warunkach kalibracji temperaturę T_o wzorca promieniowania; $I(T_r)$ - wartość sygnału na wyjściu toru pomiarowego termografu odwzorowująca w warunkach kalibracji temperaturę T_r wzorca promieniowania; $I(T_a)$ - wartość sygnału na wyjściu toru pomiarowego termografu odwzorowująca w warunkach kalibracji temperaturę T_a wzorca promieniowania.

Wzór (1) jest słuszny przy założeniu, że sygnał pochodzący od promieniowania wewnętrznego kamery jest kompensowany. Ogólnie można stwierdzić, że dobre kompensowanie tego sygnału wymaga od konstruktorów wielkiej staranności. Realizowane jest ono na wiele sposobów; m. in. stosuje się wewnętrzne wzorce promieniowania, mierzy się temperaturę w wybranych punktach wnętrza kamery, wykorzystuje promieniowanie odbite od chłodzonego detektora itd.

W nowoczesnych systemach termograficznych wartości współczynników tłumienności atmosferycznej są obliczane przez komputer systemu termograficznego na podstawie wpisanych wcześniej danych o warunkach wykonywania pomiarów (wilgotność, ciśnienie, temperatura, odległość obiektu od kamery). Stosowane są uproszczone procedury. Dokładne modelowanie tłumienności atmosferycznej wymaga posłużenia się jednym ze znanych modeli opisujących właściwości optyczne i radiacyjne atmosfery takich jak MODTRAN, LOWTRAN, STREAMER lub S6. W wielu przypadkach spore trudności sprawia wprowadzenie poprawnej wartości współczynnika emisyjności. Każdy pomiar temperatury dokonywany metodami radiacyjnymi wiąże się z koniecznością wprowadzenia do systemu wartości parametrów opisujących właściwości emisyjne badanych obiektów; wymagana jest znajomość „a priori” emisyjności tych obiektów. Emisyjność jest parametrem opisującym właściwości radiacyjne obiektu, który jest trudno precyzyjnie określić. Właściwości emisyjne determinowane są przez wiele czynników takich jak rodzaj materiału z jakiego jest on wykonany, stan jego warstwy wierzchniej, kształt powierzchni emitującej, kąt radiacji, długości fali, temperatura itd. Wprowadzono wiele parametrów opisujących właściwości emisyjne materiałów takie jak emisyjność globalna, emisyjność monochromatyczna, emisyjność pasmowa, emisyjność normalna, emisyjność kierunkowa. Badania emisyjności różnorodnych materiałów prowadzone są od szeregu lat. W literaturze przedmiotu podawane są zależności funkcyjne wiążące emisyjność monochromatyczną różnych materiałów z ich własnościami optycznymi i elektrycznymi: aproksymacje Drude-Zenera, Parker-Abota, Hagen-Rubensa, Foote'a (metale), wzory Fresnela (dielektryki) i McMahona (ciała częściowo przezroczyste). Zakres stosowalności tych wzorów obwarowany jest szeregiem założeń zasadniczo ograniczających możliwości ich wykorzystania w termometrii radiacyjnej. Problem wyznaczenia emisyjności ciał, często spotykanych w zastosowaniach przemysłowych został podjęty w licznych pracach. Rezultaty tych prac zostały opublikowane w postaci tablic z wartościami emisyjności globalnych różnych materiałów [8]. Okazuje się, że jeśli nawet znana jest emisyjność globalna, to w przypadku pomiarów temperatury metodami radiacyjnymi ważne jest to, iż wartości emisyjności monochromatycznej zmieniają się najczęściej w całym zakresie długości fal λ obejmujących przedział czułości spektralnej radiometru. Zgodnie z typowymi procedurami, korygowanie wpływu emisyjności na sygnał pomiarowy nie wiąże się z potrzebą wprowadzenia do systemu komputerowego charakterystyki widmowej emisyjności lecz na wprowadzeniu jednej wartości - emisyjności efektywnej [8, 9]. Efektywna emisyjność obiektu jest definiowana jako emisyjność ciała szarego o tej samej temperaturze jak badany obiekt, dla której sygnał na wyjściu systemu pomiarowego będzie identyczny jak sygnał od realnego obiektu. Istnieje kilka metod definiowania tego współczynnika. W przypadku systemów radiometrycznych pasmowych (a takimi są systemy termograficzne) najkorzystniej jest posługiwać się parametrem emisyjności efektywnej ε_{ef} badanego obiektu (o temperaturze T_o ; $\varepsilon_o = \varepsilon_{ef}$) rozumianym jako średnia ważona z iloczynu funkcji realnej widmowej emisyjności obiektu $\varepsilon_R(\lambda)$, luminancji energetycznej obiektu $L(\lambda, T_{ob})$ i charakterystyki spektralnej kamery względem iloczynu dwóch ostatnich z wymienionych funkcji. Pod pojęciem charakterystyki spektralnej kamery termografu $csk(\lambda)$ rozumie się tutaj iloczyn funkcji widmowej względnej czułości detektora, transmisyjności widmowej układu optycznego i transmisyjności widmowej filtrów. Emisyjność efektywną badanego opisuje wzór [9]:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_R(\lambda) L(\lambda, T_{ob}) csk(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_{ob}) csk(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Ilościowa analiza stanu termalnego obiektów i urządzeń energetycznych często może być uproszczona z uwagi na to, iż większość materiałów, z jakich wykonuje się linie i elementy stykowe charakteryzuje się po kilku latach eksploatacji współczynnikiem emisyjności mieszczącym się w granicach 0,85-0,92.

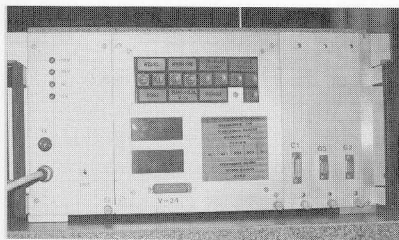
Doskonałym narzędziem przydatnym do planowania badań oraz analizowania otrzymanych rezultatów mogą być programy typu CAOD przeznaczone głównie do komputerowego wspomagania procesu kształtowania cech metrologicznych nowo projektowanych (tworzonych) systemów termograficznych (np. program programu TER-MOPTv2 [10]). Pozwalają one modelować właściwości metrologiczne systemów termograficznych i dzięki temu np. sprawdzać rachunkowo czy w określonych warunkach pomiarów będzie można prowadzić badania z wymaganą rozdzielczością termiczną.

Istotnym zagadnieniem związanym z diagnostyką termalną jest potrzeba okresowego wzorcowania systemów termograficznych i sprawdzania ich podstawowych właściwości i parametrów metrologicznych (starzenie się struktur detekcyjnych, zabrudzenia i degradacja warstw antyrefleksyjnych układu optycznego, zmiana właściwości radiacyjnych wewnętrznych wzorców promieniowania... itd.). Systemy termograficzne powinny być wzorcowane co najmniej jeden raz w roku. Na Politechnice Poznańskiej opracowano skomputeryzowane stanowisko pomiarowe, które może być wykorzystane do tych celów. Projektując to stanowisko kierowano się zasadą, że musi być on wykonany w taki sposób, by cechowało się otwartością zarówno sprzętowo jak i programowo, tak aby możliwe było łatwe przystosowanie go do wykonywania zadań pomiarowych z systemami termograficznymi różnych typów. W rezultacie stworzony zestaw pomiarowy może być wykorzystany do:

- automatycznego wzorcowania termografu,
 - wyznaczania funkcji rozmycia linii i funkcji przenoszenia kontrastu termografu,
 - wspomagania interaktywnych procedur justowania kamer,
 - badania zniekształceń geometrycznych występujących w odwzorowaniu termalnym,
 - mierzenia rozdzielczości termicznej i geometrycznej termografu.
- W skład stanowiska pomiarowego wchodzi:
- mikrokomputerowy system kontrolno - pomiarowy (BKP - rys. 4),
 - zestaw technicznych modeli ciała czarnego,
 - szczelinowy wzorzec temperatury (o nastawianej szerokości szczeliny),
 - wysokotemperaturowy impulsowy wzorzec temperatury,
 - siatka termiczna,

- stroboskopowy adapter profilowy,
- kolimator z łąwą optyczną,
- siłownik mechaniczny,
- komputer klasy IBM PC, drukarka, ploter XY.

Rys. 4. System BKP
Fig. 4. BKP system



W zależności od rodzaju realizowanych zadań pomiarowych konfiguruje się odpowiednie zestawy pomiarowe. Np. do wyznaczania funkcji MTF kamery termografu wykorzystuje się: wysokotemperaturowy impulsowy wzorzec temperatury, kolimator, BKP, łąwą optyczną, stroboskopowy adapter profilowy, komputer klasy IBM PC, drukarkę, ploter XY. Pomiar wykonywane są pod kontrolą programu JUSTMTF. Funkcja MTF wyznaczana jest w wyniku

realizacji procedury obliczania całkowitego przekształcenia Fouriera z funkcji LSF, będącej odpowiedzią toru pomiarowego ST na wymuszenie impulsowe. Źródłem generującym to wymuszenie jest wzorzec impulsowy z tak usytuowaną liniową powierzchnią radiacji, by była ona prostopadła do kierunku w jakim układ analizy obrazu termografu skanuje linię oraz by była odwzorowywana w tej części płaszczyzny obrazowej, dla której zachowana jest inwariantność przestrzenna odwzorowania.

Stanowisko do wzorcowania termografu składa się z zestawu wnekowych wzorców temperatury, siłownika mechanicznego, BKP, komputera, drukarki.

Procedury wyznaczania funkcji MTF i wzorcowania termografu „obsługiwane” są przez programy typu *user friendly* o nazwach odpowiednio JUSTMTF i WZORTERM.

6. Podsumowanie

1. Doświadczenia zebrane w ciągu siedmiu lat badań różnorodnych obiektów energetycznych jednoznacznie pokazują skuteczność diagnostyki termograficznej oraz potrzebę jej regularnego stosowania.
2. Opracowany na Politechnice Poznańskiej termograf TE-93 w pełni zaspokaja wymagania związane z termograficzną diagnostyką obiektów energetycznych.
3. Ze względów eksploatacyjnych oprócz badań cyklicznych należy każdorazowo wykonywać pomiary termowizyjne po wykonaniu prac naprawczych.
4. Badaniom termograficznym należy poddawać każdą oddawaną do eksploatacji nową inwestycję sieciową.
5. Doświadczenia zebrane podczas badań nasuwają wniosek o potrzebie wdrożenia prac badawczych, których celem byłoby wypracowanie kryteriów diagnostycznych pozwalających określić stan urządzeń elektrycznych mających największy wpływ na bezawaryjną pracę sieci elektroenergetycznej. Badaniom termograficznym należałoby poddać także elementy sieci niskiego napięcia ze szczególnym uwzględnieniem linii z przewodami izolowanymi.
6. Przedstawiono podstawowe elementy opracowanego na Politechnice Poznańskiej systemu pomiarowego przeznaczonego do wzorcowania termografów oraz badania podstawowych właściwości metrologicznych tych urządzeń. Dzięki otwartej strukturze może być łatwo dostosowywany do wzorcowania i badania termografów różnych typów.

Literatura

- [1] T. Burakowski: Termowizja w diagnostyce i racjonalnej eksploatacji. Eksploatacja Maszyn, 1985, nr 5-6.
- [2] S. Poloszyk, L. Różański: Termowizyjna diagnostyka maszyn technologicznych. Pomiary Automatyka Kontrola, 2000, nr 1.
- [3] S. Poloszyk, L. Różański: Thermographic Diagnosis Station of Machines. 7th International DAAAM Symposium, Vienna, 1996.
- [4] Publikacja firmy AGEMA - Thermographic inspection of electrical installations.
- [5] G. Rudowski: Termowizja i jej zastosowanie. WKŁ, Warszawa, 1978 [6] Z. Ławrowski: Zastosowanie techniki termowizyjnej w Elektrowni Opole. Energetyka 1995, nr 12.
- [7] A. G. Żukow i in.: Tjeplovizionnyje pribory i ich primjenjenje. Radio i Swiaź. Moskwa, 1983.
- [8] K. Chrzanowski: Błędy metod bezkontaktowego pomiaru temperatury za pomocą urządzeń podczerwieni. WAT, Warszawa, 1996.
- [9] K. Chrzanowski: Problem of determination of effective emissivity of some materials. Infrared Physics and Technology, 36, 1995.
- [10] S. Poloszyk, L. Różański: Kształtowanie właściwości metrologicznych systemów diagnostyki termograficznej. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 4, 2002.

Title: Thermographical Methods of Temperature Measurements Applications in Thermal Diagnostics of Electric Power Devices