

Jacek KOZYRA¹

ZASTOSOWANIE POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH W ELEKTROENERGETYCE

Termowizyjne metody diagnozowania urządzeń elektrycznych są coraz częściej stosowane do wykrywania uszkodzeń w poszczególnych punktach systemu elektroenergetycznego. W artykule przedstawiono metody i zasady pomiarów termowizyjnych oraz zaprezentowano przykłady pomiarów wykonywanych w wybranych elementach systemu elektroenergetycznego.

THE USE OF THERMO – VISUAL MEASUREMENTS IN ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Thermo-visual methods for the diagnosis of electrical equipment are increasingly being used to detect faults at different points of electrical power engineering systems. In this article the methods and rules of thermo-visual measurements as well as examples of the measurements conducted in chosen elements of electrical power engineering systems are presented.

1. WSTĘP

Jednym z podstawowych wyzwań stojących przed elektroenergetyką jest zapewnienie wystarczającej ilości energii elektrycznej, zadawalającej jakości oraz bezprzerwowego dostarczenia jej do odbiorcy. Wiąże się to ze stratami finansowymi zarówno dla odbiorcy jak i dostawcy, który nie wywiązując się z zawartych umów podlega karą finansowym.

Obecnie w elektroenergetyce coraz więcej uwagi poświęca się zagadnieniom jakości energii elektrycznej. Z roku na rok zwiększa się koszty związane z jakością energii; dla przykładu w USA od 2003 roku przeznaczają się około 45% całkowitych kosztów inwestycyjnych w sektorze energetycznym [1]. Zwiększające się nakłady wywołane są wzrostem liczby i mocy niespokojnych, nieliniowych oraz niekiedy niesymetrycznych odbiorników. Niewiele mniej uwagi poświęca się badaniom oraz metodą pomiarowym które w sposób szybki i dokładny potrafią diagnozować stosowane w elektroenergetyce urządzenia elektryczne. Diagnostykę tę przeprowadza się na poszczególnych elementach tworzących system elektroenergetyczny. Proces ten rozpoczyna od wytwarzania, poprzez

¹ Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
E-mail: j.kozyra@pr.radom.pl

dystrybucję, aż do odbioru energii. Jednym ze sposobów diagnozowania urządzeń elektrycznych jest technika termowizyjna

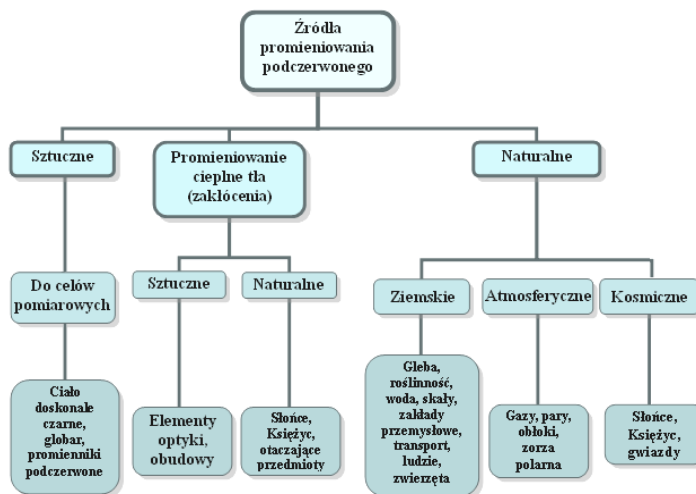
2. OGÓLNE ZASADY TERMOWIZJI

Termowizja jest dziedziną techniki zajmującą się detekcją, rejestracją, przetwarzaniem i wizualizacją niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekty, przy czym otrzymany obraz jest odwzorowaniem rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu. Obraz ten jest nazywany termogramem [1]. Termowizja ma swój początek w 1800r. kiedy astronom Sir William Herschel odkrył promieniowanie podczerwone. Kilka lat później potwierdzono tezę, iż promieniowanie podczerwone może być odbijane, rozszczepiane, załamywane, transmitowane. Herschel zauważył, że termometry umieszczone poza czerwoną granicą widma widzialnego wskazywały większą temperaturę niż termometry umieszczone w poszczególnych, widzialnych zakresach widma. Z doświadczenia wynikało, że granice widma promieniowania słonecznego nie pokrywają się z granicami widzialnymi oraz, że z obszarem czerwieni bezpośrednio łączy się obszar promieniowania niewidzialnego. Nowy obszar widma Herschel nazwał "niewidzialnym widmem termometrycznym".

Promieniowanie podczerwone jest promieniowaniem elektromagnetycznym obejmującym zakres fal dłuższych niż promieniowanie widzialne, ale nie przekraczające $1000\mu\text{m}$. Przyjęto umownie następujący podział tego przedziału [3]:

- Bliska podczerwień (od $\lambda = 0,78\mu\text{m}$ do $\lambda = 1,4\mu\text{m}$),
- Średnia podczerwień (od $\lambda = 1,4\mu\text{m}$ do $\lambda = 3\mu\text{m}$),
- Daleka podczerwień (od $\lambda = 3\mu\text{m}$ do $\lambda = 1000\mu\text{m}$).

Promieniowanie podczerwone powstaje w wyniku ruchu drgającego i obrotowego atomów i molekuł. Jak stąd wynika, każde ciało jest źródłem promieniowania podczerwonego, jeśli jego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego[4]. Promieniowanie podczerwone można podzielić w następujący sposób:



Rys.1 Źródła promieniowania podczerwonego

W widmie światła widzialnego można wydzielić przedziały długości fal, które oko ludzkie odbiera jako wrażenie różnych barw:

Tab. 1. Barwy światła i ich długości

długość fali	kolor
[nm]	
380 - 430	fioletowy
430 - 450	indygo
450 - 500	niebieski
500 - 520	cyjan
520 - 565	zielony
565 - 590	żółty
590 - 625	pomarańczowy
625 - 780	czerwony

Źródłami sztucznymi promieniowania podczerwonego są wszystkie obiekty, których temperaturę podnosimy celowo, aby wysyłały promieniowania podczerwone. Do takich źródeł należą między innymi:

- modele ciał doskonale czarnych,
- promienniki podczerwieni,
- łuk elektryczny,
- lampy wyładowcze i lasery.

Podstawą rozważań na temat promieniowania podczerwonego jest tzw. ciało doskonale czarne, które pochłania całość promieniowania padającego na nie, niezależnie od kąta padania, długości fali i mocy źródła promieniowania. Dlatego przyjmuje się, że emitancja (gęstość strumienia energii emitowana przez pewną powierzchnię ciała) tego źródła emisji jest proporcjonalna do jego temperatury[4]. Oznacza to, że promieniowanie z zakresu podczerwieni, emitowane przez ciała o temperaturze wyższej niż zero bezwzględne, jest proporcjonalne do jego temperatury. Powyższe właściwości mają zastosowanie w urządzeniach rejestrujących promieniowanie podczerwone które rejestrują temperaturę obserwowanego obiektu.

Natężenie promieniowania zależy od długości fali λ oraz temperatury obiektu T_{ob} . Obiekty o $T_{ob} < 500$ °C emitują promieniowanie leżące prawie całkowicie w zakresie promieniowania podczerwonego. Jeżeli $T_{ob} > 500$ °C, to część wysyłanego promieniowania obiektu leży już w zakresie promieniowania widzialnego. Obserwowane wtedy barwy promieniowania zmieniają się od koloru czarno-purpurowego do jasno żółtego wraz ze wzrostem temperatury. Promieniowanie cieplne jest jednym z rodzajów promieniowania elektromagnetycznego występującego w przyrodzie.

Z punktu widzenia pomiarów termowizyjnych istotna jest tzw. emisyjność mierzonego obiektu. Tę wielkość wprowadzono w celu odniesienia promieniowania ciała rzeczywistego do wzorca, jakim jest ciało doskonale czarne. Współczynnik emisyjności określa zdolność danego ciała do emitowania własnej energii z pominięciem energii odbitej

i przepuszczanej. Współczynnik emisyjności zawiera się w przedziale od 0 do 1. Z praktyki wynika, że im jest on bliższy 1 dla danego ciała, tym pomiar jest prostszy i daje dokładniejsze wyniki. Emisyjność ma prostą interpretację fizyczną, natomiast praktyka dowodzi, że jest to parametr trudny do określenia. Dokładność określenia emisyjności determinuje dokładność termowizyjnych pomiarów temperatury. Z tego względu prowadzi się badania emisyjności różnych materiałów i powierzchni [6]. W Tab.2. przedstawiono wartości emisyjności przykładowych materiałów stosowanych w elektroenergetyce.

Tab. 2. Emisyjność materiałów stosowanych w elektroenergetyce

Metal	Wypolerowany	Nieobrobiony	Utleniony
Aluminium	0,04	0,055	0,11 ÷ 0,19
Cyna	0,04 ÷ 0,065	-	-
Cynk	0,04 ÷ 0,053	-	0,11
Miedź	0,018 ÷ 0,02	-	0,57
Mosiądz	0,03	0,06 ÷ 0,2	0,60
Nikiel	0,45 ÷ 0,087	-	-
Ołów	0,057 ÷ 0,075	0,28	0,63
Srebro	0,02 ÷ 0,036	-	-
Stal	0,12 ÷ 0,40	0,75	0,80 ÷ 0,95
Stal nierdzewna	0,11	0,57	0,80 ÷ 0,95
Złoto	0,018 ÷ 0,035	-	-

3. METODY I ZASADY POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH

Pomiary termowizyjne to jedna z metod badawczych umożliwiającą śledzenie różnych procesów, których przebieg wiąże się ze zmianami emisyjności czy temperatury w czasie albo ze zmianami obrazów termicznych poszczególnych obiektów. Aby na podstawie termogramów można było ocenić rodzaj uszkodzenia obiektu, często konieczne jest wykonanie dodatkowo szeregu badań i analiz porównawczych. W zakresie pomiarów termowizyjnych, podobnie jak w rentgenologii, wymagana jest również specjalizacja – wiedza szczegółowa. Uwzględniająca cechy charakterystyczne poszczególnych dziedzin zastosowań badanych obiektów oraz umiejętności odczytu i interpretacji termogramu. Należy wyraźnie podkreślić, że pomiary termowizyjne są metodą uzupełniającą do innych metod badawczych i diagnostycznych.

Wykonując pomiary termowizyjne należy uwzględnić kilka czynników zewnętrznych które mają istotny wpływ na wynik pomiaru. Do kamery termowizyjnej dociera nie tylko promieniowanie podczerwone pochodzące od badanego obiektu. Kamera rejestruje także promieniowanie pochodzące z otoczenia i odbite od powierzchni obiektu.

Składniki promieniowania są tłumione przez atmosferę znajdującą się na drodze pomiaru. Do kamery dociera promieniowanie słoneczne odbite od obiektu i otoczenia. Ponadto w pobliżu mierzonego obiektu i kamery mogą znajdować się inne źródła promieniowania cieplnego (ogniska, piece, grzejniki), których promieniowanie wprowadza dodatkowe błędy pomiarowe. Sama atmosfera, chmury, nieboskłon również wysyłają promieniowanie podczerwone.

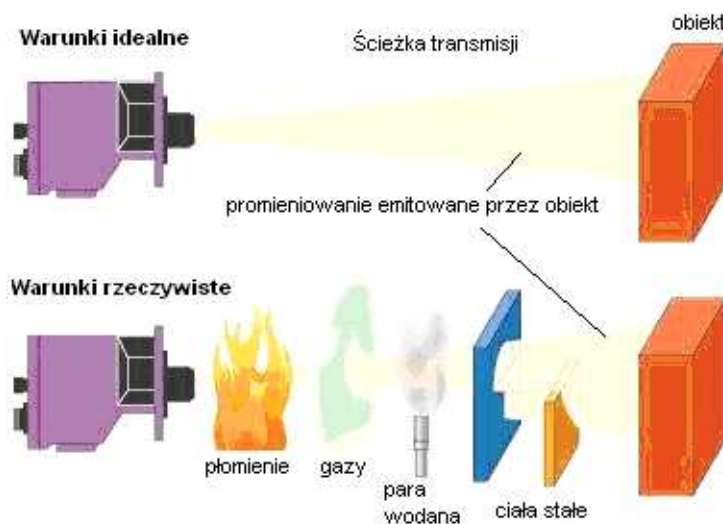
Wymienione zakłócenia są trudne do oszacowania ale niektóre z nich na tyle znikome że można je pominąć. Jeśli zakłócenia są znaczące to osoba wykonująca pomiary może zmienić układ pomiarowy i uniknąć zakłóceń w następujący sposób:

- zmienić kierunek obserwacji,
- wykonać ekranowanie silnych źródeł promieniowania,
- wykonać pomiary w innym czasie np. ograniczenie wpływu promieniowania słonecznego.

Promieniowanie słoneczne może wprowadzić znaczne błędy pomiarowe, szczególnie dla obiektów o małej emisyjności. W zakresie widmowym kamer krótkofalowych natężenie promieniowania słońca jest ponad 15 razy większe niż w zakresie długofalowym. Dlatego też do pomiarów obiektów znajdujących się w wolnej przestrzeni lepiej stosować kamery długofalowe [2].

Innym czynnikiem fałszującym pomiar termowizyjny jest wystąpienie gazu, dymu, kurzu lub inne zanieczyszczenia na drodze między ciałem badanym, a kamerą termowizyjną. Wpływ wymienionych zanieczyszczeń spowoduje pochłanianie część promieniowania wysyłanego przez ciało badane, lub zanieczyszczenia są również źródłem promieniowania.

Praktycznym sposobem sprawdzenia, czy nie występują błędy pomiaru temperatury określonego ciała spowodowane pochłanianiem przez gazy, pary lub inne zanieczyszczenia jest wykonanie pomiaru temperatury tej samej powierzchni z możliwie małej odległości [7]. Warunki rzeczywiste pomiarów i warunki idealne przedstawiono na rys. 2 [8].



Rys.2 Warunki idealne i rzeczywistej pomiarów termowizyjnych

4. POMIARY TERMOWIZYJNE W ELEKTROENERGETYCE

Na przestrzeni ostatnich lat kamera termograficzna stała się jednym z podstawowych narzędzi badawczych. Głównymi celami badań w elektroenergetyce, są sieci, instalacje niskich i średnich napięć. Obowiązujące prawo budowlane nakłada na właścicieli i zarządców obowiązek wykonywania oględzin i przeglądów instalacji wszystkich budynków mieszkalnych i przemysłowych. W zakresie elektroenergetyki ustawodawca poza typowymi pomiarami elektrycznymi, jak pomiar skuteczności ochrony przeciwporażeniowej, nakazuje również badanie jakości połączeń elektrycznych oraz stanu osprzętu i zabezpieczeń elektroenergetycznych.

Jakość połączeń elektrycznych zależy w dużym stopniu od ich temperatury w warunkach normalnej pracy, czyli pod obciążeniem. Tradycyjna metoda prowadzenia takich oględzin polegała na obserwacji aparatów w rozdzielni w poszukiwaniu śladów uszkodzenia lub przebarwienia izolacji. Dlatego pierwszym sygnałem ostrzegawczym podczas takich oględzin był zapach przypalanej izolacji co w efekcie prowadziło do całkowitego wyłączenia rozdzielni. Inne jakości i możliwości występują podczas wykonania pomiarów za pomocą kamery termograficznej. Istnieje wtedy większa dokładność zlokalizowania usterki oraz ustalić jej zaawansowanie. Wykonując pomiary sporządza się raport który w dużym stopniu umożliwiającym ocenę techniczną badanego urządzenia przez innego audytora. Jest to wielką zaletą termografii.

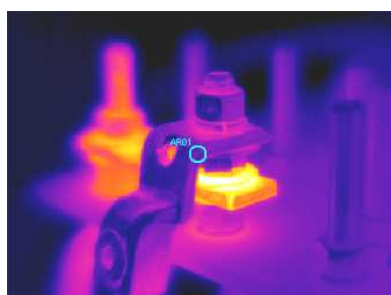
W różnych krajach wymagania dotyczące stopnia obciążenia instalacji podczas badania termowizyjnego różnią się. W Polsce jako minimalną wartość przyjęto 40 % obciążenia znamionowego badanego toru prądowego. Jednak zarówno w krajach zachodnich, jak i w kryteriach oceny wyników pomiarów opracowanych w krajowych zakładach elektroenergetycznych dopuszcza się 30 % obciążenie, przy czym prędkość przepływu powietrza nie może przekraczać 4 m/s [9]. Zapewnienie odpowiednio dużego obciążenia prądowego badanych elementów zwiększa dokładność pomiarów i pozwala na wiarygodną ocenę ich wyników.

4.1 Termowizyjna kontrola elementów stacji elektroenergetycznych

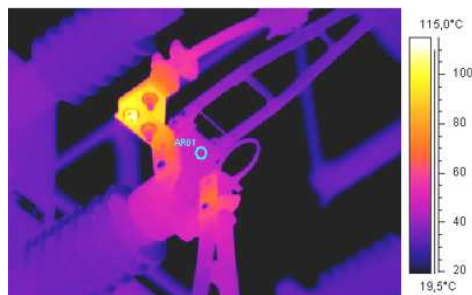
Do podstawowych czynności związanych z kontrolą termowizyjną elementów stacji elektroenergetycznych należy sprawdzanie poprawności pracy złącz. Na skutek przepływu prądu, korozje powierzchni styków oraz ze względu na zmęczenie materiału, zachodzi stopniowe pogorszenie się stanu złączy. Powoduje to wzrost temperatury złącza prądowego. Wartość temperatury oraz jej przyrost w odniesieniu do innych elementów jest podstawowym kryterium oceny pomiaru termowizyjnego.

Kontroli termowizyjnej poddawane są urządzenia w torze prądowym stacji elektroenergetycznej. Pomiar rozpoczyna się od szyn zbiorczych poprzez odłącznik szynowy, wyłącznik mocy, przekładnik prądowy, przekładnik napięciowy, odłącznik liniowy a kończy się na transformatorze. Proces pomiarowy dzieli się na dwie części. Pierwsza część badania polega na wykryciu połączenia o podwyższonej temperaturze. Drugi etap pomiaru jest trudniejszy ponieważ w bliskiej odległości należy zmierzyć temperaturę podejrzanego elementu. Podczas tej czynności należy również odpowiednio wyeksponować przegrzany element tak aby w polu pomiaru były widoczne elementy pracujące z normalną temperaturą.

Podczas pomiarów termowizyjnych w stacji elektroenergetycznej szczególną uwagę poświęca się pomiarom połączeń rozłącznych, zacisków wyłączników, odłączników i przekładników prądowych. Wynika to ze względu nadmiernego przyrostu temperatury w wyniku niestarannie zaprasowanych przewodów w zacisku lub wadliwego połączenia zacisku z urządzeniem. Przykłady pomiarów termowizyjnych w stacji elektroenergetycznej przedstawiono na poniższych rysunkach [8].



Rys.3 Wadliwy zacisk szyny



Rys.4 Przegrzane połączenie śrubowe



Rys.5 Przegrzane zaciski odłącznika



Rys.6 Przegrzany styk obrotowy odłącznika

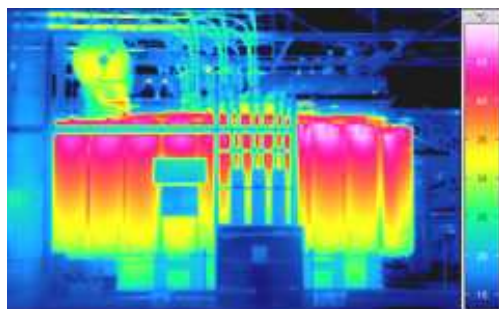
4.2 Termowizyjna kontrola transformatorów

Badania termowizyjne transformatorów wykonuje się podczas produkcji, remontów oraz w trakcie ich eksploatacji. W czasie rutynowych pomiarów, sprawdzeniu podlega:

- osprzęt,
- izolatory przepustowe,
- stan zacisków przyłączowych,
- zewnętrzne powierzchnie kadzi i pokrywy.

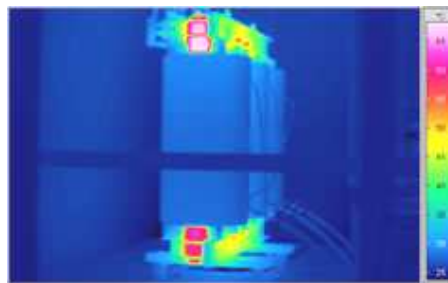
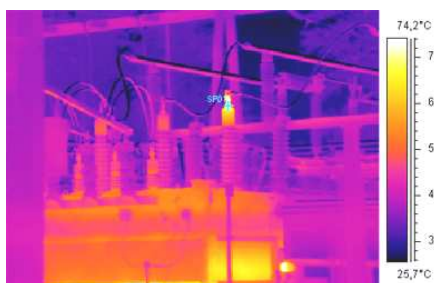
Obserwacje te pozwalają na wczesne wykrycie uszkodzeń wewnętrznych. Przy braku właściwego ekranowania wnętrza kadzi transformatora powstający rozproszony strumień magnetyczny wywołuje przepływ przez śruby łączące kadź z pokrywą bardzo dużych prądów. Za pomocą kamery termowizyjnej można zdiagnozować rozkład temperatury

w transformatorze chłodzonym olejem. Transformator chłodzony olejem podczas normalnej pracy przedstawia rys.7 [8].



Rys.7 Rozkład temperatury w transformatorze chłodzonym olejem

Wadliwe połączenie na zaciskach transformatorów jest częstym zakłóceniem powodującym wzrost temperatury. Wysoka temperatura na zaciskach może doprowadzić nawet do pożaru transformatora. Przykład wadliwego połączenia zacisku przyłączeniowego transformatora przedstawiono na rys.8 [8]. W kadzi transformatora rozproszone pole rdzenia indukuje prądy wirowe, które są przyczyną dodatkowego miejscowego nagrzewania. Istnienie plam ciepłych obok normalnego nagrzania olejem wypełniającym kadź, może świadczyć o złej pracy rdzenia, tzn. zbyt dużym polu rozproszonym. Przykład transformatora z rdzeniem o podwyższonej temperaturze przedstawia rys.9 [10].



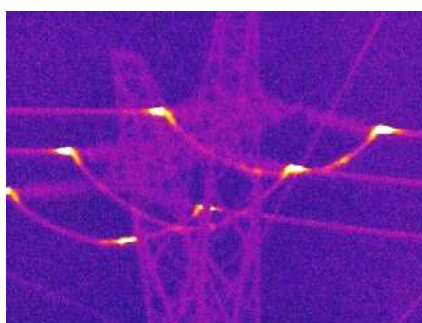
Rys.8 Przegrzany zacisk transformatora

Rys.9 Podwyższona temperatura rdzenia

4.3 Termowizyjna kontrola linii napowietrznych

Inspekcji termowizyjnych linii napowietrznych zazwyczaj dokonuje się po zapewnieniu 30% znamionowej obciążalności prądowej linii. Pomiarów dokonuje się z pokładu śmigłowca. Obserwuje się przewody na całym ich przebiegu ze szczególnych uwzględnieniem odcinków linii bezpośrednio w pobliżu słupów. W przypadku zaobserwowania wadliwego połączenia, rejestrując obraz określa temperaturę wszystkich wykrytych, wadliwych połączeń prądowych. Czasami sam przelot z kamerą termowizyjną

nad linią nie wystarcza do prawidłowej oceny stanu technicznego badanej linii. Dlatego też pomiar z pokładu helikoptera umożliwia wykrycie wadliwych połączeń prądowych w torze linii. Pomiary te są podstawą do dokładnych pomiarów termowizyjnych z ziemi. W ten sposób określa się dokładnie miejsce w którym występuje nadmierny wzrost temperatury. Najczęściej występującym przypadkiem nadmiernego wzrostu temperatury w liniach napowietrznych jest wadliwe zaprasowanie przewodów na uchwytach odciągowych. Wadę na uchwycie odciągowym przedstawia rys.9 i rys. 10 [11].



Rys.9 Wadliwe połączenie zacisków prasowanych



Rys.10 Wadliwe połączenie zacisków prasowanych na uchwycie odciągowym

5. WNIOSKI

Zastosowanie termografii w elektroenergetyce stało się niezastąpioną metodą pomiarową która kompleksowo diagnozuje poszczególne elementy systemu elektroenergetycznego. Zakres pomiarów obejmuje już nie tylko diagnostykę elementów wysokiego napięcia: transformatorów, wyłączników, kondensatorów, linii napowietrznych ale również silników i napędów elektrycznych. Coraz częściej termografię wykorzystuje się w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia. Podczas pomiarów ocenia się jakość połączeń oraz stan zużycia aparatury modułowej i rozdzielczej.

W opinii wielu fachowców i instalatorów przeważa pogląd że pomiary termowizyjne powinny być standardem dla określania stanu izolacji. Pojawia się również sugestia,

że powinny wejść na stałe do zasad i technik wykonywanych badań instalacji elektrycznych. Stworzy się wtedy dobre narzędzie prewencji w elektryce do zapobiegania niespodziewanej awarii.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Hanzelka Z.: „Jakość energii w zapisach kontraktu na dostawę energii elektrycznej”, IX Konferencja Naukowo – Techniczna JAW E’03, Świnoujście 2003
- [2] Praca zbiorowa pod redakcją Madury H.: *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Agenda Wydawnicza PAKu, Warszawa 2004
- [3] I.B. Lewitin.: *Infrakrasnaja tiechnika*, Leningrad 1973
- [4] G. Rudowski.: *Termowizja i jej zastosowanie*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978
- [5] T. Karwat.: *Termowizja - zasady ogólne, środowisko pomiarowe, budowa kamer, przykłady zastosowania*, www.elektro.info.pl
- [6] <http://www.biomed.eti.pg.gda.pl>
- [7] Michalski L., Bokersdorf K., Kucharski J.: *Termometria – Przyrządy i metody*, Politechnika Łódzka, Łódź 1998
- [8] <http://termowizja.biz>
- [9] Kuczyński K.: *Zastosowanie termowizji w diagnostyce urządzeń elektrycznych*, Elektro Info 3/2007
- [10] <http://www.infratec.de>
- [11] <http://www.vattenfall.pl>