



Marek Florkowski\*, Zbigniew Korendo\*

## **METODY PRZETWARZANIA OBRAZÓW TERMOWIZYJNYCH W DIAGNOSTYCE URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zastosowanie metod przetwarzania obrazów termowizyjnych do diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych. W szczególności rozważono analizę trendu termograficznego w diagnostyce odłączników wysokich i średnich napięć (WN/SN). Ponieważ zastosowanie zarówno bezpośredniego porównania temperatur jak i odejmowania „piksel-w-piksel” kolejnych termogramów nie jest możliwe, proponuje się nowe podejście, uwzględniające rozwiązanie zagadnienia kompensacji zmiennego obciążenia i warunków pomiarowych. Określono zbiór pewnych charakterystycznych współczynników niezmienniczych wraz z algorytmem wnioskującym opartym o system reguły (rozwiązanie opatentowane) jako metodę diagnozowania powstawania potencjalnych defektów. Dodatkowo przedstawiono algorytm automatycznej lokalizacji analizowanych elementów konstrukcyjnych urządzenia w sekwencji termogramów na przykładzie odłączników. Proponowane rozwiązanie pozwala na równoczesną analizę trendu i lokalizację defektu.

**Słowa kluczowe:** termowizja, przetwarzanie obrazów, diagnostyka

### **1. Wstęp**

Badania termowizyjne urządzeń elektroenergetycznych zyskują coraz większą popularność jako metoda badań nieniszczących, a przede wszystkim bezkontaktowych, co pozwala na zastosowanie ich pod obciążeniem. Wiele defektów może być uwidocznione poprzez pomiary dokonane w podczerwieni zanim stan będzie krytyczny. Najczęściej spotykane defekty możliwe do wykrycia metodami termowizyjnymi to wadliwe połączenia (poluzowane lub skorodowane przyłącza kablowe, wadliwe złącze nożowe

---

\* ABB Corporate Research, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, e-mail: [marek.florkowski@pl.abb.com](mailto:marek.florkowski@pl.abb.com)

odłączników, złącze tulipanowe wyłącznika), grzanie indukcyjne (efekty prądów wirowych), zwarcia międzyzwojowe, wadliwa cyrkulacja oleju w radiatorach transformatorowych, uszkodzenia przełącznika zaczepów i inne [1, 4]. Zwykle warunkiem wstępnym do wykonania inspekcji termowizyjnej jest aby badany obiekt pracował pod obciążeniem minimum 30% wartości nominalnej.

W artykule rozważane jest zagadnienie diagnostyki termograficznej urządzeń WN/SN ze szczególnym uwzględnieniem problemu kompensacji zmiennego punktu pracy danego urządzenia jak i warunków pomiarowych. Dodatkowo przedstawiono algorytm automatycznej lokalizacji analizowanych elementów konstrukcyjnych urządzenia dla odłączników. Większość stosowanych obecnie metod inspekcji termowizyjnej pozwala na bieżącą ocenę stanu urządzenia, jednak bez wykorzystania danych z pomiarów dokonanych w przeszłości (historii termalnej). Stan danego obiektu określany jest na podstawie jednego lub wielu termogramów zarejestrowanych podczas danej sesji inspekcyjnej. Fakt, że nie korzysta się z danych zgromadzonych w przeszłości jest spowodowany tym, że faktyczny rozkład temperatur na powierzchni obiektu jest silnie zależny od szeregu czynników niezwiązanych z obecnością/rozwojem defektu. Tak więc bezpośrednie porównanie temperatur pomiędzy termogramami tego samego obiektu zarejestrowanymi w różnych warunkach pracy nie jest możliwe. Zmierzona poprzez kamerę termowizyjną temperatura odzwierciedla nie tylko stan obiektu ale w równie dużym stopniu warunki pracy (aktualne obciążenie) oraz warunki zewnętrzne w czasie pomiaru — nasłonecznienie, temperatura powietrza, wiatr, opady i inne. Zatem rozkład temperatur otrzymany z pomiarów termowizyjnych danego obiektu bez defektu w różnych warunkach może w rzeczywistości bardzo się różnić. Szereg czynników (np. wiatr) nie jest jednak mierzalnych w stopniu pozwalającym na kompensację metodami analitycznymi. Niektórzy autorzy proponują analityczne bądź też eksperymentalne metody kompensacji zmian obciążenia [2, 3].

Kolejna trudność w przetwarzaniu sekwencji termograficznych wiąże się ze zmienną pozycją kamery w trakcie poszczególnych pomiarów „z ręki”. Nawet nieznaczne różnice w orientacji kamery względem mierzonego obiektu powodują różnice w kadrowaniu (obroty, przesunięcia), tak więc automatyczne porównanie „piksel-w-piksel” (np. odejmowanie kolejnych termogramów) jest niemożliwe. Proponowanym sposobem obejścia tej niedogodności jest wstępne wskazanie obszarów krytycznych dla oceny stanu obiektu, przez co ich faktyczna pozycja na kolejnych termogramach przestaje mieć znaczenie.

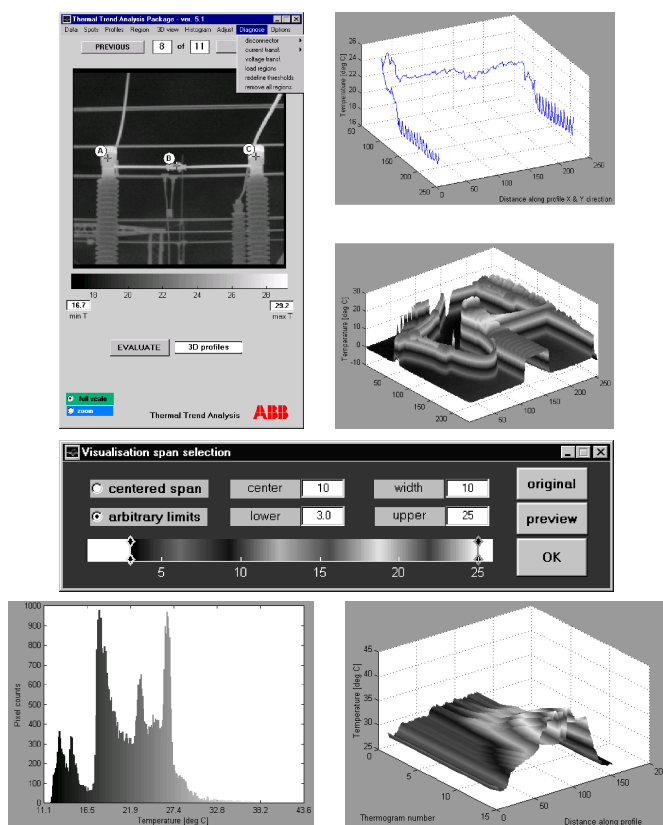
Szeroko stosowanym rozwiązaniem w diagnostyce termowizyjnej jest analiza delty temperatur pomiędzy diagnozowanym komponentem a innym, identycznie obciążonym, jako poziomem referencyjnym. Taką procedurę powszechnie stosuje się w analizie urządzeń pracujących w układzie trójfazowym.

## 2. Cel badań i stosowane narzędzia

Celem badań jest opracowanie podejścia umożliwiającego analizę danych termograficznych niezależnie od wpływu zmian obciążenia i warunków zewnętrznych w czasie pomiaru. Jest to szczególnie istotne dla analizy trendu termograficznego, gdzie

podstawą jest określenie niezależnego poziomu referencyjnego, wspólnego dla całej sekwencji danych.

Wszystkie pomiary termograficzne wykorzystane w prezentowanych badaniach wykonane zostały za pomocą chłodzonej kamery termowizyjnej firmy Inframetrics, model PM280E z detektorem matrycowym FPA pracującym w zakresie długofalowym. Pomiary dokonano na szeregu podstacji 110/30/15 kV, zarówno przemysłowych (zakładowych), jak i podlegających zakładom energetycznym. Każdorazowo odnotowano bieżące obciążenie i warunki zewnętrzne w czasie pomiaru. Większość pomiarów została przeprowadzona we wczesnych godzinach rannych w celu wyeliminowania wpływu napromienienia słonecznego w ciągu dnia. Do analizy trendu termicznego (sekwencji termogramów) opracowano w Centrum Badawczym ABB w Krakowie pakiet oprogramowania TTEP (Thermal Trend Analysis Package — rys. 1) pracujący w środowisku MATLAB®. Pakiet zawiera, obok algorytmów do analizy trendu, narzędzia do wizualizacji 3D, profile temperaturowe (także 3D) oraz możliwość lokalnej korekcji emisyjności.



Rys. 1. Pakiet oprogramowania Thermal Trend Analysis Package (TTEP)

## 2.1. Zakres badań

Badania trendu termograficznego przeprowadzono na wybranych typach urządzeń elektroenergetycznych WN/SN. W szczególności bardziej szczegółowo potraktowano odłączniki WN/SN, jako że ich uszkodzenia stanowią większość ogółu defektów możliwych do zdiagnozowania termowizyjnie na terenie podstacji elektroenergetycznych. Ze względu na różnice w konstrukcji i sposobie działania w każdym obiekcie wyróżnić można inne charakterystyczne obszary, w których może wystąpić defekt. Na te miejsca należy zwrócić szczególną uwagę przy analizie termograficznej. Aby zidentyfikować te obszary autorzy przeanalizowali liczne dane spośród zgromadzonej bazy pomiarów termowizyjnych.

## 2.2. Proponowane rozwiązanie

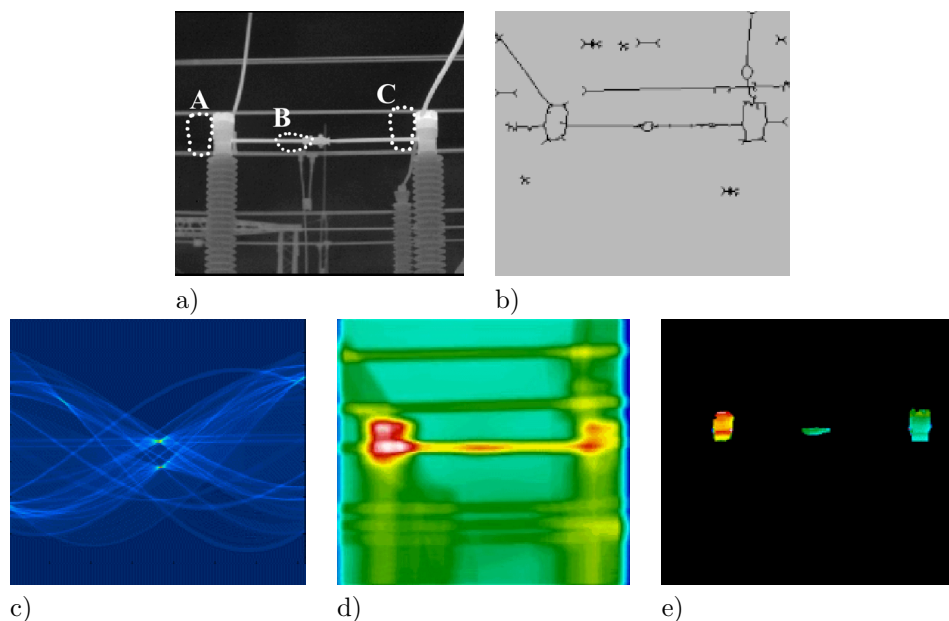
Zdecydowana większość defektów spotykanych w odłącznikach WN/SN zlokalizowana jest na jednej z głowic (przyłącza kablowe/szynowe) bądź w obszarze zestyku. Uzasadnione jest więc skoncentrowanie uwagi na tych elementach, aby wykryć powstawanie potencjalnego defektu.

W proponowany rozwiązaniu wykorzystuje się fakt, że skoro konstrukcyjnie odłącznik cechuje się pełną symetrią podobnie symetrycznie powinna przedstawiać się wymiana ciepła, a tym samym rozkład temperatur na powierzchni. Ponieważ wszystkie obszary krytyczne w odłączniku stanowią wspólny tor prądowy więc w stanie normalnym zmiana obciążenia skutkuje zmianą produkcji ciepła proporcjonalną do rezystancji połączeń. Ze względu na wspomnianą symetrię prowadzi to do symetrycznego rozkładu temperatur, chyba że w którymś z wyróżnionych obszarów nastąpiła zmiana rezystancji, co wskazywało by na powstanie defektu. To samo dotyczy zmian warunków zewnętrznych, jako że cały odłącznik poddany jest działaniu tych samych czynników w danej chwili. W związku z tym proponuje się rozważyć wzajemne relacje pomiędzy wskazanymi obszarami krytycznymi na powierzchni obiektu. W przypadku odłączników WN/SN są to przyłącza kablowe oraz zestyk główny. Istotą proponowanego podejścia jest zastosowanie stosunków termalnych jako współczynników niezmienniczych względem zmian obciążenia i warunków zewnętrznych. W pierwszym kroku należy wskazać wybrane obszary krytyczne (np. poprzez obrysowanie ich konturów), zależne od typu diagnozowanego obiektu. Ponieważ zostają one bezpośrednio wskazane więc ich położenie w poszczególnych termogramach (kadrowanie) nie ma znaczenia. W dalszej części artykułu przedstawiony zostanie algorytm automatycznego wyznaczania powyższych obszarów. W przypadku odłączników WN/SN definiujemy trzy obszary (A, B, C), tak jak to pokazano na rys. 2a.

Następnie dla każdego ze zdefiniowanych obszarów wyznacza się pewną wielkość charakteryzującą lokalnie strumień wymiany ciepła. Dla obszarów identycznych pod względem konstrukcji odpowiedni strumień wymiany ciepła z otoczeniem będzie identyczny. Można przyjąć [5], że wielkość ta odpowiada pewnej funkcji rozkładu temperatury w analizowanym obszarze, przez autorów zwaną temperaturą charakterystyczną. Może to być np. mediana, która pozwala na wyeliminowanie zakłóceń (np. punktowe skoki temperatur, pojedyncze piksele tła). W rezultacie, w przypadku odłącznika, otrzymujemy trzy temperatury charakterystyczne: a, b, c. Wówczas zbiór

współczynników niezmienniczych  $tif_i$  określony jest jako proporcje:

$$tif_1 = a/b; \quad tif_2 = c/b; \quad tif_3 = a/c \quad (1)$$



**Rys. 2.** Kolejne etapy algorytmu automatycznej lokalizacji elementów konstrukcyjnych urządzenia na przykładzie odłącznika 110 kV: a) wybór obszarów krytycznych w odłączniku; b) obraz krawędziowy z wyodrębnionymi domkniętymi regionami; c) detekcja toru prądowego za pomocą transformacji Radona; d) obraz konwolucyjny z maską reprezentująca predefiniowane wzorce; e) rezultat automatycznej lokalizacji obszarów krytycznych

Powyższą procedurę stosujemy dla wszystkich termogramów w zarejestrowanej sekwencji tworząc w ten sposób ciąg 3-elementowych wektorów  $tif_i$ . W stanie poprawnym wartość współczynnika  $tif_3$  powinna być bliska bądź równa jedności (identyczne własności cieplne), natomiast pozostałe dwa współczynniki należy znormalizować względem współczynników dla pierwszego pomiaru w sekwencji. Samo wnioskowanie diagnostyczne oparte jest na obliczonych uprzednio współczynnikach niezmienniczych  $tif_i$ . Kolejnym krokiem jest zadanie arbitralnych progów alarmowego i ostrzegawczego, które określają granice zmienności współczynników  $tif_i$ . Konkretnie wartości progów ustalono na podstawie analizy dużej populacji danych pomiarowych. Stwierdzono, że w stanie normalnym wartość znormalizowanych współczynników niezmienniczych waha się w granicach maksimum  $\pm 5\%$  (próg ostrzegawczy), natomiast próg alarmowy określono na 10% dla tej klasy obiektów. Następnie należy zdefiniować zbiór reguł postaci *jeżeli-to*, których argumentami są współczynniki  $tif$  oraz progi graniczne. Reguły te określają wszystkie możliwe kombinacje relacji pomiędzy współczynnikami niezmienniczymi, a progami. Wnioskiem każdej reguły jest 3-stopniowy stan obiektu

({OK, UWAGA, ALARM}) oraz określenie miejsca ewentualnego defektu (głowica lewa, zestyk, głowica prawa). Przykładowo:

**JEŻELI**  $tif_1 > alarm$  **ORAZ**  $tif_3 > alarm$  **TO** {głowica lewa jest w stanie: alarm} (2)

W miarę gromadzenia kolejnych danych pomiarowych i wyznaczania współczynników niezmienniczych, z czasem otrzymujemy linię trendu, która określa rozwój stanu obiektu w sposób niezależny od czynników takich jak obciążenie, czy warunki zewnętrzne. Z analizy przebiegu możemy uzyskać informację nie tylko na temat stanu bieżącego, ale również oszacować tempo rozwoju defektu. Zastosowanie wnioskowania opartego na zbiorze reguł daje możliwość zaimplementowania wiedzy i doświadczenia termografa, nie zawsze dających się ująć w sztywne ramy formuł analitycznych. Ponadto bazę taką można w łatwy sposób rozbudowywać w miarę zdobywania nowych doświadczeń.

### 2.3. Algorytm automatycznej lokalizacji obszarów krytycznych

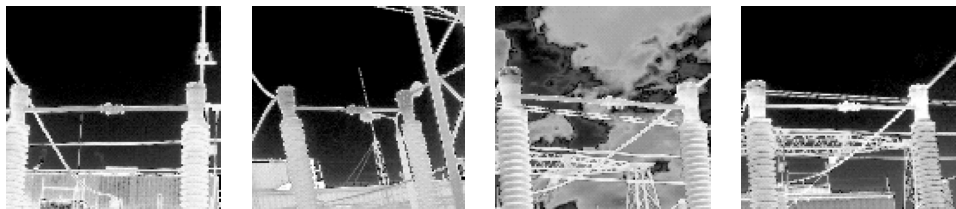
Procedura automatycznej lokalizacji obszarów krytycznych w sekwencji termogramów jest narzędziem w znacznym stopniu ułatwiającym pracę operatora oraz umożliwiającą implementację algorytmu analizy trendu w pełni automatycznych urządzeniach monitoringowych.

Poprawny wybór obszarów krytycznych dla diagnozowanego obiektu ma zasadnicze znaczenia dla algorytmu analizy trendu w sekwencji termogramów. O ile przy ręcznym wskazaniu i obrysowaniu konturów nie ma zwykle większych problemów, to podczas automatycznej lokalizacji elementów konstrukcyjnych w termogramie procedura ta jest dość skomplikowana. Główna trudność polega na takiej konstrukcji algorytmu aby proces rozpoznawania był jednoznaczny i powtarzalny, niezależnie od widocznych często w ekspozycji podobnych elementów konstrukcyjnych należących do obiektów sąsiednich lub znajdujących się w tle obrazu.

W pierwszym etapie w zlogarytmowanym obrazie zostają wydzielone krawędzie stosując zmodyfikowany laplasjan z przejściem przez zero (rys.2b). Na obrazie krawędziowym zostają następnie wykonane operacje morfologiczne celem domknięcia wyodrębnionych regionów. Dla znalezienia w obrazie linii toru prądowego zastosowano transformację Radona, polegająca na zrzutowaniu pikseli obrazu wzdłuż zadanej osi (rys. 2c). W wyniku wykonania konwolucji obrazu z maską reprezentującą predefiniowane wzorce głowic i styku uzyskuje się współrzędne występowania tych elementów w obrazie (rys. 2d). Kolejnym krokiem jest wypełnienie obszarów wokół zlokalizowanych punktów, które przy poprawnej detekcji winny znajdować się wewnątrz domkniętych konturów obrazu krawędziowego. Otrzymany w ten sposób obraz binarny zawiera wyodrębnione obszary krytyczne, które po zmaskowaniu z obrazem oryginalnym odtworzą „zawartość termiczną” w obszarze głowic i styku nożowego (rys. 2e). Jako temperaturę charakterystyczną wykorzystywaną następnie w algorytmie analizy trendu przyjmuje się medianę z wyznaczonych obszarów krytycznych.

## 2.4. Przykład

Jako przykład rozważmy sekwencję 11 pomiarów dokonanych na powszechnie spotykanym odłączniku 110 kV (rys. 3).



Rys. 3. Wybrane termogramy z zarejestrowanej sekwencji pomiarów odłącznika 110 kV

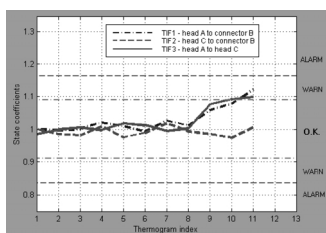
Pomiarów dokonano przy znacznym zróżnicowaniu zarówno obciążenia jak i warunków zewnętrznych (tab. 1). Należy zwrócić uwagę, że na każdym z termogramów badany odłącznik jest skadowany nieco inaczej.

Tabela 1. Obciążenie i temperatura powietrza w czasie kolejnych pomiarów

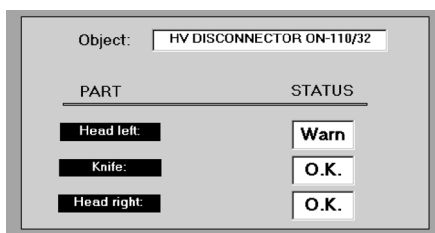
Termogram	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Obciążenie [A]	390	415	455	370	500	440	385	365	470	390	430
Temp. pow. [°C]	16	23	16	18	12	15	20	25	19	23	20

Niemożliwe jest więc ustawienie markera w danym punkcie i automatyczne wyświetlenie temperatury w całej sekwencji (raz trafimy w pole głowicy, innym razem w tło) nie mówiąc już o obliczeniu gradientu zmian temperatur jako różnic „piksel-w-piksel” pomiędzy kolejnymi pomiarami.

Postępując według procedury opisanej powyżej obliczono ciąg współczynników niezmienniczych  $tif_i$ . Rysunek 4a przedstawia obliczony w programie TTEP przebieg zmian  $tif_i$ .



a)



b)

Rys. 4. a) obliczony (TTEP) przebieg zmian współczynników  $tif_i$ ; b) rezultat wnioskowania diagnostycznego (TTEP)

Po zastosowaniu aparatu wnioskującego stwierdzono, że lewy zacisk kablowy osiągnął stan ostrzegawczy (rys. 4b) i stosunkowo szybko zmierza do stadium alarmowego. Trzeba zatem w możliwie bliskim terminie dokonać naprawy.

Reasumując należy podkreślić, że metoda uwzględniająca trend zmian pozwala lepiej ocenić istotność defektu, gdyż uwzględnia nie tylko bieżący stan, ale także tempo rozwoju defektu.

## Literatura

- [1] **Hurley T.L.:** *Infrared qualitative inspections for electric utilities*, in Proc. SPIE Vol. 1313 Thermosense XII, 1990
- [2] **Nielsen T., Sorensen J.:** *Guidelines to thermographic inspection of electrical installations*, in Proc. SPIE Vol. 2245 Thermosense XVI, 1994
- [3] **Grover P.:** *Applying temperature standards to IR inspections of electrical systems*, Maintenance Technology, October 1993, pp. 31–36
- [4] **Kaplan H.:** *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*, SPIE Optical Engineering Press, 1992
- [5] **Madding B.:** *High voltage switchyard thermography case study*, in Proc. SPIE Vol. 3361 Thermosense

### APPLICATION OF INFRA RED IMAGE PROCESSING TECHNIQUES TO DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL POWER EQUIPMENT

In the paper the application of infrared image processing techniques to diagnostics of electrical power equipment is considered with special focus on varying load/ambient compensation in a sequence of thermograms. The concrete application area is the trend analysis for HV/MV disconnectors condition assessment. As neither the direct temperature comparison nor thermograms subtraction is possible a new approach is proposed. A set of characteristic invariant factors with a rule-based reasoning algorithm are defined as a patent pending method for diagnosing possible defect development. The proposed approach allows for both trending and defect localization. An experimental example demonstrates the feasibility of the proposed approach.