

# Weryfikacja wyników badań wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej w transformatorach energetycznych

Jerzy Buchacz, Marcin Wawrzynosek

## 1. Wprowadzenie

Wyładowania niezupełne występują w izolacji transformatorów już na etapie prób fabrycznych. Istotny jest poziom ich intensywności mierzony w jednostkach ładunku pozornego, który nie powinien przekraczać ustalonej wartości progowej (zwykle 100 pC dla transformatorów z izolacją papierowo-olejową). Zjawisko to może być groźne, ponieważ z reguły występuje z innymi rodzajami defektów izolacji, np. przegrzaniem. W miejscach o wysokiej temperaturze mogą powstawać wyładowania niezupełne, których działanie będzie powodować osłabienie izolacji, prowadząc do rozwoju wyładowań o większej energii, a w końcu iskrzeń i przebiecia. Określenie wielkości ładunku pozornego w transformatorze w eksploatacji przy pomocy metody elektrycznej jest kłopotliwe, ponieważ wymaga wyłączenia jednostki w celu montażu miernika, a następnie zasilenia z zewnętrznego generatora WN (gdy badanie ma być przeprowadzone zgodnie z normą [1]) lub sieci.

Dlatego też często stosuje się inne metody pomiaru, nie wymagające wyłączania jednostki – badanie sondą UHF [2 – 5] lub badanie emisji akustycznej, generowanej przez wnz [6].

## 2. Metoda emisji akustycznej (EA)

Metoda EA polega na pomiarze parametrów fali ciśnienia akustycznego powstającej w chwili wyładowania. Fala rozchodzi się we wszystkich kierunkach od miejsca powstania i odbierana jest przez czujnik piezoelektryczny umieszczony na ścianie kadzi transformatora. Przy ocenie intensywności wnz metodą EA zwykle bierze się pod uwagę liczbę i amplitudę odbieranych impulsów. Ze względu na tłumienie fali wewnątrz kadzi przez materiały konstrukcyjne występujące na jej drodze niemożliwa jest bezwzględna ocena intensywności,

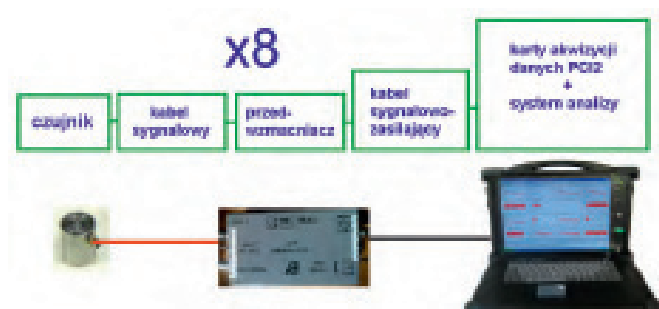
**STRESZCZENIE:** W artykule omówiono badania transformatorów metodą emisji akustycznej oraz sposoby interpretacji i weryfikacji ich wyników przy pomocy termowizji i analizy chromatograficznej gazów rozpuszczonych w oleju. Opisano rzeczywiste przypadki łącznego wykorzystania tych metod w celu precyzyjnego określenia przyczyn generacji emisji akustycznej w transformatorach i stopnia zagrożenia ich eksploatacji przez wyładowania niezupełne. Wskazano na niestandardowe możliwości zastosowania metody emisji akustycznej do wykrywania w kadzi transformatora miejsc o podwyższonej temperaturze.

**SŁOWA KLUCZOWE:** wyładowania niezupełne, transformatory, analiza chromatograficzna, DGA, metoda emisji akustycznej, termowizja

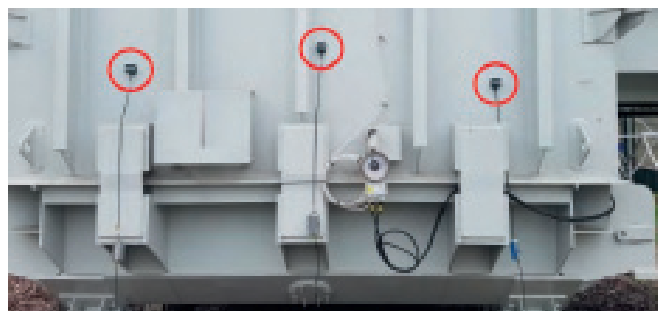
## PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS IN POWER TRANSFORMERS BY ACOUSTIC EMISSION METHOD – VERIFICATION OF RESULTS

**ABSTRACT:** The article discusses tests of transformers using the acoustic emission method and methods of interpretation and verification of their results using thermal imaging and DGA analysis of gases dissolved in the oil. Real cases of combined usage of these methods are described in order to precisely determine the causes of acoustic emission generation in transformers and the degree of risk of their operation posed by partial discharges. Non-standard possibilities of using the acoustic emission method for detecting places with increased temperature in the transformer tank were indicated.

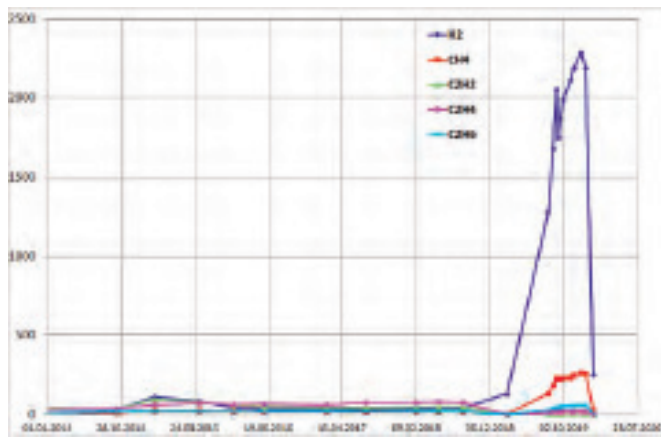
**KEYWORDS:** partial discharges, transformers, DGA, acoustic emission method, thermal imaging



Rys. 1a. Tor pomiaru wnz metodą akustyczną



Rys. 1b. Położenie czujników na kadzi



Rys. 2a. Przyrost gazów w tr. 160 MVA

a szczególnie przeliczenie/odniesienie do wyników otrzymanych metodą elektryczną. Dlatego też metoda EA używana jest głównie do określenia miejsca położenia źródła wnz, przy czym stosuje się równoczesną rejestrację sygnałów z co najmniej 4 (zwykle 8) czujników (rys. 1a), umieszczonych na kadzi w punktach o znanych współrzędnych (rys. 1b).

Badanie wylądowań niezupełnych w kadzi transformatora metodą emisji akustycznej przeprowadzane jest w przypadkach, gdy wyniki analizy chromatograficznej gazów rozpuszczonych w oleju wykazują obecność charakterystycznych dla wnz gazów, których stężenia przekraczają limity uznawane za typowe w 90% populacji transformatorów [7] (tab. 1).

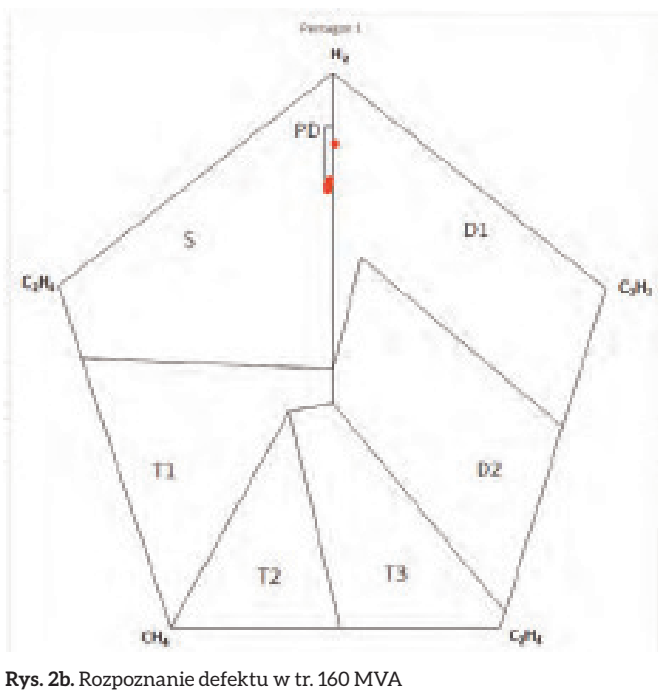
Tabela 1. Typowe wartości stężeń gazów wg RIET 2022

Gazy wydzielone z oleju	Stężenia gazów [ppm] w stosunku do objętości oleju	
	transformator blokowy	transformator sieciowy
H <sub>2</sub> - wodór	220	00
CH <sub>4</sub> - metan	200	180
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> - etan	160	170
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - etylen	210	220
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> - acetylen	20	70
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> - propan	60	60
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> - propylen	60	70
CO - tlenek węgla	450*	480*
CO <sub>2</sub> - dwutlenek węgla	7000*	5000*

\*Uwaga: w praktyce spotykane są również znacznie wyższe stężenia tlenków węgla; wartość stosunku CO<sub>2</sub>/CO poniżej 3 może świadczyć o nadmiernej degradacji papieru

### 3. Lokalizacja źródła wylądowań niezupełnych

Typowa procedura lokalizacji źródła wnz została przedstawiona na przykładzie badań transformatora o mocy 160 MVA i napięciach 220/31,8 kV. Po ponad 30 latach eksploatacji jednostki przeprowadzono jej remont, w czasie którego wymieniono izolatory górnego napięcia na nowe. Po kilku miesiącach pracy nastąpił wzrost stężenia gazów, szczególnie wodoru,



Rys. 2b. Rozpoznanie defektu w tr. 160 MVA

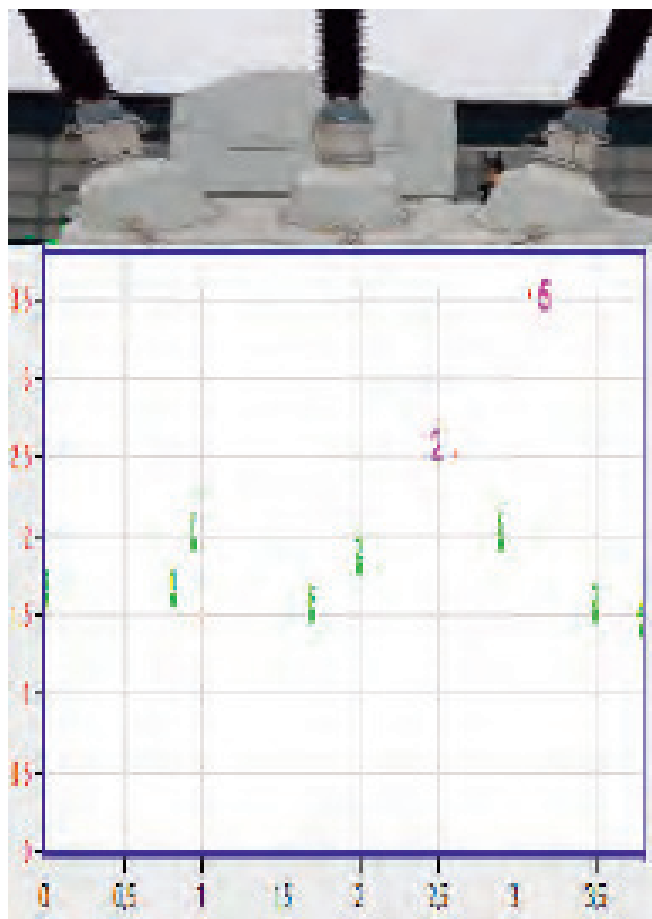


Rys. 3. Obraz wykładowań otrzymany przy pomocy czujnika TEV oraz ocena ekspercka

wykryty podczas okresowej analizy DGA. Badanie kolejnych próbek oleju wykazało utrzymujący się przyrost zawartości gazów, szczególnie wodoru i metanu (rys. 2a). Diagnoza, oparta m.in. na metodzie IEC oraz Duvala\*, wskazywała, że przyczyną powstawania gazów są wyładowania niezupełne (rys. 2b).

\*oznaczenia przyczyn wydzielenia gazów:

- PD – wyładowania niezupełne typu koronowego
- D1 – wyładowania iskrowe o niskiej energii
- D2 – wyładowania iskrowe o dużej energii
- T1 – przegrzanie niskotemperaturowe  
–  $T < 300^{\circ}\text{C}$
- T2 – przegrzanie średniotemperaturowe  
–  $300^{\circ} < T < 700^{\circ}\text{C}$
- T3 – przegrzanie wysokotemperaturowe  $T > 700^{\circ}\text{C}$
- T3-H – przegrzanie T3 tylko w oleju
- DT – usterka złożona: przegrzanie + wyładowania



Rys. 4a. Lokalizacja źródeł EA

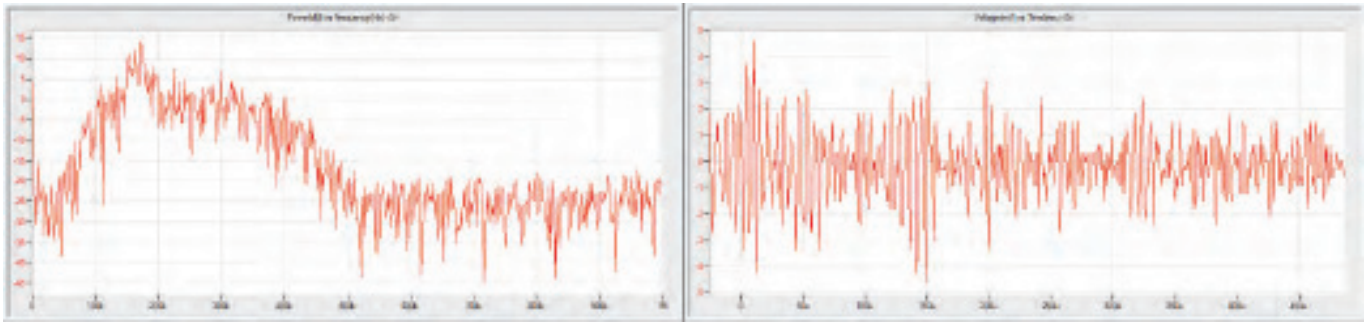


Rys. 4b. Defekt ujawniony podczas rewizji

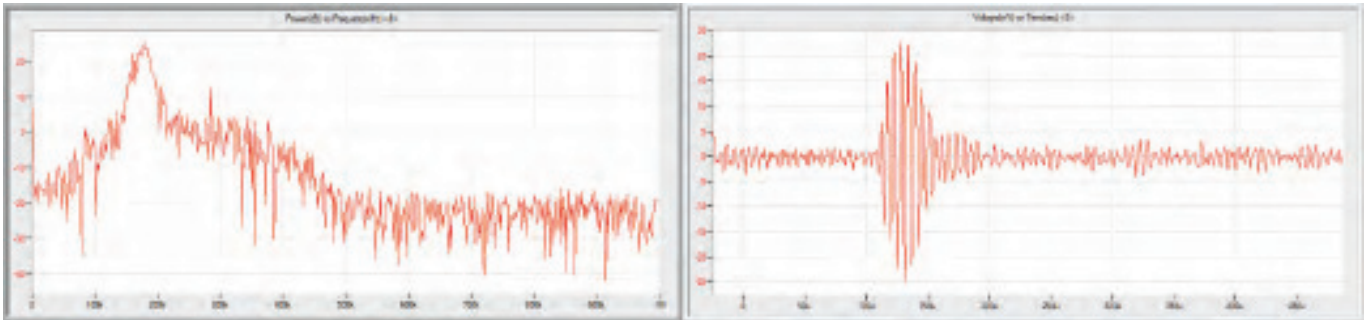
- S – gazowanie pasożytnicze (temp.  $< 200^{\circ}\text{C}$ )
- O – przegrzanie o temp.  $< 250^{\circ}\text{C}$
- C – możliwa karbonizacja papieru

Badanie metodą EA wykazało istnienie kilku źródeł wnz. Dla upewnienia się, że emisja akustyczna powstaje wskutek wyładowań przeprowadzono pomiar weryfikacyjny, metodą elektryczną, przy pomocy sondy wykrywającej impulsy napięcia doziemnego TEV (Transient Earth Voltage) w zakresie częstotliwości  $100\text{ kHz} \div 1\text{ GHz}$  [8, 9].

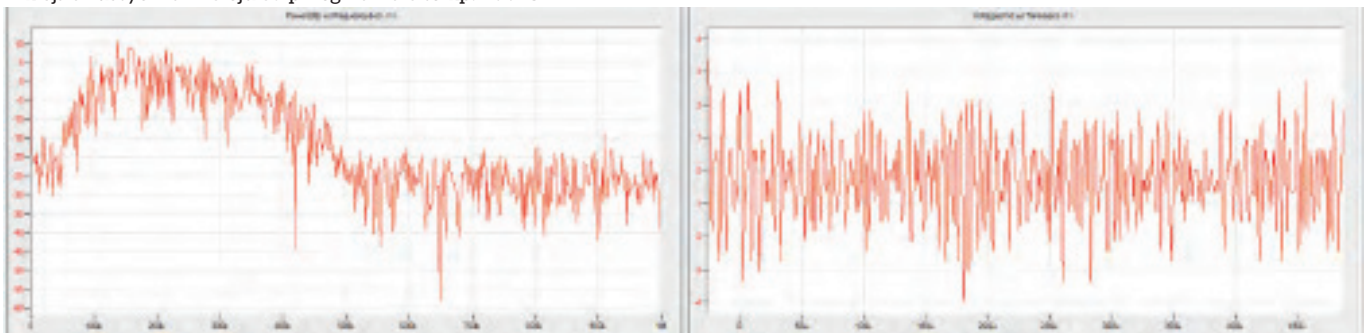
Emisja akustyczna od wnz oraz efektów cieplnych



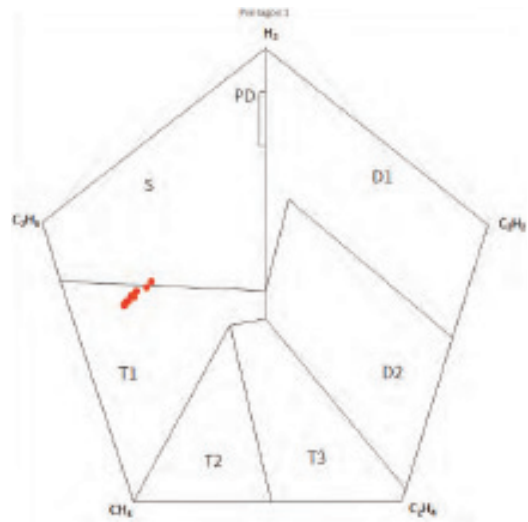
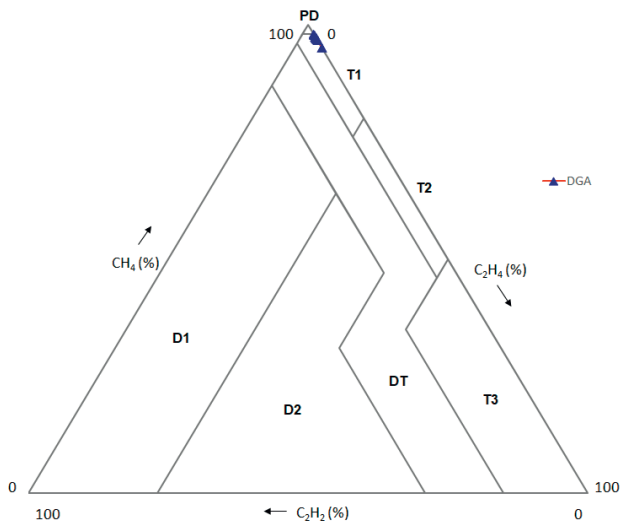
Emisja akustyczna generowana przez wnz



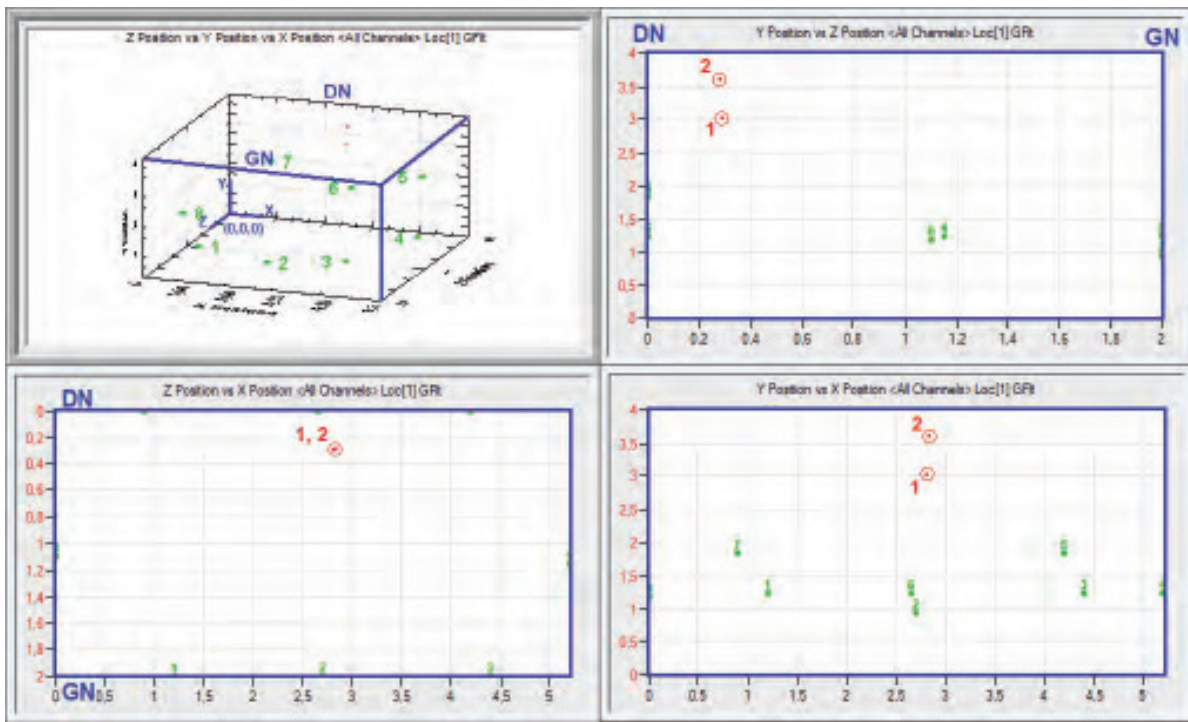
Emisja akustyczna w oleju od przegrzania o temp. 200°C



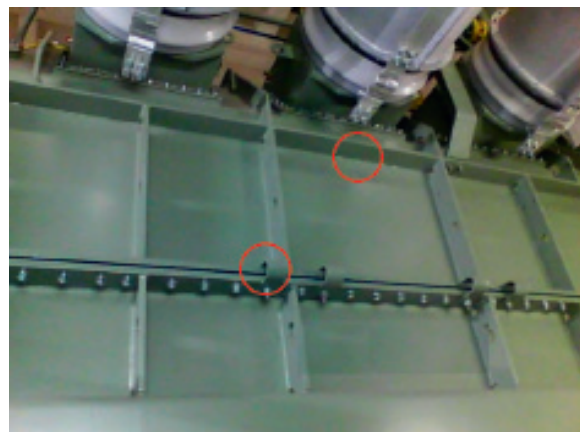
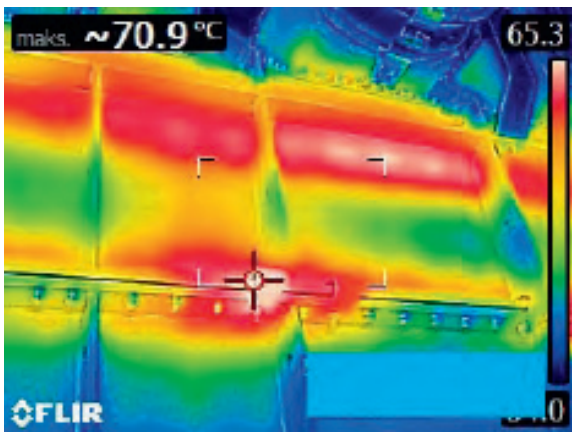
**Rys. 5.** Widmo gęstości mocy oraz przebieg sygnału emisji akustycznej



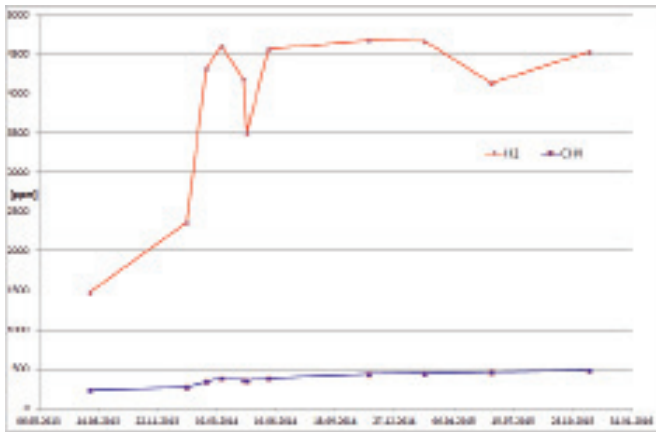
Rys. 6. Diagnoza defektu metodą trójkąta i pięciokąta Duvala



Rys. 7. Lokalizacja termicznego źródła emisji akustycznej



Rys. 8. Obraz termowizyjny gorących punktów u góry kadzi, strona DN



Rys. 9. Stężenie wodoru i metanu w oleju tr. 63 MVA na przestrzeni 5 lat

Zarejestrowano impulsy o maksymalnym ładunku pozornym 1950 pC, określone przez program ekspercki jako powtarzające się wyładowania (rys. 3).

Po analizie danych uzyskanych przez rejestrator emisji akustycznej, określono prawdopodobne położenie źródła wnz (rys. 4a), a następnie przeprowadzono rewizję (która wymagała częściowego upuszczenia oleju z kadzi). We wskazanym miejscu wykryto uszkodzoną izolację przewodu łączącego uzwojenie z izolatorem (rys. 4b).

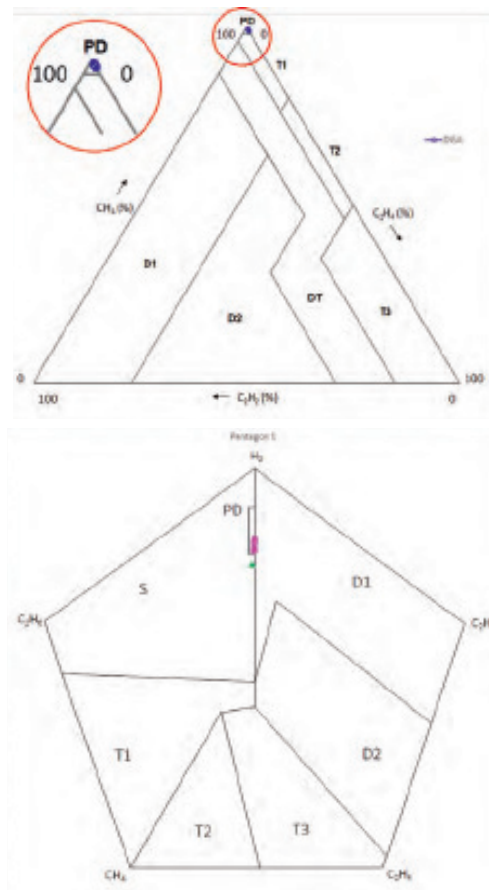
#### 4. Analiza emisji akustycznej vs. diagnoza DGA

Wyładowania niezupełne nie są jedynym źródłem emisji akustycznej w kadzi transformatora. Oprócz zjawisk fizycznych, związanych z zasadą pracy transformatora, takich jak magnetostrykcja czy też szumy Barkhausena, istotnym źródłem efektów akustycznych są zjawiska cieplne – grzanie elementów konstrukcyjnych i oleju [10, 11]. Ponieważ efekty te mogą występować równocześnie z wyładowaniami, potwierdzenie występowania wnz obarczone jest dużą niepewnością. W takich przypadkach wyniki badania wnz metodą akustyczną muszą być weryfikowane przez inne metody: analizę chromatograficzną oleju oraz badanie termowizyjne. Pomocna jest również analiza kształtu sygnału akustycznego (rys. 5).

Gdy emisja akustyczna pochodzi od przegrzania, nadal istnieje możliwość lokalizacji jej źródeł. Przykładem są wyniki badań transformatora blokowego o mocy 150 MVA, 220/13,8 kV, w którym na przestrzeni kilku lat obserwowano ciągły przyrost zawartości gazów w oleju, w tym szczególnie węglowodorów nasyconych: etanu i propanu. Analiza metodą trójkąta Duvala wskazywała na możliwe wyładowania niezupełne lub

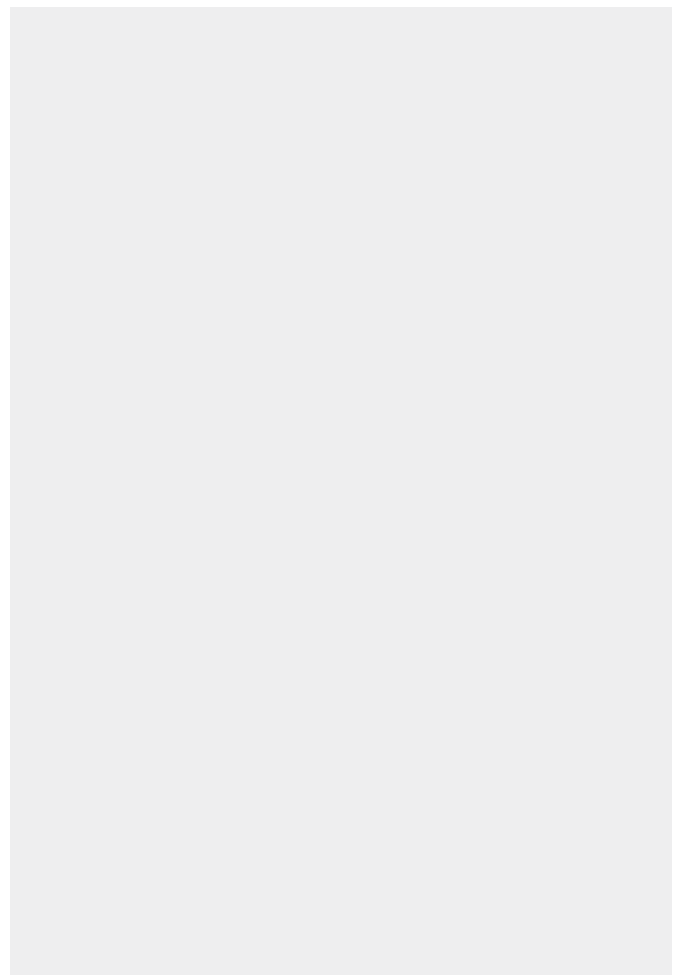
Tabela 2. Wyniki laboratoryjnej próby wydzielenia gazów z oleju pobranego z transformatora 63MVA/115kV w temp. 100°C (po jego wcześniejszym odgazowaniu)

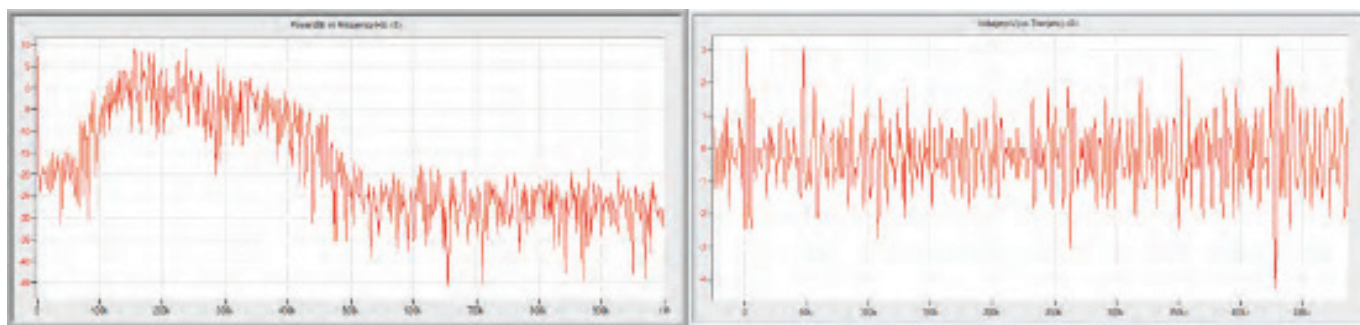
Materiały	Stężenie gazu w oleju [ppm]								
	H <sub>2</sub> wódór	CH <sub>4</sub> metan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> etan	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> etylen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> acetylen	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> propan	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> propylen	CO tlenek węgla	CO <sub>2</sub> dwutlenek węgla
olej	237	12	1	2	0	1	4	517	2776
olej + materiały konstrukcyjne	426	128	86	13	0	58	14	964	6908



Rys. 10. Ocena rodzaju defektu metodą Duvala

reklama





Rys. 11. Szum akustyczny w transformatorze 63MVA

przegrzanie niskotemperaturowe T1, metoda pięciokątów wskazywała na przegrzanie o temp. poniżej 300°C (rys. 6).

Przy użyciu metody emisji akustycznej zlokalizowano źródło przegrzań (rys. 7), u góry kadzi, blisko jej ściany, po stronie DN.

Wskazane miejsce EA pokrywało się z obrazem termowizyjnym najgorętszych punktów na kadzi transformatora.

### 5. Wyładowania niezupełne a gazowanie pasożytnicze w oleju

Okresowe analizy DGA oleju transformatora 63 MVA/115 kV, przeprowadzone na przestrzeni 5 lat wykazywały bardzo wysokie stężenie wodoru oraz metanu (rys. 9), a metody interpretacji wyników IEC oraz Duvala wskazywały na występowanie wyładowań niezupełnych (rys. 10).

Badanie przeprowadzone metodą emisji akustycznej nie wykazało obecności wyładowań niezupełnych – poziom sygnału był niski, a kształt przebiegu nie zawierał impulsów charakterystycznych dla wnz (rys. 11).

Przyczyną niepokojących stężeń gazów był olej, który charakteryzował się szczególną skłonnością do tworzenia się gazów dodatkowych, nie związanych z uszkodzeniem. Przeprowadzone w laboratorium Energopomiar-Elektryka eksperymenty (tab. 2) udowodniły, że dla pewnych typów olejów sama stosunkowo niska temperatura inicjuje generację dużych ilości gazów tzw. pasożytniczych [7], która może być dodatkowo zwiększona przez wpływ niekompatybilności oleju i materiałów konstrukcyjnych użytych do budowy transformatora.

Wg metody trójkąta 1 (rys. 12a), przyczynami powstania gazów są:

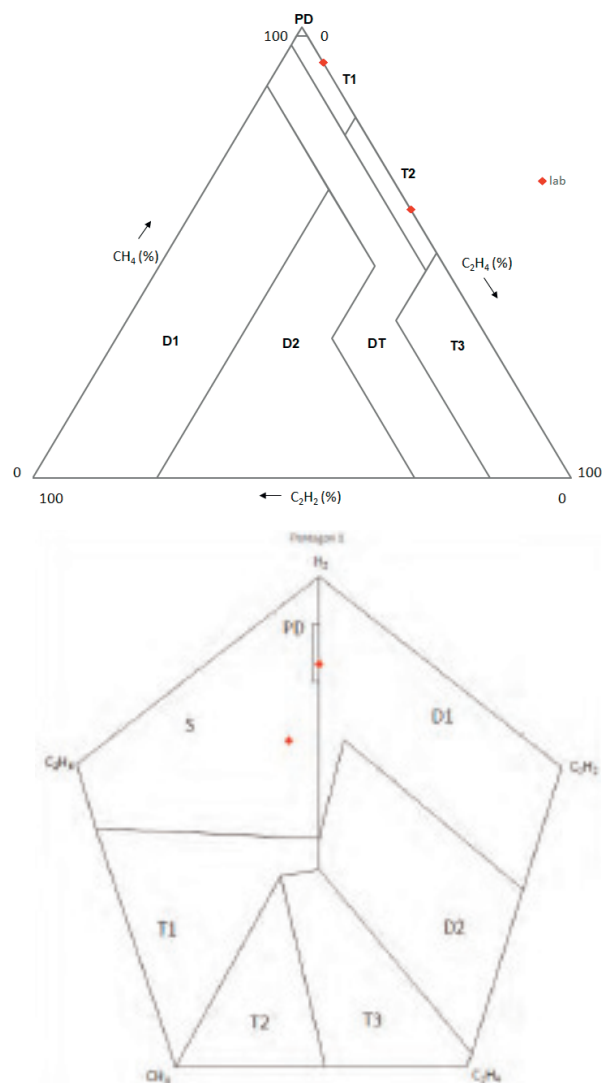
- przegrzanie T1 o temp. poniżej 300°C (olej)
- przegrzanie T2 o temp. w zakresie. 300 ÷ 700°C (olej + materiały)

a wg Pięciokąta 1 (rys. 12b) odpowiednio: wyładowania niezupełne i gazowanie pasożytnicze.

Przytoczony przykład wskazuje, że dla potwierdzenia obecności wyładowań niezupełnych trzeba uwzględnić właściwości oleju i wykonać odpowiednie próby w laboratorium.

### 6. Podsumowanie


Metoda emisji akustycznej sprawdza się przy wykrywaniu i lokalizacji źródeł emisji w transformatorach, która pochodzi nie tylko z wyładowań niezupełnych, ale również ze zjawisk termicznych. Ze względu na nakładanie się sygnałów z wielu źródeł EA i trudności w ich rozdzieleniu, wskazana jest weryfikacja wyników badania przez równoczesny pomiar wnz metodą elektryczną TEV oraz przy pomocy analizy chromatograficznej oleju.



Rys. 12. Rozpoznanie rodzaju defektu metodą Duvala

Analiza DGA pozwala na rozpoznanie występowania wnz, a także ocenę ich wpływu na degradację izolacji papierowo-olejowej, jednak ze względu na różne właściwości spotykanych w eksploatacji olejów i tendencję niektórych z nich do tworzenia nadmiernych ilości gazów, prawidłowa diagnoza wymaga łącznego zastosowania kilku metod badawczych.

Bibliografia dostępna na stronie [www.nis.com.pl](http://www.nis.com.pl)

 Jerzy Buchacz, Marcin Wawrzynosek  
Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o.  
ul. Świętokrzyska 2, 44-100 Gliwice