

Jerzy Buchacz, Marcin Wawrzynosek

ENERGOPOMIAR-ELEKTRYKA Sp. z o.o. Gliwice

WERYFIKACJA WYNIKÓW BADAŃ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ W TRANSFORMATORACH ENERGETYCZNYCH

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

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 niepełne. Wskazano na niestandardowe możliwości zastosowania metody emisji akustycznej do wykrywania w kadzi transformatora miejsc o podwyższonej temperaturze.

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.

Słowa kluczowe: wyładowania niepełne, transformatory, analiza chromatograficzna, DGA, metoda emisji akustycznej, termowizja

Keywords: partial discharges, transformers, DGA, acoustic emission method, thermal imaging

1. Wprowadzenie

Wyładowania niepełne 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 100pC 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 niepełne, których działaniem będzie powodować osłabienie izolacji, prowadząc do rozwoju wyładowań o większej energii, a w końcu iskrzeń i przebicia. Określenie wielkości ładunku pozornego wzn 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 wzn [6].

2. Metoda emisji akustycznej (EA)

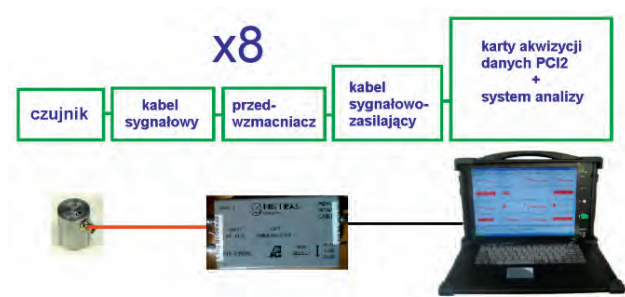
Metoda EA polega na pomiarze parametrów fali ciśnienia akustycznego powstającej w chwili wyładowania. Fala taka rozchodzi się we wszystkich kierunkach od miejsca powstania i odbierana jest przez czujnik piezoelektryczny umieszczony na ścianie kadzi transformatora. Przy ocenie intensywności wzn metodą 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, a szczególnie przeliczenie/odniesienie do wyników otrzymanych metodą elektryczną. Dlatego też metoda EA używana jest głównie do określenia miejsca położenia źródła wzn, 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 wyładowań niepełnych w kadzi transformatora metodą emisji akustycznej przeprowadzane jest w przypadkach, gdy wyniki analizy chromatograficznej gazów rozpuszczonych w oleju wykazują obecność charakterystycznych dla wzn gazów, któ-

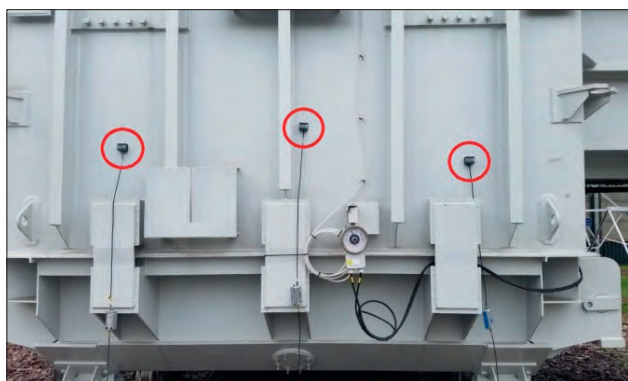
Tabela 1. Typowe wartości stężeń gazów wg RIET 2022

Gazy wydzielone z oleju	Stężenia gazów [ppm] w stosunku do objętości oleju	
	transformator blokowy	transformator sieciowy
H ₂ – wodór	220	300
CH ₄ – metan	200	180
C ₂ H ₆ – etan	160	170
C ₂ H ₄ – etylen	210	220
C ₂ H ₂ – acetylen	20	70
C ₃ H ₈ – propan	60	60
C ₃ H ₆ – propylen	60	70
CO – tlenek węgla	450*	480*
CO ₂ – dwutlenek węgla	7000*	5000*

* Uwaga: w praktyce spotykane są również znacznie wyższe stężenia tlenków węgla; wartość stosunku CO₂/CO poniżej 3 może świadczyć o nadmiernej degradacji papieru.



Rys. 1a. Tor pomiaru wnz metodą akustyczną



Rys. 1b. Położenie czujników na kadzi

rych stężenia przekraczają limity uznawane za typowe w 90% populacji transformatorów [7] (Tab. 1).

3. Lokalizacja źródła wyładowań niepełnych

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,

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. metodzie IEC oraz Duvala*, wskazywała, że przyczyną powstawania gazów są wyładowania niepełne (Rys. 2b).

*oznaczenia przyczyn wydzielania gazów:

PD – wyładowania niepełne typu koronowego

D1 – wyładowania iskrowe o niskiej energii

D2 – wyładowania iskrowe o dużej energii

T1 – przegrzanie niskotemperaturowe $T < 300^{\circ}\text{C}$

T2 – przegrzanie średnotemperaturowe $300^{\circ} < T < 700^{\circ}\text{C}$

T3 – przegrzanie wysokotemperaturowe $T > 700^{\circ}\text{C}$

T3-H – przegrzanie T3 tylko w oleju

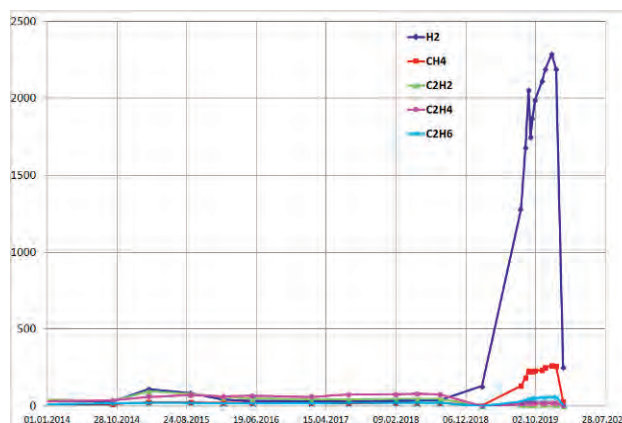
DT – usterka złożona: przegrzanie + wyładowania

S – gazowanie pasożytnicze (temp. $< 200^{\circ}\text{C}$)

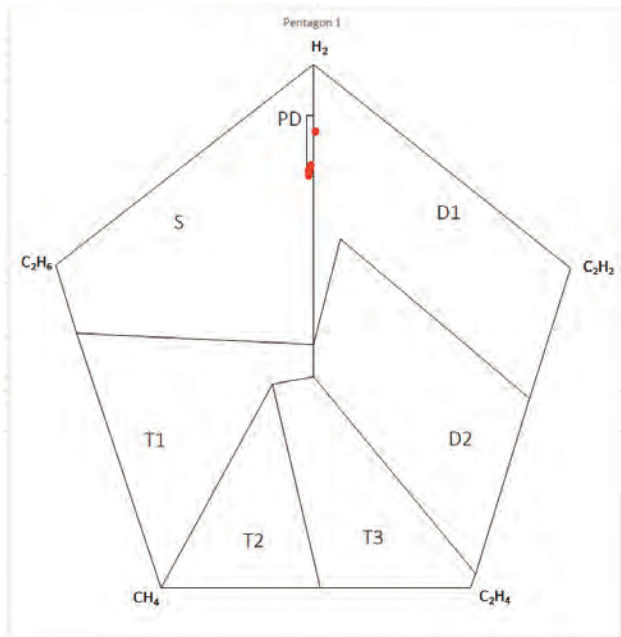
O – przegrzanie o temp. $< 250^{\circ}\text{C}$

C – możliwa karbonizacja papieru

Badanie metodą EA wykazało istnienie kilku źródeł wnz. Dla upewnienia się, że emisja akustyczna powstaje wskutek wyładowań przeprowadzono pomiar



Rys. 2a. Przyrost gazów w tr. 160 MVA

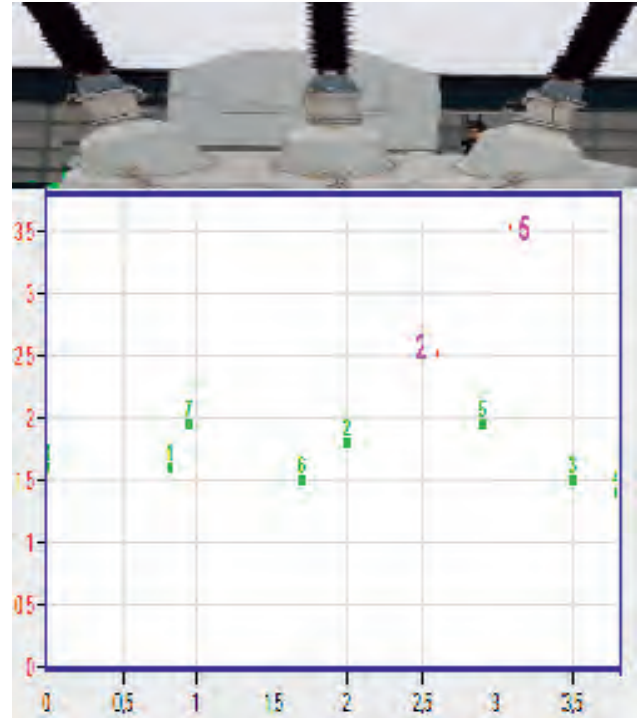


Rys. 2b. Rozpoznanie defektu w tr. 160 MVA

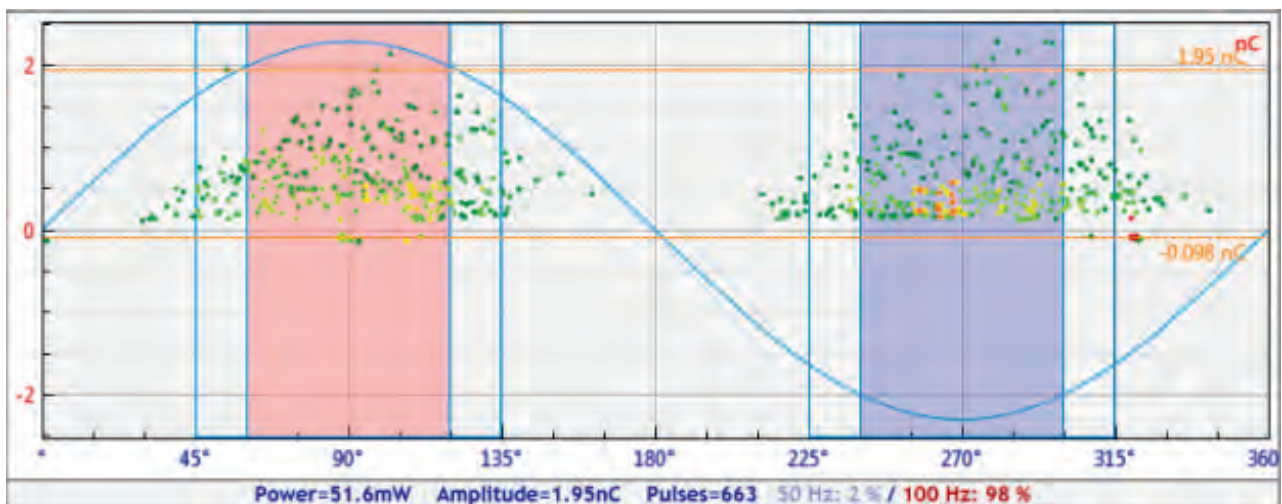
weryfikacyjny, metodą elektryczną, przy pomocy sondy wykrywającej impulsy napięcia doziemnego TEV (Transient Earth Voltage) w zakresie częstotliwości $100 \text{ kHz} \div 1 \text{ GHz}$ [8, 9].

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 wykry-



Rys. 4a. Lokalizacja źródeł EA



Repetitive discharges

Source: **Channel 1**
 Phase: -
 Danger level: **Middle**
 Power: **51.6 mW (90% of total power)**
 Amplitude: **1.95 nC**
 Accuracy: **100%**
 Description: Type of distribution is different from the existing patterns

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

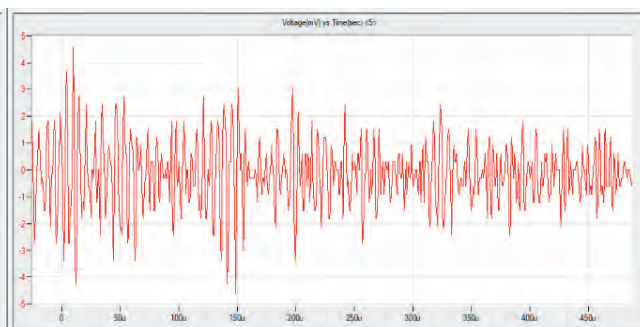
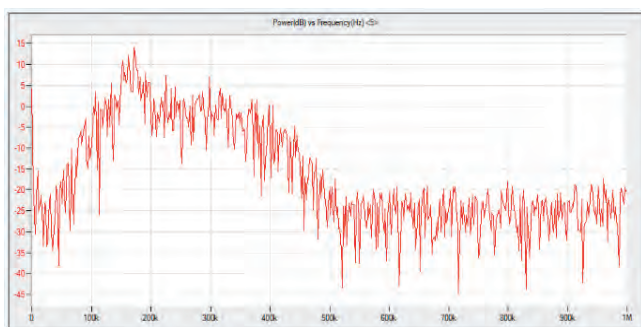
to uszkodzoną izolację przewodu łączącego uzwojenie z izolatorem (Rys. 4b).



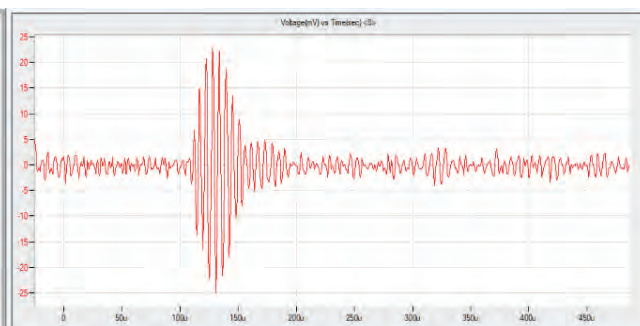
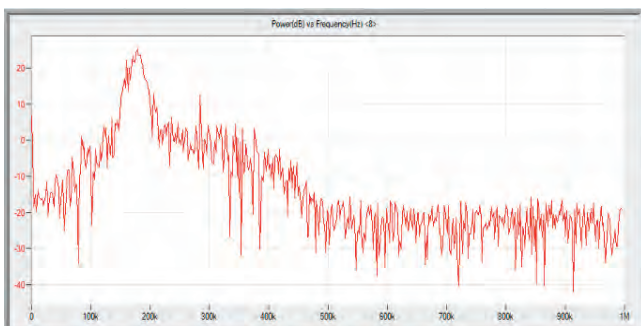
Rys. 4b. Defekt ujawniony podczas rewizji

4. Analiza emisji akustycznej vs. diagnoza DGA

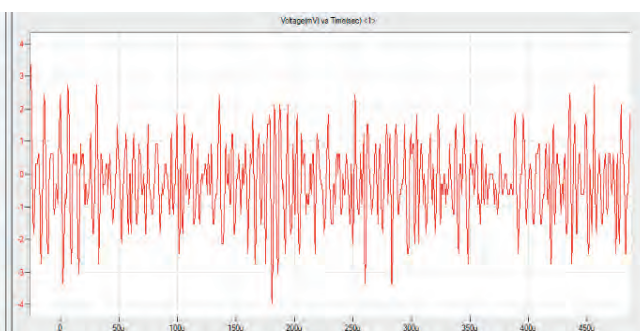
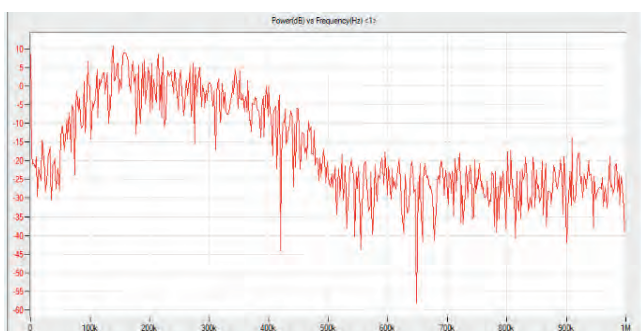
Wyładowania niezupełne nie są jedynym źródłem emisji akustycznej w kadzi transformatora. Oprócz zjawisk fizycznych, związanych z zasadą pracy transformatora, takich jak magnetostrykcja czy też szumy Barkhausena, istotnym źródłem efektów akustycznych są zjawiska cieplne – grzanie elementów konstrukcyjnych 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).



Emisja akustyczna od wnz oraz efektów cieplnych



Emisja akustyczna generowana przez wnz



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

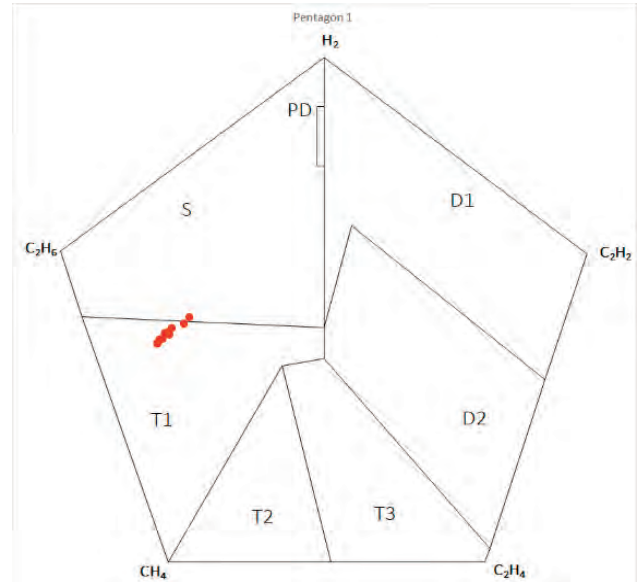
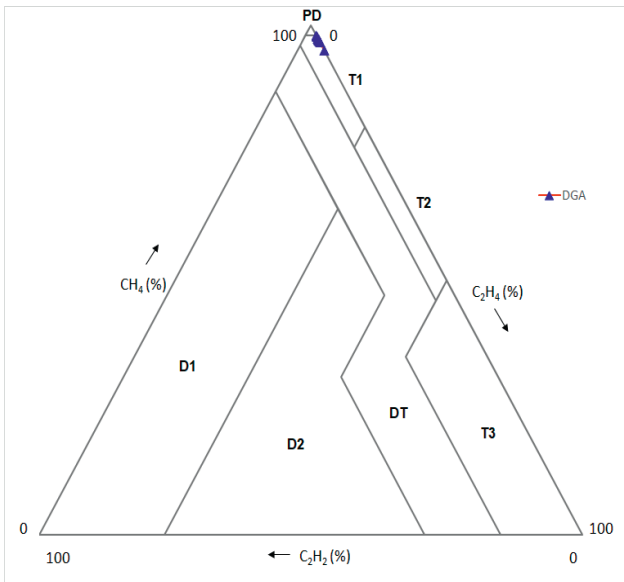
Rys. 5. Widmo gęstości mocy oraz przebieg sygnału emisji akustycznej

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 przegrzanie niskotemperaturowe

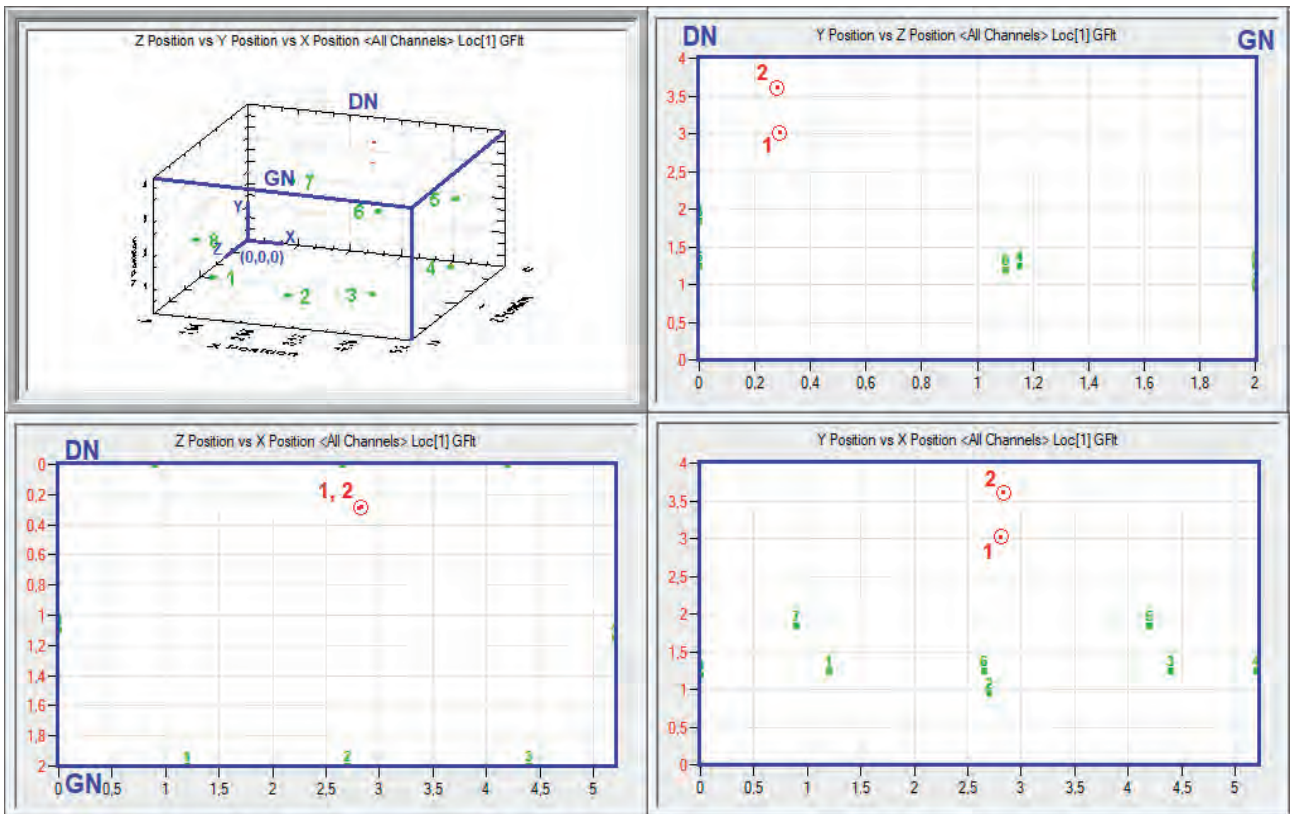
T1, metoda pięciokątów wskazywała na przegrzanie o temp. poniżej 300°C (Rys. 6).

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

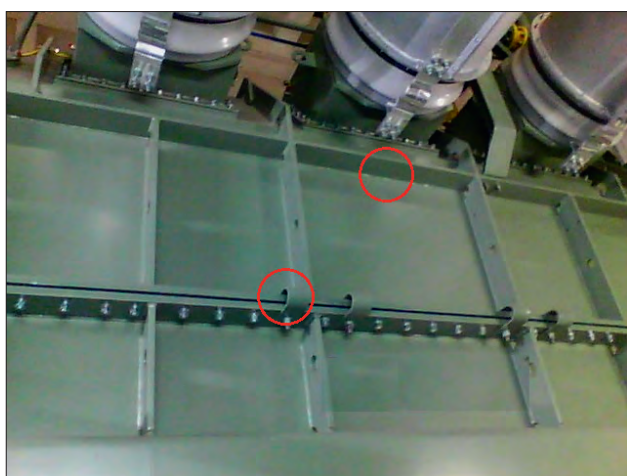
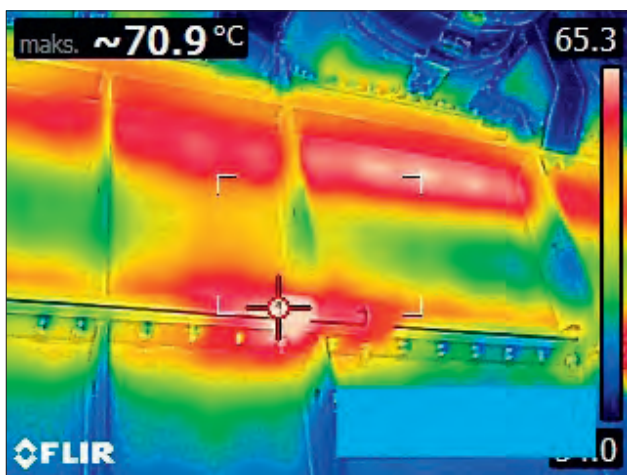
Wskazane miejsce EA pokrywało się z obrazem termowizyjnym najgorętszych punktów na kadzi transformatora.



Rys. 6. Diagnoza defektu metodą trójkąta i pięciokąta Duvala



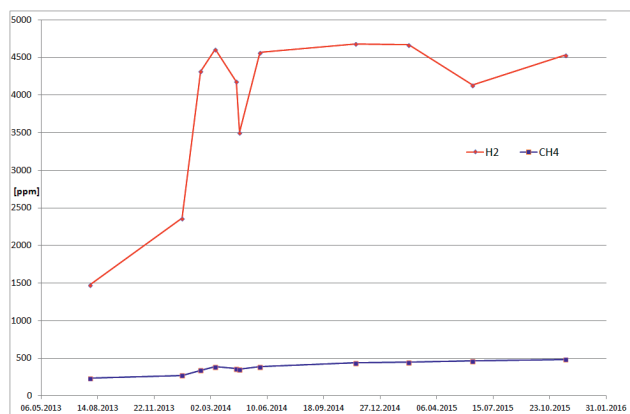
Rys. 7. Lokalizacja termicznego źródła emisji akustycznej



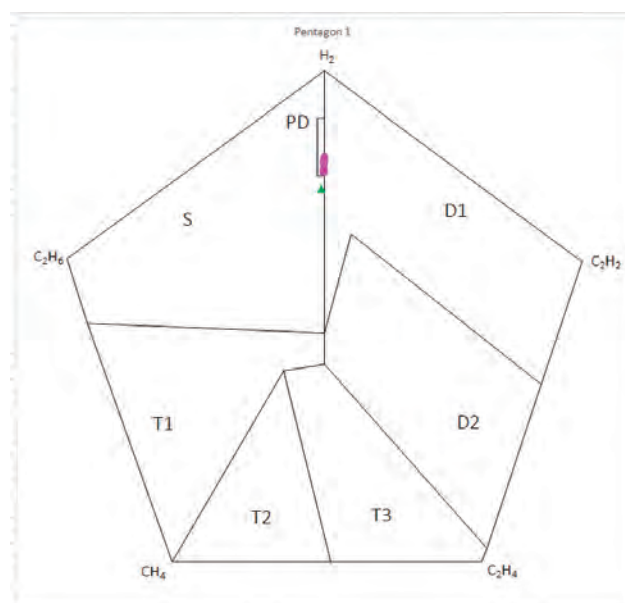
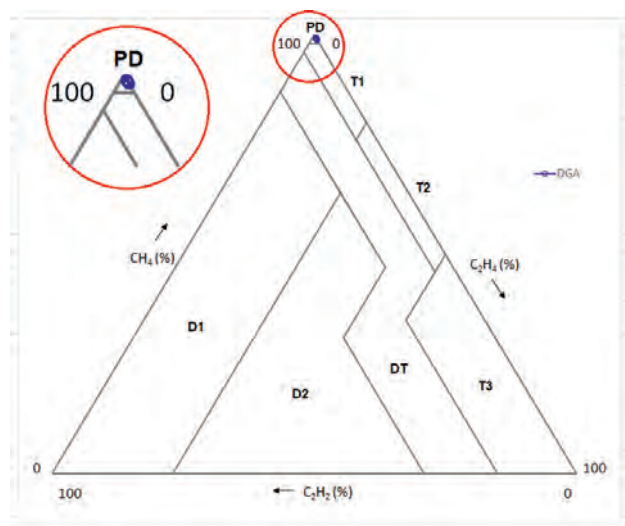
Rys. 8. Obraz termowizyjny gorących punktów u góry kadzi, strona DN

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).



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

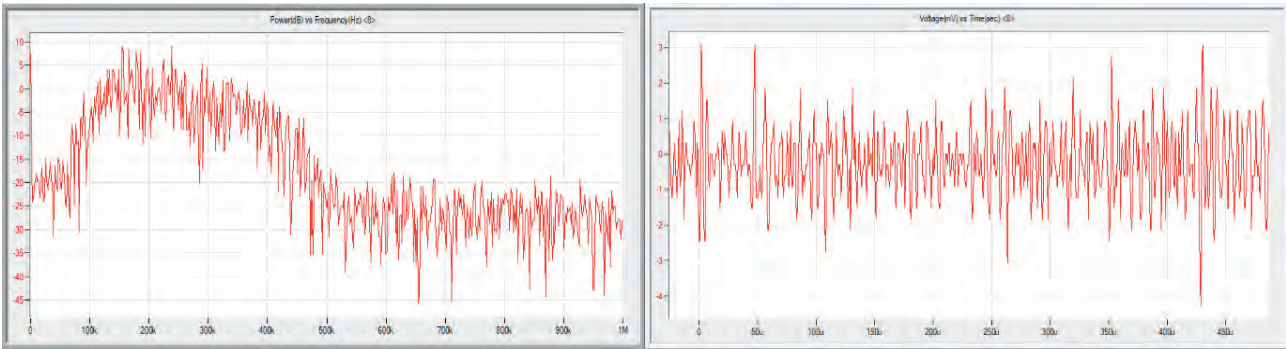


Rys. 10. Ocena rodzaju defektu metodą Duvala

Badanie przeprowadzone metodą emisji akustycznej nie wykazały 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.

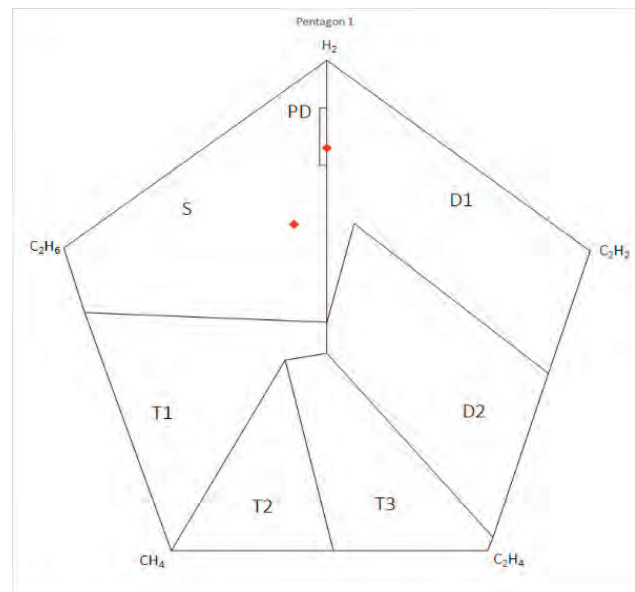
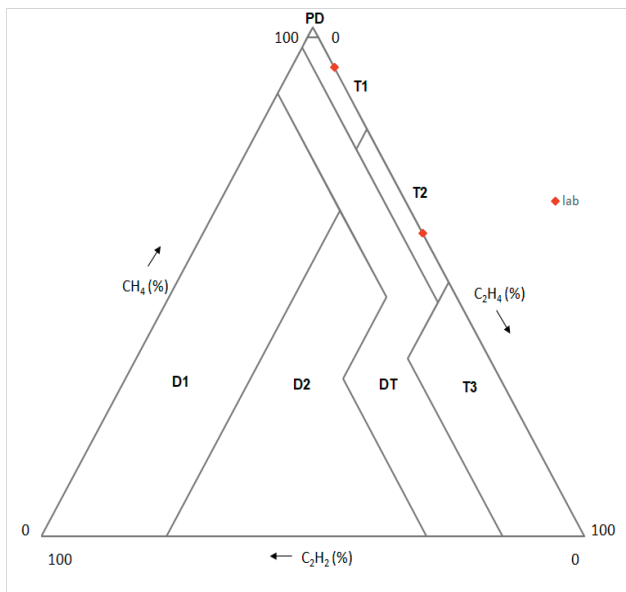
Wg metody trójkąta 1 (Rys. 12a), przyczynami powstania gazów są:



Rys. 11. Szum akustyczny w transformatorze 63MVA

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

Materiały	Stężenie gazu w oleju [ppm]								
	H ₂ wodór	CH ₄ metan	C ₂ H ₆ etan	C ₂ H ₄ etylen	C ₂ H ₂ acetylen	C ₃ H ₈ propan	C ₃ H ₆ propylen	CO tlenek węgla	CO ₂ 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. 12. Rozpoznanie rodzaju defektu metodą Duvala

- 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 od wyładowań niezupełnych, ale również od zjawisk termicznych. Ze względu na nakładanie się sygnałów od wielu źródeł EA i trudności w ich rozdzieleniu, wskazana jest weryfikacja wyników badania przez równoczesny po-

miar wnz metodą elektryczną TEV oraz przy pomocy analizy chromatograficznej oleju.

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.

Literatura

- [1] Norma PN-EN 60270:2003 *Wysokonapięciowa technika probiercza – Pomiar wyladowań niezupełnych*.
- [2] CIGRE TB #444 *Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements*, December 2010.
- [3] CIGRE TB #502 *High-Voltage On-Site Testing with Partial Discharge Measurement*, June 2012.
- [4] CIGRE TB #662 *Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods*, August 2016.
- [5] CIGRE TB #676 *Partial discharges in transformers*, February 2017.
- [6] F. Witos: *Badania wyladowań niezupełnych metoda emisji akustycznej i metodą elektryczną*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2008.
- [7] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, ZPBE ENERGOPOMIAR-ELEKTRYKA, Gliwice, wyd. 2022.
- [8] J. Buchacz: *Wyladowania niezupełne w dużych transformatorach. Problemy metrologiczne i zagrożenia*, XI Konferencja „Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów”, Wisła-Jawornik 2018.
- [9] H. Prasetya, U. Khayam, A. Itose, M. Kozako, M. Hikita: *PD Pattern of Various Defects measured by TEV sensor*, 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power System, October 2-5, 2017, Bali, Indonesia.
- [10] F. Witos, A. Olszewska, Z. Opilski, A. Lisowska-Lis, G. Szerszeń: *Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers*, Energies 2020, 13(22), 5955; <https://doi.org/10.3390/en13225955>
- [11] A. Lisowska-Lis, F. Witos, G. Szerszeń: *Thermographic analysis of power oil transformer surface hot spot areas combined with analysis of acoustic signals recorded on line* Proc. SPIE 11204, 14th Conference on Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, and Methods, 112040B (13 September 2019); doi: 10.1117/12.2536700

Autorzy

Jerzy Buchacz, Marcin Wawrzynosek

Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o., ul. Świętokrzyska 2, 44-100 Gliwice