

Pomiary i lokalizacja wyładowań niezupełnych w izolacji transformatorów energetycznych

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie trzech metod pomiaru wyładowań niezupełnych do oceny stanu izolacji transformatora energetycznego o mocy 300 MVA i napięciu 210/110/21 kV. Omówiono metodę lokalizacji miejsca uszkodzeń oraz sposób oceny rezultatów badań na podstawie wyników z pomiarów off-line jak również z monitorowania ciągłego wyładowań niezupełnych.

Abstract. The article presents the application of partial discharge measurements to assess the condition of insulation of 300 MVA 210/110/21 kV power transformer. The method of defect's localization and the way of test results evaluation based on off-line measurements as well as on continuous monitoring of partial discharges is presented. (*Measurement and localisation of partial discharges in the insulation of power transformers*).

Słowa kluczowe: transformator energetyczny, diagnostyka, pomiar wyładowania niezupełnych, monitorowanie.

Keywords: power transformer, diagnostics, partial discharge measurement, monitoring.

Wstęp

Transformatory mocy są kluczowym elementem systemu elektroenergetycznego i aby zapewnić bezawaryjną i bezpieczną pracę transformatora, należy na bieżąco kontrolować stan jego izolacji. Pomiar wyładowań niezupełnych (WZN) jest jedną z metod takiej kontroli. Te nieinwazyjne pomiary diagnostyczne wykonywane są w czasie prób odbiorczych w fabryce, po zainstalowaniu transformatora w miejscu pracy jak również w czasie jego eksploatacji.

Do pomiaru i lokalizacji WZN wykorzystywane są różne metody diagnostyczne. Wśród nich najpopularniejsze są metody: elektryczne, chemiczne oraz akustyczne [1]. W niniejszym artykule przedstawiono opracowanie wyników pomiarów WZN wykonanych trzema wymienionymi metodami w transformatorze energetycznym o mocy 300 MVA.

Obiekt badań

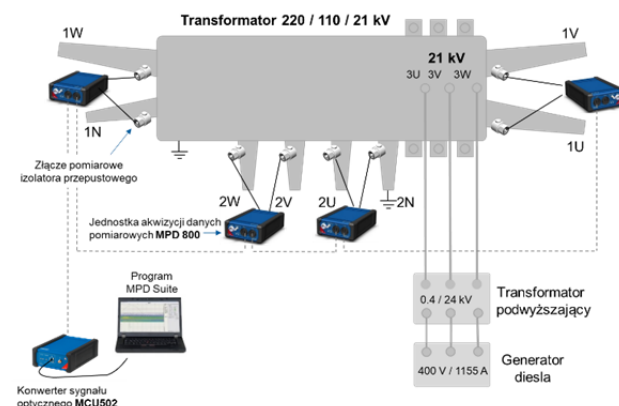
Obiektem badań był trójzwojenny transformator energetyczny o mocy 300 MVA i napięciu 220/110/21 kV (rys. 1). Pomiary WZN zostały wykonane w celu kontroli stanu izolacji transformatora po zmianie jego miejsca pracy. W czasie transportu izolatory przepustowe na napięciu 220 i 110 kV były zdemontowane, a sam demontaż wymagał obniżenia poziomu oleju w kadzi. Pomiary diagnostyczne wykonano metodą off-line, a zewnętrzne źródło napięcia stanowił transformator o przekładni 0,4/24 kV zasilający obiekt badań od strony przepustów napięciem 21 kV.



Rys.1. Obiekt badań wraz z transformatorem podwyższającym napięcie

Pomiar WZN metodą elektryczną w trybie off-line

Pomiar WZN metodą elektryczną wykonano zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie IEC 60270 [2]. Metoda oparta jest na pomiarze ładunku pozornego (Q_{IEC}), wyrażonego w pC, za pomocą sond pomiarowych przyłączonych do zacisków pomiarowych przepustów transformatorowych. Pomiaru ładunku pozornego dokonywano w sposób synchroniczny, na zaciskach pomiarowych wszystkich przepustów, zarówno po stronie górnego (GN) jak i dolnego (DN) napięcia (rys. 2).

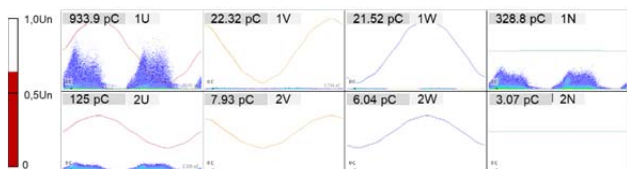


Rys.2. Schemat połączeń układu pomiarowego WZN

Przeprowadzono kalibrację układu pomiarowego dla każdego punktu pomiarowego oddzielnie. Pozwoliło to na późniejsze wyznaczenie wzajemnych relacji pomiędzy wartościami sygnałów WZN mierzonych na każdym przepuscie w czasie próby. Taka kalibracja jest niezbędna dla właściwej lokalizacji miejsca WZN. Dodatkowo, aby określić czułość układu pomiarowego do detekcji częstych uszkodzeń zacisków pomiarowych przepustów, wyznaczono relacje pomiędzy wartościami sygnału z kalibratora doprowadzonego do każdego zacisku pomiarowego a jego obrazem rejestrowanym na pozostałych przepustach [1].

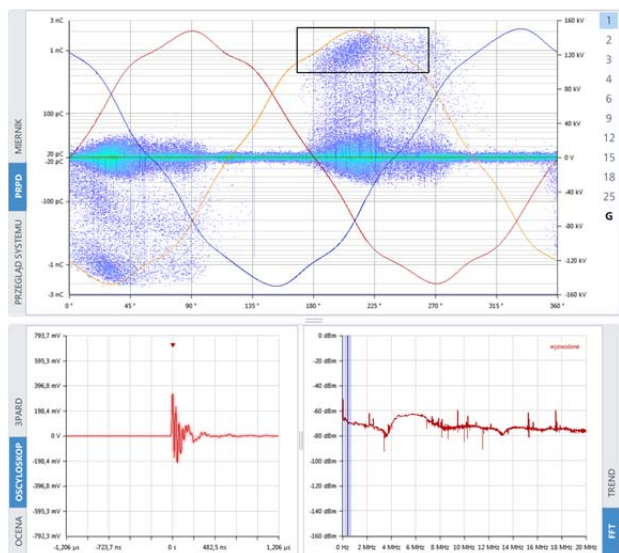
Próbie zasadniczą rozpoczęto od wyznaczenia poziomu szumu oraz od doboru centralnej częstotliwości pomiarowej i pasma przepustowego tak, aby uzyskać jak najwyższą czułość pomiaru. Najkorzystniejsze warunki pomiaru uzyskano przy centralnej częstotliwości pomiaru 400 kHz oraz paśmie przepustowym o szerokości 600 kHz (± 300 kHz). Do wartości napięcia probierczego $0,5xU_n$ (GN – 110 kV,

DN – 55 kV) poziom szumu nie przekraczał 10 pC ładunku pozornego. Sygnały WNZ zostały zaobserwowane przy napięciu $0,8xU_n$ (GN – 176 kV, DN – 88 kV) w kilku punktach pomiarowych. Ich obrazy fazowo-rozdzielcze PRPD (ang. Phase Resolved Partial Discharge) przedstawione są na rysunku 3. Sygnał WNZ o największej wartości został zarejestrowany po stronie GN, na zacisku pomiarowym przepustu w fazie 1U.



Rys.3. Obrazy PRPD (widok jedno-biegunowy, skala logarymiczna, zakres $Q_{MIN}=5$ pC, $Q_{MAX}=5$ nC) zarejestrowane w poszczególnych punktach pomiarowych przy napięciu $0,8xU_n$

Dzięki dedykowanemu oprogramowaniu do analizy zarejestrowanych wyników pomiarów (3PAR) istnieje możliwość selekcji wybranych obszarów zbioru punktów pomiarowych na obrazie PRPD w celu ich dokładniejszej analizy. W ten sposób są rejestrowane tylko wyselekcjonowane impulsy WNZ o określonej amplitudzie i korelacji z fazą napięcia probierczego. Ich przebieg czasowy i częstotliwościowy (FFT) na wejściu do jednostki rejestracji danych (MPD 800) jest pokazany na rysunku 4.



Rys.4. Obraz PRPD (logarymiczno-bipolarny) z zaznaczonym obszarem wyzwalania fazy 1U (górną część wykresu) oraz przykładowe rejestracje czasowe i częstotliwościowe sygnałów WNZ dla zaznaczonego obszaru PRPD (dół)

Pomiary oraz lokalizacja WNZ metodą akustyczną

Pomiar sygnałów akustycznych dokonano za pomocą sond piezoelektrycznych umieszczanych na zewnętrznej stronie kadzi transformatora i dociskanych do niej przez warstwę gliceryny żelu akustycznego w celu zmniejszenia tłumienia (rys. 5). W użyciu były sondy emisyjne (ang. acoustic emission sensor - AES), gdzie napięcie wytwarzane przez kryształ jest proporcjonalne do prędkości drgań tej powierzchni. Sondy te pracują w zakresie ultradźwięków, a dokładnie w zakresie częstotliwości od 30 kHz do około 450 kHz i mają odpowiedź zmienną w funkcji częstotliwości.

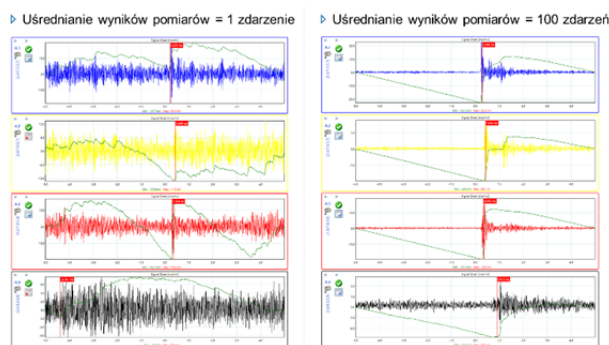
Lokalizację źródła WNZ przeprowadza się mierząc różnicę czasu dojścia sygnału akustycznego od źródła WNZ do sond emisyjnych połączonych z systemem wizualizacji i opracowania danych pomiarowych. Do wyzwalania

sygnałów akustycznych wykorzystuje się sygnał elektryczny WNZ rejestrowany metodą konwencjonalną.



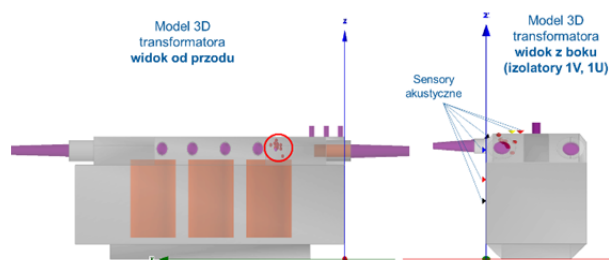
Rys.5. Widok zainstalowanych akustycznych sond piezoelektrycznych

Lokalizację metodą akustyczną wykonano za pomocą 8 sond piezoelektrycznych umieszczonych na kadzi transformatora w pobliżu fazy 1U. Sygnały akustyczne oraz ich uśrednione przebiegi przedstawione są na rysunku 6.



Rys.6. Zarejestrowane sygnały akustyczne w zależności od stopnia uśredniania

Wykorzystując możliwości oprogramowania systemu akustycznego stworzono model 3D badanego obiektu, na którym system w sposób automatyczny określa miejsce WNZ. Uzyskane wyniki triangulacji sygnałów akustycznych (rys. 7a) oraz lokalizacji miejsca uszkodzenia (rys. 7b) wskazują na miejsce uszkodzenia w pobliżu wyprowadzenia połączenia uzwojenia cewki wysokiego napięcia z uzwojenia 220 kV fazy 1U.

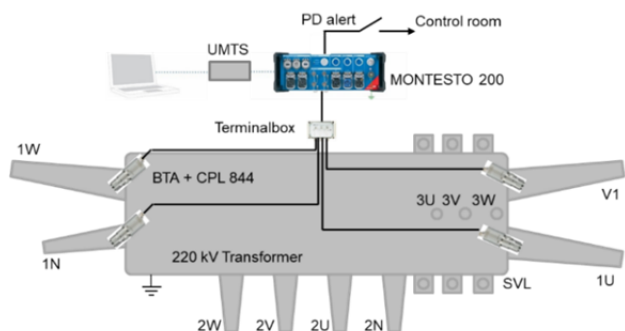


Rys.7. Wizualizacja sygnałów akustycznych względem ich umiejscowienia na modelu 3D transformatora oraz widok miejsca wystąpienia WNZ

Monitorowanie ciągle WNZ

Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów metodą elektryczną i metodą akustyczną w trybie off-line (transformator zasilany ze źródła napięcia probierczego), transformator został warunkowo włączony do pracy oraz postanowiono monitorować w sposób ciągły poziom WNZ dwiema metodami: konwencjonalną oraz chemiczną (DGA).

System monitorowania ciągłego WNZ metodą konwencjonalną został zainstalowany na przepustach na napięcie 220 kV. Na zacisku pomiarowym przepustu została zainstalowana sonda WNZ posiadająca kilkustopniowy system zabezpieczeń, zarówno przed przepięciami jak również przed utratą połączenia galwanicznego od sondy do jednostki rejestracji sygnałów WNZ. Jako jednostkę pomiarową wykorzystano urządzenie przeznaczone do pomiarów monitoringu czasowego MONTESTO 200 (rys. 8).

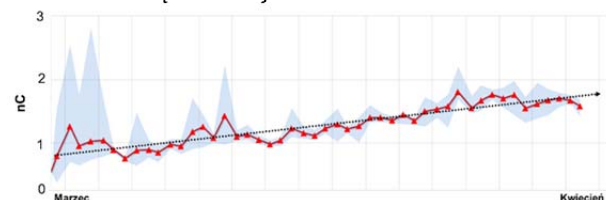


Rys.8. Schemat podłączenia systemu monitoringu WNZ on-line, typu MONTESTO, 200 do transformatora

Oprogramowanie pozwala na obserwację trendu wartości ładunku WNZ oraz na ustawienie wartości progowych, których przekroczenie wyzwała sygnały ostrzegawcze dla użytkownika. Jest też możliwy zdalny dostęp do urządzenia poprzez web browser w celu obserwacji zarówno aktualnego poziomu WNZ jak i zarejestrowanych uprzednio danych pomiarowych.

Sygnały od wyładowań powierzchniowych zarejestrowano natychmiast po rozpoczęciu monitorowania, a ich obecność została potwierdzona w czasie inspekcji wizualno-słuchowej.

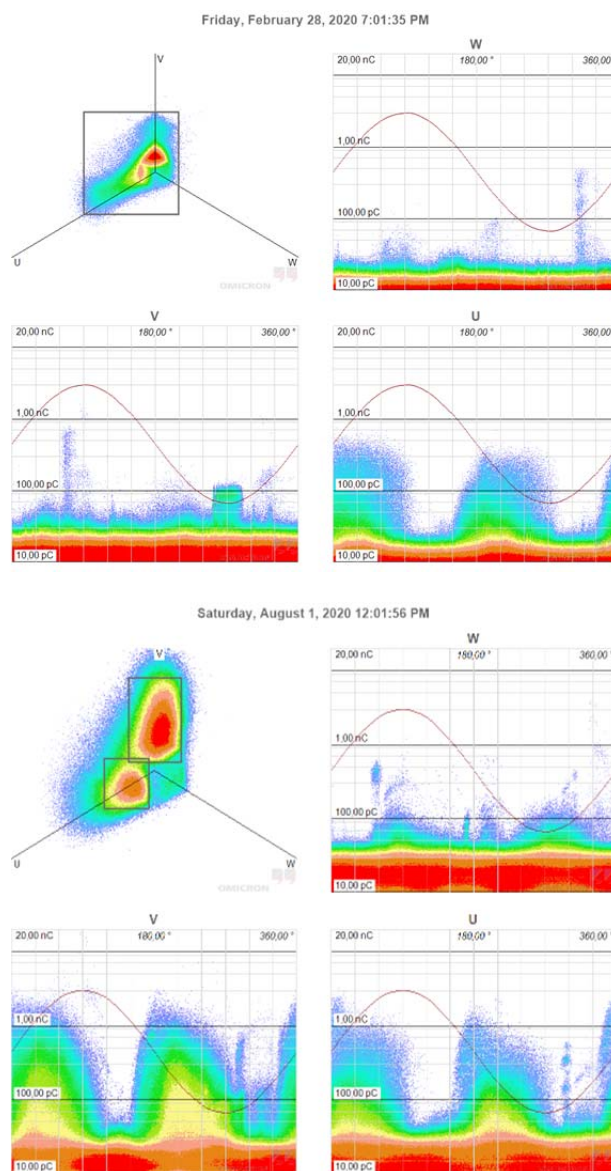
W celu separacji źródeł WNZ dokonano zmiany ustawień filtrów cyfrowych zwiększając centralną częstotliwość pomiarową do wartości 2,2 MHz. Przy tak dobranej wartości, uzyskano najkorzystniejszą wartość współczynnika kalibracji ładunku WNZ, a rejestrowane obrazy PRPD defektu były wyraźne. Wartość mierzonego ładunku WNZ dla fazy U zwiększyła się w okresie trzech miesięcy od wartości 100 pC do 2 nC (rys. 9). W trzecim miesiącu monitorowania zaobserwowano pojawienie się sygnału WNZ w fazie V od nowego źródła (rys. 10). Analiza obrazu PRPD dla tej fazy potwierdziła występowanie defektu wewnątrz izolacji.



Rys.9. Trend występowania WNZ w fazie U

Dokonano głębszej analizy wyników pomiarowych wykorzystując technikę i wykresy 3PARAD (ang. 3-Phase Amplitude Relation Diagram). Wykresy te tworzy się poprzez synchroniczny pomiar amplitudy poszczególnych impulsów WNZ w jednej z faz i odpowiadających im sygnałów WNZ w pozostałych dwóch fazach oraz poprzez automatyczne wyznaczenie ich wektorowej sumy, punktów na płaszczyźnie 3PARAD. Z reguły, amplitudy sygnałów pochodzących od zakłóceń są jednakowe w każdej z faz, a

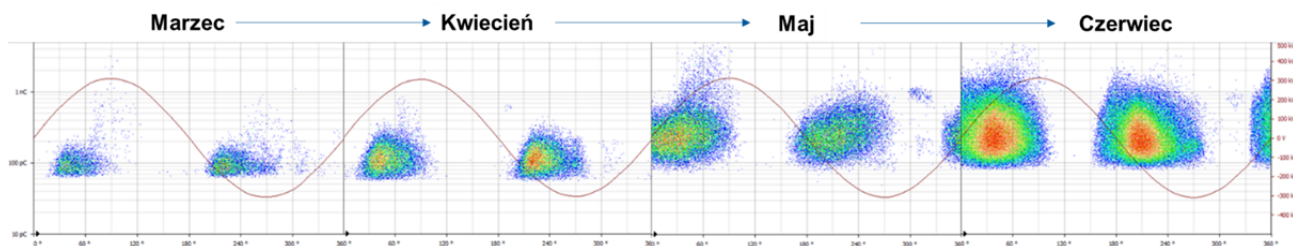
więc punkty będące sumą ich wektorów znajdują się w pobliżu punktu zerowego wykresu 3PARAD. W przypadku rejestracji sygnałów WNZ, ich amplituda będzie różna w każdej z faz, a więc koncentracja punktów będzie z dala od punktu zerowego. W ten sposób klastry punktów (ang. Clusters) od zakłóceń i WNZ znajdują się w różnych miejscach wykresu 3PARAD [2, 3], a ich położenie względem osi wykresu, a więc fazy w której następuje pomiar, wskazuje na przybliżoną lokalizację miejsca wyładowania. Na rysunku 10 i 11 przedstawiono obrazy WNZ w fazie V w różnych chwilach czasowych.



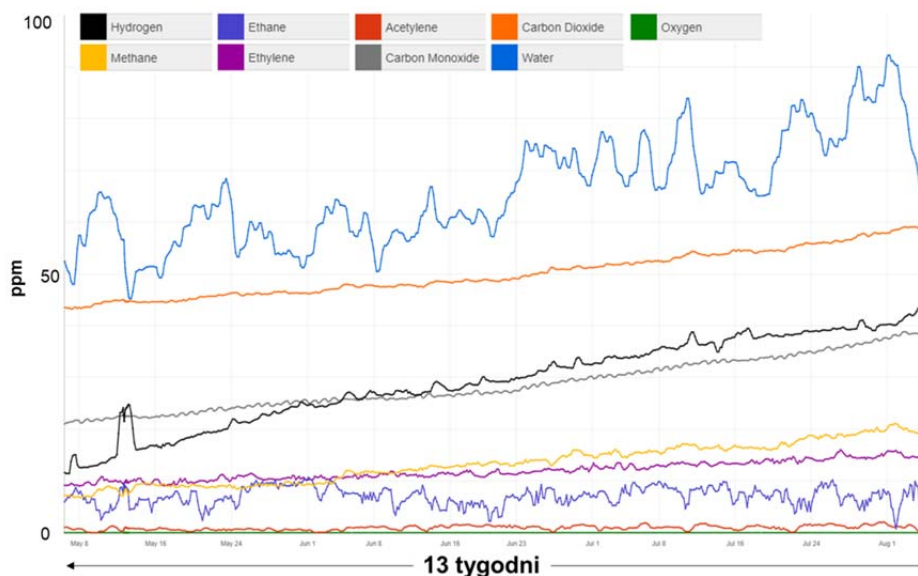
Rys.10. Zarejestrowany wzrost poziomu WNZ w ciągu 5 miesięcy (widok PRPD jednobiegunowy logarytmiczny)

Analiza gazów rozpuszczonych w oleju

W celu uzupełnienia przedstawionych wyników metody elektrycznej i akustycznej, wykonano badanie DGA, polegające na określeniu zawartości gazów rozpuszczonych w oleju transformatorowym (ang. Dissolved Gas Analysis). Porównano wyniki pomiarów przed i po trzech miesiącach od transportu transformatora i nie zauważono znaczących różnic (rys. 12). Lokalne uszkodzenia izolacji papierowo-olejowej nie powodowały wzrostu ilości rozpuszczonych gazów w oleju powyżej dopuszczalnych wartości [4].



Rys. 11. Zarejestrowany wzrost sygnału WNZ w fazie V w przedziale czasowym od marca do czerwca



Rys. 12. Trend zarejestrowanych wartości gazów rozpuszczonych w oleju w przedziale czasowym 3 miesięcy

Wnioski

Przedstawiona analiza wyników pomiarów WNZ metodą konwencjonalną, akustyczną i chemiczną potwierdziła przydatność tych metod do wczesnej oceny stanu izolacji transformatora, a zastosowane metody wzajemnie się uzupełniają.

Zastosowanie systemów monitorowania ciągłego umożliwia zarówno wczesne wykrycie i identyfikację defektów w izolacji transformatora jak również obserwację ich rozwoju w funkcji czasu. Pozwala to na odpowiednio wczesne podjęcie środków zaradczych, z wyłączeniem transformatora z użytkowania włącznie.

Dzięki wykorzystaniu metody konwencjonalną pomiaru WNZ, lokalizacja miejsca uszkodzeń metodą akustyczną może być przeprowadzona z większą czułością.

Technika pomiaru 3PARD, oparta o synchroniczny pomiar WNZ w izolacji trzech faz transformatora, pozwala nie tylko na skuteczną separację obrazów PRPD od różnych defektów oraz od zakłóceń, ale dodatkowo pozwala na przybliżoną lokalizację miejsca WNZ.

Autorzy: dr inż. Tomasz Bednarczyk, OMICRON Energy Solutions Polska sp.z.o.o. ul. Kosynierów 44, 41-219 Sosnowiec, Polska, Email: Tomasz.Bednarczyk@omicronenergy.com, dr hab. inż. Wojciech Kołtunowicz, OMICRON Energy Solutions GmbH, Lorenzweg 5, 12099 Berlin, Niemcy, Email: Wojciech.Koltunowicz@omicronenergy.com, dr.-Ing Michael Krueger, OMICRON electronics GmbH, Oberes Ried 1, 6833 Klaus, Austria, Email: Michael.Krueger@omicronenergy.com, Udo Ranninger, OMICRON electronics GmbH, Oberes Ried 1, 6833 Klaus, Austria, Email: Udo.Ranninger@omicronenergy.com

LITERATURA

- [1] CIGRÉ WG D1.29, *Technical Brochure 676: Partial Discharges in Transformers*, February 2017
- [2] IEC 60270: *Edition 3.1, 2015, High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*
- [3] C57.127 (2007), *IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, USA, 2007
- [4] IEC 60599: *Edition 3.0, 2015, Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analyses*