

Alternatywne metody pomiaru wyładowań niezupełnych w transformatorach mocy – próby odbioru i diagnostyka

Streszczenie. Badanie wyładowań niezupełnych jest jedną z najczęściej stosowanych metod kontroli jakości izolacji w układach elektrycznych. W przypadku transformatorów mocy pomiary te wykonuje się bazując na dobrze znanych i ustalonych standardach międzynarodowych. Detekcja wyładowań niezupełnych w wysokich częstotliwościach jest jedną z metod najbardziej rozwijanych w ostatnich latach, a przez swoją łatwość w implementacji oraz możliwość wykorzystania w systemach monitoringu sprawia, że jest ona coraz częściej postrzegana, jako uzupełnienie lub wręcz alternatywa dla metody elektrycznej podczas odbiorów fabrycznych.

Abstract. Investigation of partial discharges is one of the most commonly used methods of controlling the quality of insulation in electric systems. In the case of power transformers, these measurements are performed based on well-known and established international standards. Detection of partial discharges at high frequencies is one of the most developed methods in recent years, because of its ease implementation and possibility of utilization in monitoring systems. It is more often perceived as an accompanying or even substitute for the electrical method during factory tests. **Alternative methods of partial discharge measurements in power transformers – factory tests and diagnostics**

Słowa kluczowe: transformatory mocy, wyładowania niezupełne, UHF, diagnostyka, monitoring.

Keywords: power transformers, partial discharges, UHF, diagnostics, monitoring.

Wstęp

Pomiar wyładowań niezupełnych jest jedną z najczęściej stosowanych metod kontroli stanu izolacji w układach elektrycznych. W przypadku transformatorów mocy pomiary te wykonuje się bazując na dobrze znanych i ustalonych standardach międzynarodowych. W zależności od producenta i miejsca docelowego zainstalowania transformatora układy pomiarowe, sposoby kalibracji, jaki i analiza sygnałów mierzonych regulowana może być za pomocą IEC 60270, IEC 60076-1 lub IEEE C57. Metoda ta bazuje na pomiarze sygnału elektrycznego powstającego podczas wyładowania niezupełnego (WNZ) i przesyłanego przez uzwojenia do przepustów (przedstawionego, jako wartość napięcia lub ładunku pozornego wyładowań). W zależności od konstrukcji wykorzystywany jest punkt pomiarowy będący integralną częścią przepustu lub dodatkowy kondensator sprzęgający. W przypadku stosowania normy IEC zmierzony sygnał, wyrażony w pikokulombach (pC), może zostać przedstawiony jako bezwzględna amplituda lub w postaci graficznej w układzie fazy, ładunku i liczby (Ph-Q-N). Urządzenia pomiarowe wykorzystujące tę technikę nazywane są w skrócie PRPDA (ang. *Phase Resolving Partial Discharge Analyzer*). Norma IEEE zamienia sygnał w *Radio Interference Voltage* (RIV) mierzony w mikrowoltach (μV). Przez lata metody te były rozwijane i zdobyły powszechną akceptację.

Rozwój systemów izolacyjnych, wzrastające poziomy napięć i mocy transformatorów a także ważność tych jednostek w procesie generacji, przesyłu i dystrybucji energii, sprawiły że bezawaryjna praca tych elementów sieci energetycznej jest jednym z głównych aspektów bezpiecznego użytkowania i obsługi.

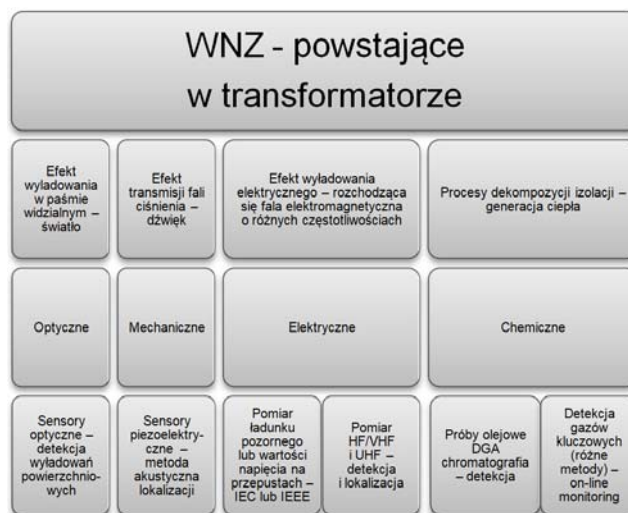
Pierwszym ważnym etapem dopuszczenia transformatora do eksploatacji jest pozytywne ukończenie prób fabrycznych. Na przestrzeni lat pojawiło się wiele alternatywnych metod detekcji, pomiaru, diagnostyki, a przede wszystkim lokalizacji WNZ. Rozwinęły się takie metody jak optyczne, akustyczne, analiza chemiczna oraz pomiar sygnału w dziedzinie wysokich częstotliwości – rysunek 1.

Detekcja wyładowań niezupełnych przy wysokiej częstotliwości jest jedną z metod najbardziej rozwijanych w ostatnich latach, a przez swoją łatwość implementacji oraz możliwość wykorzystania w systemach monitoringu sprawia, że jest ona coraz częściej postrzegana jako

uzupełnienie lub alternatywa dla metody elektrycznej podczas odbiorów fabrycznych (tematy pracy grup roboczych CIGRE). Bazując na badaniach laboratoryjnych oraz terenowych, w artykule przedstawiono analizę tej metody, jej wrażliwość na czynniki zewnętrzne oraz zalety i wady.

Alternatywne metody pomiaru i detekcji WNZ

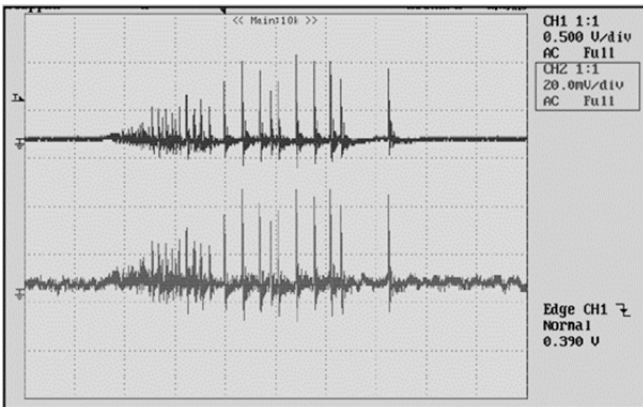
Przez ostatnie dziesięciolecia pomiar wyładowań niezupełnych w transformatorach mocy zyskiwał na ważności i stał się nieodzownym narzędziem diagnostycznym. Wprowadzano i udoskonalano nowe metody pomiarowe i analizę danych zgromadzonych z ich pomocą.



Rys.1. Metody pomiaru, detekcji i lokalizacji wyładowań niezupełnych

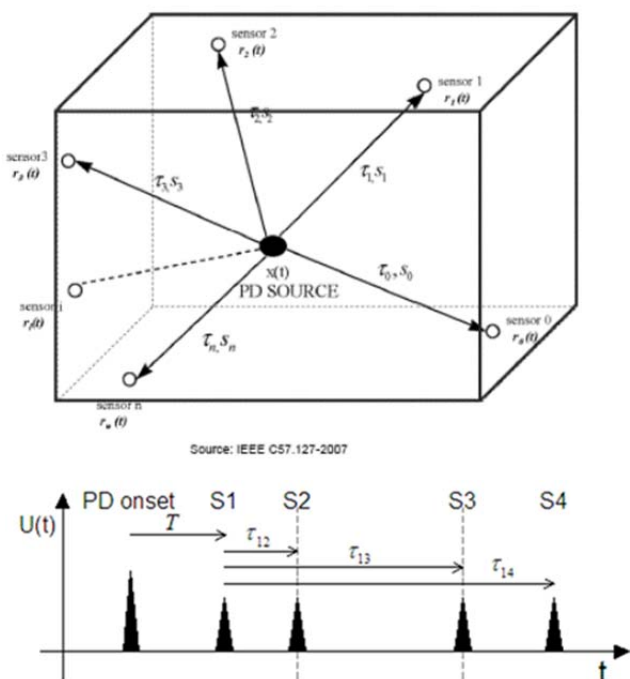
Ze względu na swoje ograniczenia detekcja optyczna nie znajduje szerszego zastosowania podczas pomiaru wyładowań niezupełnych w transformatorach mocy. Złożoność systemu izolacji papierowo-olejowej oraz występowanie WNZ w miejscach bez bezpośredniego dostępu powoduje, że metoda ta nie nadaje się do powszechniejszego zastosowania. Przeprowadzone badania nad pomiarem sygnału wykazują dobrą korelację pomiędzy generowanymi wyładowaniami a odczytem

optycznym (rys.2) [1]. Metody optyczne znalazły zatem szersze zastosowanie w otwartych, gazowych układach izolacyjnych i są stosowane tam jako części systemów monitoringu i układów zabezpieczeń ostrzegających w przypadku wylądowań powierzchniowych i przebić.



Rys.2. Porównanie sygnału pomierzonego metodą konwencjonalną i optyczną (system szerokopasmowy) [1]

Metoda akustyczna pomiaru bazuje na detekcji impulsów dźwiękowych transmitowanych od źródła WNZ do punktu pomiarowego – np. mikrofon umieszczony na kadzi transformatora. Ze względu na charakter i umiejscowienie WNZ fala dźwiękowa przemieszczać się może w oleju, jak również w częściach konstrukcyjnych transformatora. Pomiaru dokonuje się za pomocą mikrofonów piezoelektrycznych instalowanych bezpośrednio na kadzi transformatora w obudowie ze zintegrowanym magnesem i medium przewodzącym (żele przewodzące dźwięki). Pomiar ten generalnie wykonywany jest w zakresie częstotliwości od 10 do 300 kHz. Wykorzystując informacje o prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej w oleju, która w zależności od temperatury może wynosić od 1240 m/s do 1300 m/s dla temperatur od 50°C do 80°C [2] i różnicy w czasie nadejścia sygnałów, możliwe jest geometryczne określenie położenia źródła WNZ – rysunek 3.

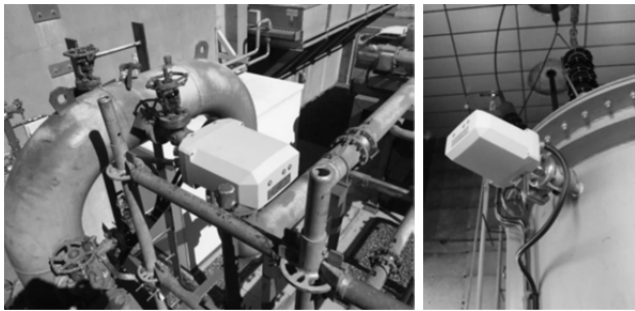


Rys.3. Lokalizacja WNZ za pomocą metody akustycznej przez pomiar prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej

Metoda akustyczna wykorzystywana jest z powodzeniem w lokalizacji źródeł WNZ, ale za pomocą tej metody nie jest jednak możliwy pomiar amplitudy sygnału i odniesienie go do wartości ładunku pozornego sygnału elektrycznego. Wielkością mierzona jest wartość napięcia, która nie może i nie powinna być wykorzystywana, jako kryterium oceny stanu izolacji, co niekiedy jest błędnie interpretowane. Zależnie od zastosowanego systemu pomiarowego możliwe jest zastosowanie większej ilości sensorów (wymagane są minimum trzy sensory oraz sygnał elektryczny używany jako punkt zerowy (odniesienia), tak zwany „trigger” lub cztery akustyczne sensory), co zwiększa prawdopodobieństwo poprawnej interpretacji sygnału i jego lokalizację. Ze względu na skomplikowaną konstrukcyjnie budowę transformatora, sygnały WNZ występujące w izolacji stałej lub „ukryte” za częściami konstrukcyjnymi, mimo wyraźnego sygnału mierzonego za pomocą metody elektrycznej mogą pozostać nie wykrywalne akustycznie. Doświadczenie pokazuje, że sygnały o wielkości dochodzącej do 1000 pC (mowa jest o ładunku pozornym mierzonym metodą elektryczną) w izolacji stałej mogą pozostawać niewykrywalne w porównaniu do sygnału o wartości kilkudziesięciu pC, zlokalizowanego np. bezpośrednio w kominie przepustu. Metodę akustyczną lokalizacji WNZ wykorzystuje się jako narzędzie diagnostyczne, choć istnieje techniczne zastosowanie tej metody w systemach monitoringu on-line [3]. Nie istnieją jeszcze ustalenia normatywne dla tego typu pomiarów jednakże na przykład w IEEE-Guide C57.127-2007 znajdujemy opis oraz wskazówki praktyczne wykorzystania tej metody.

System izolacyjny wysokiego napięcia w transformatorze zbudowany jest głównie na bazie izolacji papierowo-olejowej. Na skutek działania WNZ podczas termicznej dekompozycji izolacji powstające produkty chemiczne (gazowe) migrują do oleju gdzie za pomocą analizy składu oleju i z zastosowaniem chromatografii mogą zostać zbadane. Technika rozpoznawania i pomiaru ilości gazów DGA (ang. Dissolved Gas in oil Analysis) jest jedną z dobrze poznanych i opisanych metod [4]. Operatorzy systemów dystrybucyjnych energii elektrycznej przestrzegają zasad okresowych badań DGA, jako podstawy diagnostyki transformatorów oraz detekcji uszkodzeń. Analizy takie przeprowadzane są raz do roku lub częściej w przypadku wykrycia podwyższonej ilości gazów [5]. Gazem kluczowym rozpoznawalnym jako produkt występowania WNZ w izolacji papierowo-olejowej jest wodór. Rodzaj wylądowania i jego energia rozpoznawana jest na podstawie obliczonych proporcji wodoru do innych mierzonych gazów kluczowych. Ponieważ zjawisko inicjacji i rozwoju WNZ może być zjawiskiem lawinowym, często pozostaje niewykrywalnym w okresach między kolejnymi planowymi badaniami DGA. Rozwój technologii sensorów gazowych pozwala na zastosowaniu nieskomplikowanych systemów detekcji zawartości wodoru w oleju. Systemy te instalowane bezpośrednio na kadzi transformatora lub w instalacji chłodzącej używane są do detekcji WNZ i wczesnego ostrzegania, często bazując na analizie trendu – rysunek 4.

Jedną z nowych metod badania WNZ w transformatorach jest zastosowanie detekcji sygnałów o ultra wysokich częstotliwościach (UHF) – pasmo pomiarów w zależności od zastosowanego sprzętu może wynosić od 300 MHz do 1 GHz. Detekcja i pomiar parametrów fali elektromagnetycznej za pomocą anten wykorzystywane są z powodzeniem w układach o izolacji gazowej (linie przesyłowe GIL i rozdzielnie GIS).



Rys.4. Systemy monitoringing DGA – gazów kluczowych dla WNZ. Instalacja w systemie chłodzącym i bezpośrednio na kadzi transformatora

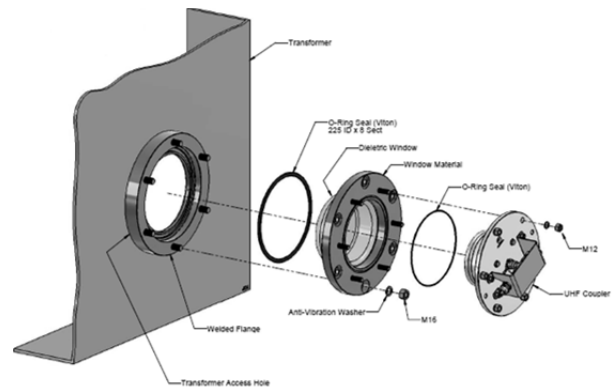
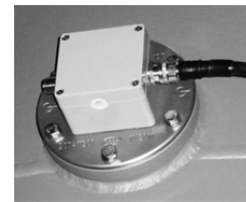
Technika UHF znalazła zastosowanie również w rozbudowanych systemach monitoringu wyładowań niepełnych w transformatorach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Obecnie nie ma jeszcze regulacji normatywnych dla przeprowadzenia pomiarów UHF w transformatorach mocy o izolacji papierowo-olejowej. Istnieją dwa główne rodzaje anten wykorzystywanych w pomiarach UHF – są nimi anteny instalowane w zaworach olejowych transformatora oraz bezpośrednio na kadzi (z wykorzystaniem materiału dielektrycznego jako okna). W przypadku tych pierwszych instalacja z zachowaniem zasad bezpieczeństwa i wiedzy o konstrukcji transformatora może zostać dokonana podczas pracy transformatora – rysunek 5. W tym celu wybierane są odpowiednie zawory zainstalowane w kadzi. Ze względu na konstrukcję, nie wszystkie zawory mogą zostać wykorzystane (preferowane są zawory typu kulowego i zasuwowe), a użycie ich również dla instalacji układu monitoringu DGA ogranicza w praktyce liczbę możliwych do zainstalowania sensorów. Sensory płytowe instalowane na kadzi transformatora z reguły wybierane są dla instalacji na nowych jednostkach oraz w przypadku przeprowadzania prac remontowych – rysunek 6. W przypadku zastosowania metody UHF, podobnie jak w metodzie akustycznej, możliwa jest detekcja oraz lokalizacja WNZ. Dla tego typu anten przeprowadzone badania laboratoryjne wskazują, że niemożliwe jest bezpośrednie odniesienie mierzonego sygnału do wartości uzyskanej z pomiaru metodą IEC lub IEEE.



Rys.5. Instalacja anteny UHF z wykorzystaniem zaworu spustowego oleju w transformatorze (widoczny od lewej: generator sygnału, antena UHF, układ adaptacji częstotliwości)

Diagnostyka WNZ – metoda UHF

Pomiary wielkości charakteryzujących WNZ wykorzystywane są w diagnostyce transformatorów mocy. Pomiary te odbywają się często bezpośrednio w miejscu zainstalowania transformatora. Jeżeli zewnętrzne źródło zasilania nie jest dostępne (mobilne stacje pomiarowe bazujące na systemach generatora lub elektroniczne [6]) jedyną możliwością jest zasilanie transformatora bezpośrednio z sieci. Oprzyrządowanie i okablowanie zainstalowane w podstacji generuje sygnały zakłócające pomiar. Jeżeli WNZ w transformatorze mają niewielką intensywność (na przykład ich ładunek pozorny wynosi poniżej 1 nC) pomiar z wykorzystaniem metody elektrycznej respektującej zalecenia IEC (IEEE) jest często niemożliwy. Z tego powodu dokonuje się często pomiarów WNZ w wyższych częstotliwościach, co sprawia jednak, że sygnały pomierzone nie mają odniesienia do realnego ładunku pozornego i pełnią rolę detekcji aktywności WNZ [3].

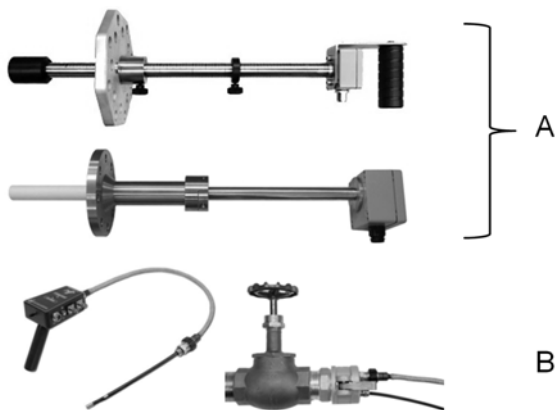


Rys.6. Metoda UHF – sensor płytowy umieszczony w oknie dielektrycznym w kadzi transformatora

Zastosowanie metody UHF, jako niewrażliwej na zakłócenia zewnętrzne, może okazać się rozwiązaniem tego problemu. Obudowa transformatora traktowana może być zatem jako klatka Faradaya blokująca zakłócenia zewnętrzne [7]. Bazując na doświadczeniu, jednym z głównych problemów technicznych w tym przypadku jest dostępność zaworów, przez które może być wprowadzona antena (sonda) do wnętrza transformatora, w którym należy określić poziom wyładowań niepełnych.

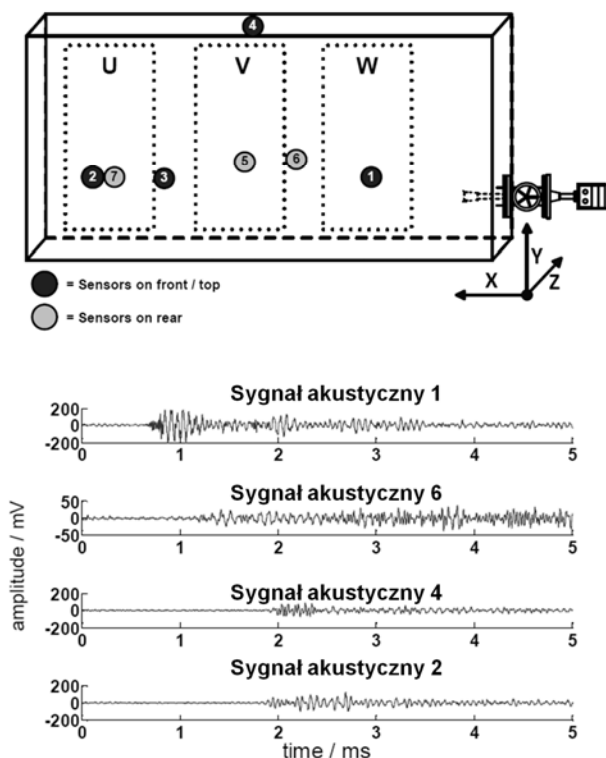
W starszych transformatorach, które nie są przystosowane do umieszczania w nich anten UHF (rysunek 7), często ze względu na brak wiedzy konstrukcyjnej czy dokumentacji technicznej nie można określić dokładnie co znajduje się bezpośrednio za zaworem w kadzi transformatora (przedłużenia rurowe, bariery izolacyjne). Istnieją rozwiązania techniczne pozwalające dokonać jednoczesnej inspekcji i umieszczenia anteny UHF – rozwiązanie to bazuje na działaniu endoskopu.

Ograniczona liczba zainstalowanych sensorów sprawia, że niemożliwe staje się sprawdzenie czułości anteny, a tym samym określenie czy dana część transformatora pozostaje w obszarze detekcji [8].



Rys.7. Przykład konstrukcji anten instalowanych w zaworach transformatora, A – anteny przystosowane do instalowania w zaworach kulowych lub gilotynowych B – antena endoskopowa z ruchomą końcówką

W przypadku gdy możliwe jest zainstalowanie jednej anteny i uzyskany sygnał WNZ jest zadowalający, informacja ta może zostać wykorzystana wraz z metodą akustyczną do lokalizacji miejsca występowania WNZ. Ta kombinacja jest najbardziej efektywną metodą diagnostyki z wykorzystaniem metody UHF [9]. W tym pomiarze detekcja sygnałów akustycznych ułatwiona była poprzez odniesienie ich do wyzwolenia (trigger) uśrednionego sygnału uzyskanego z anteny UHF – rysunek 8.



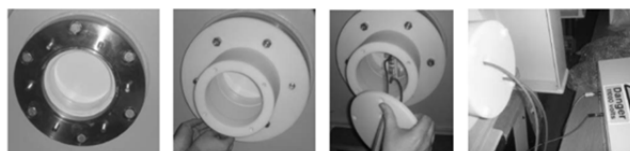
Rys.8. Pomiar UHF wykorzystany do lokalizacji WNZ metodą akustyczną. Pozycja sensorów (rysunek górny), lokalizacja na podstawie analizy czasu występowania sygnału [9]

Próby odbiorcze w fabryce

Podczas odbiorów fabrycznych badanie wylądowań niepełnych podczas prób napięciem indukowanym jest jednym z testów sprawdzających konstrukcję układu izolacyjnego oraz poprawność montażu. W zależności od użytego standardu (IEC lub IEEE) mierzony jest ładunek

pozorny, którego wartość zależy jest od miejsca występowania źródła WNZ, a zatem mierzona wartość może się zmieniać i nie jest powiązana z realnym ładunkiem. Coraz częściej podczas prób odbiorczych wykorzystywane są metody alternatywne. W przypadku stosowania metody UHF często powiązane jest to z zainstalowanym systemem monitoringu. Dla nowych jednostek z łatwością mogą być wykorzystane sensory UHF montowane bezpośrednio na kadzi transformatora z wykorzystaniem okien dielektrycznych. Sensory te charakteryzują się większą czułością w porównaniu z sensorami montowanymi w zaworach olejowych. W zależności od wielkości kadzi i typu transformatora montuje się od 3 do 6 i więcej sensorów. Podczas próby odbiorczej przeprowadza się sprawdzenie czułości anten oraz rejestruje się tak zwany odcisk palca, który w późniejszym czasie staje się punktem odniesienia dla badania trendu zmian WNZ.

Czułość dla poszczególnych anten sprawdza się poprzez iniekcję sygnału napięciowego (w szerokim zakresie częstotliwości) w kolejnych punktach zainstalowanych anten oraz rejestrację poziomu napięcia mierzonego na antenach sąsiednich. Jako alternatywa, jedną z proponowanych metod sprawdzenia czułości systemu pomiarowego UHF, jest tak zwana kalibracja z użyciem sztucznego skalibrowanego źródła WNZ (na przykład swobodna cząstka) i odniesienie wielkości emitowanego sygnału do sygnału napięciowego z kalibratora UHF – rysunek 9.



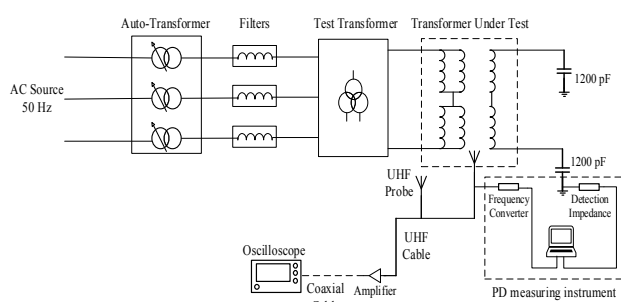
Rys.9. Kalibracja z wykorzystaniem sztucznego źródła WNZ umieszczonego w oknie dielektrycznym

Badania laboratoryjne wykazały że sygnały mierzone za pomocą typowych anten UHF są zależne od wielu czynników zewnętrznych, zatem bezpośrednie odniesienie ich do realnego wylądowania niepełnego, jak i ładunku pozornego mierzonego na przepustach jest utrudnione. Badanie parametrów wylądowań niepełnych metodą UHF może być zatem traktowane jako detekcja WNZ, a ustalenie poziomów wartości akceptacji, tak jak ma to miejsce w przypadku metody opisanej w IEC lub IEEE, jest przedmiotem dalszych badań.

Metoda UHF – ograniczenia i zalety

Przeprowadzone badania wykazały, że nieczułość na zakłócenia zewnętrzne jest uzależniona od typu zainstalowanych przepustów, a także od innych czynników, takich jak na przykład dokładność wykonanych połączeń kablowych. W układzie przedstawionym na rysunku 10 sygnał realnego wylądowania niepełnego został pomierzony za pomocą anteny UHF zainstalowanej w zaworze spustowym oleju w transformatorze oraz poza transformatorem.

Podczas występowania wylądowań niepełnych w izolacji badanego transformatora, sygnał od nich pochodzący, mierzony był za pomocą anteny zainstalowanej wewnątrz transformatora, wprowadzoną przez zawór spustowy oleju, jak również anteną zainstalowaną poza kadzią transformatora. Możliwe jest zatem przenoszenie się zakłóceń sygnału WNZ i interferencja z zakłóceniami zewnętrznymi.



Rys.10. Układ do badania WNZ z wykorzystaniem anten UHF

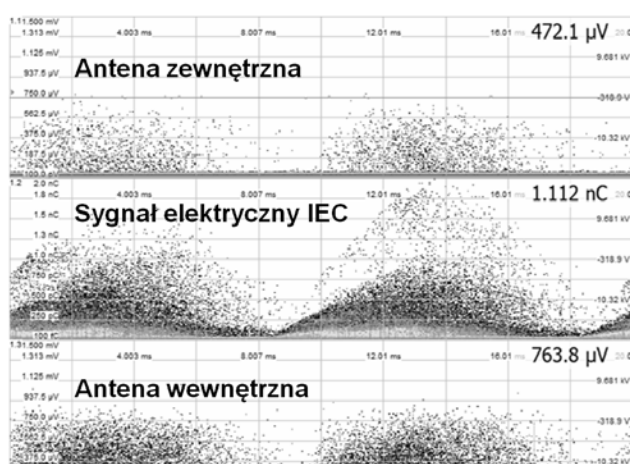
Udowodniono też zależność mierzonego sygnału od miejsca jak i sposobu zainstalowania anteny, co wpływa na wielkość i jakość mierzonego sygnału. Anteny zainstalowane w narożnikach i przy brzegach transformatora rejestrują sygnały o mniejszej amplitudzie, dlatego najlepszym miejscem dla instalację anten jest środek ściany bocznej kadzi transformatora.

Wykorzystywane w diagnostyce anteny instalowane w zaworach użyte zostały w modelu kadzi transformatora. Poprzez oznaczenie parametrów rozpraszania S_{11} i S_{12} , które zdefiniowane są odpowiednio przez równania (1) i (2). S_{11} jest współczynnikiem odbicia, S_{12} współczynnikiem transmisji z wejścia na wyjście (w teorii wzmacniacza parametr ten opisuje izolację pomiędzy portem wyjściowym a portami wejściowymi). Niskie wartości S_{11} wskazują na dopasowanie impedancji pomiędzy anteną a kablem. Wyższa wartość S_{12} wskazuje na lepsze dopasowanie dwóch anten. Wyniki pomiarów tych wielkości w zależności od głębokości zainstalowania anteny przedstawiono na rysunku 12.

$$(1) \quad S_{11} = \sqrt{\frac{\text{Odbita moc anteny 1}}{\text{Moc wejściowa anteny 1}}}$$

$$(2) \quad S_{12} = \sqrt{\frac{\text{Otrzymana moc dla anteny 2}}{\text{Moc wejściowa anteny 1}}}$$

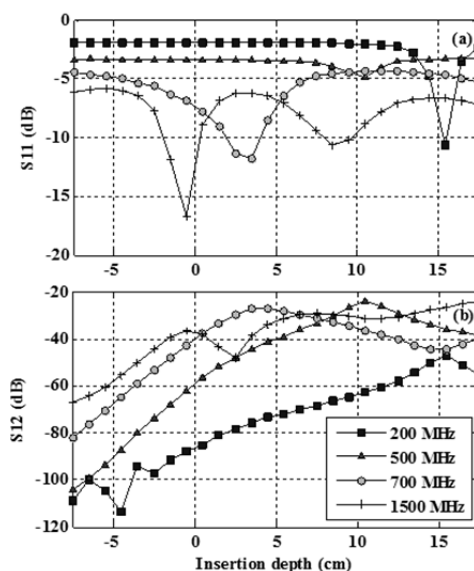
gdzie: S_{11} – współczynnik odbicia, S_{12} – współczynnik transmisji.



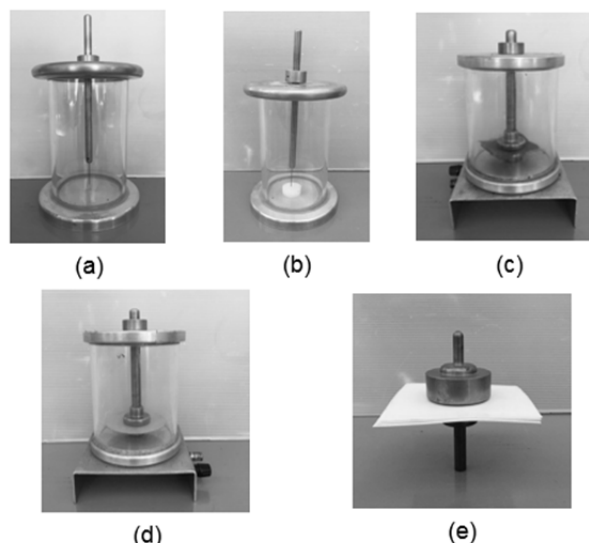
Rys.11. Pomiar WNZ za pomocą anteny zewnętrznej, metoda elektryczna IEC i anteny zainstalowanej bezpośrednio w transformatorze

Jednym z narzędzi diagnostycznych wykorzystywanych podczas analizy WNZ jest rozpoznawanie typu źródła (w tym przypadku układu elektrod, pomiędzy którymi

występują wyładowania) na podstawie analizy obrazów Phi-Q-N (ładunek pomierzony w czasie i przedstawiony na diagramie jako zależność amplitudy i aktywności źródła od położenia względem jednego okresu napięcia). W badaniach laboratoryjnych zastosowano typowe układy elektrod: (a) wyładowanie koronowe w postaci elektrody ostrzowej nad elektrodą płaską, (b) wyładowanie w izolacji polietylenowej, a także elektrodą umieszczoną na impregnowanym papierze (c), pressboardzie (d) i izolacji żywicznej (e) – rysunek 13.

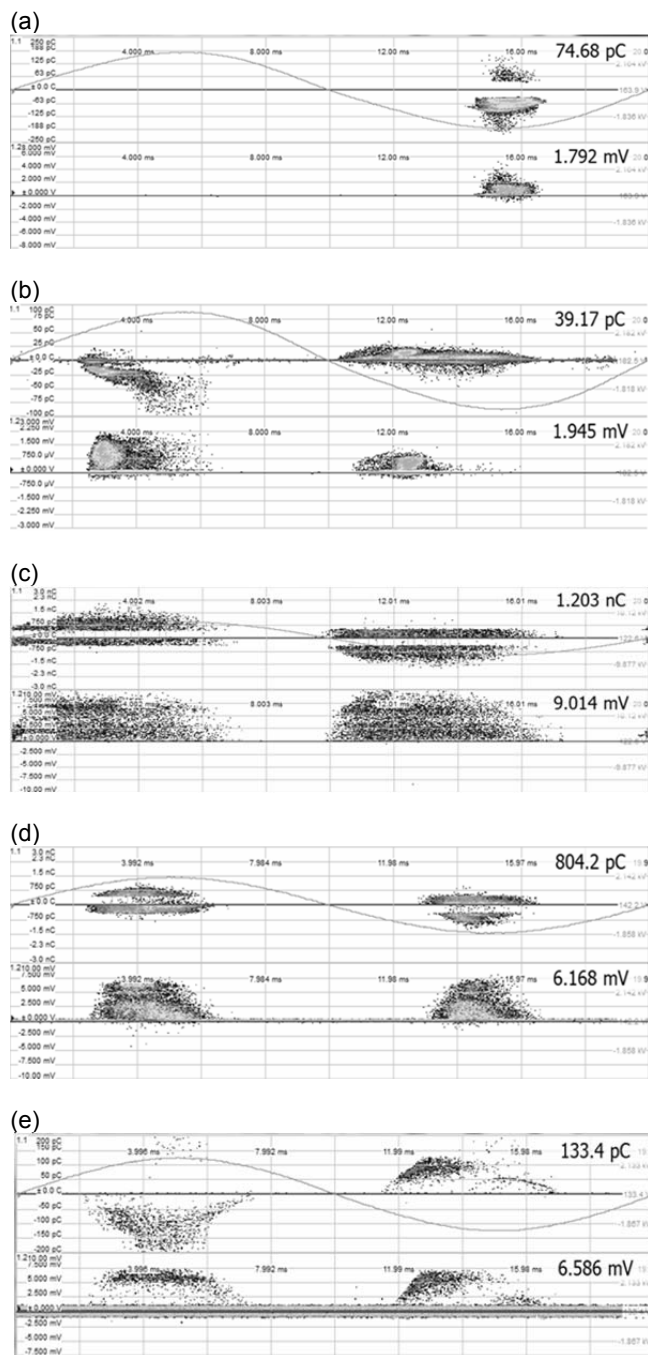


Rys.12. Parametry S_{11} i S_{12} w zależności od głębokości zainstalowania anten i częstotliwości pomiarowej



Rys.13. Modelowe źródła wyładowań niepełnych o różnych układach elektrod – opis w tekście

Tak przygotowane modele umieszczono w kadzi transformatora i poddano działaniu wysokiego napięcia. Sygnały WNZ mierzono jednocześnie uwzględniając zalecenia IEC oraz za pomocą anteny UHF umieszczonej w zaworze olejowym. Na rysunku 14 przedstawiono uzyskane obrazy Phi-Q-N (PD Pattern). Badania te pozwoliły dowieść podobieństwa uzyskanych obrazów, warto jest jednak odnosić, że wartości napięć jak i ładunków pozornych różniły się od siebie, a ich amplituda nie była liniowa.



Rys.14. Wykresy PD Pattern uzyskane przy pomiarze z wykorzystaniem modelowych źródeł WNZ (wartości pC – metoda elektryczna IEC, wartości mV – pomiary UHF)

Wnioski

W artykule przedstawiono alternatywne metody pomiaru wyładowań niezupełnych wykorzystywane w diagnostyce WNZ. Jedną z wyróżniających się metod jest badanie

wyładowań niezupełnych przy wysokiej częstotliwości – UHF. Metoda ta, choć niepozbawiona jest pewnych wad, takich jak np. zależność sygnału mierzonego od miejsca instalacji anteny, czy niemożność odniesienia sygnału do ładunku pozornego, posiada zalety, takie jak względna czułość na sygnały WNZ, czy możliwość dokonania bezpośredniego pomiaru w kadzi transformatora, która to kadź blokuje zakłócenia zewnętrzne. Metoda ta zyskuje na ważności i coraz częściej wykorzystywana jest w systemach monitoringu, a także jako uzupełnienie dla innych metod, na przykład używana jako sygnał „trigger” w lokalizacji akustycznej. Aby metoda UHF mogła w pełni zastąpić konwencjonalną metodę elektryczną potrzebne są dalsze badania oraz poznawanie ograniczeń tej metody.

Artykuł finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Programu Badań Stosowanych w ramach projektu PBS3/A4/12/2015 pt. "System monitoringu wyładowań niezupełnych w transformatorze energetycznym oparty na wykorzystaniu metod EA, HF i UHF".

Autorzy: mgr inż. Janusz Szczechowski, ABB Inc. 4350 Semple Avenue, Saint Louis, Missouri, USA, E-mail: janusz.szczechowski@us.abb.com; dr hab. inż. Krzysztof Siodła, prof. nadzw., Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, krzysztof.siodla@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Schwarz R., Muhr M., Pack S., Partial discharge detection in oil with optical methods, *ICDL 2005 IEEE International Conference*, 2005
- [2] Howells E., Norton E., Parameters affecting the velocity of sound in transformer oil, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984
- [3] Albuquerque B., Marabuzzi G.E., Andreoli A., Campos F., Ulson J., A low cost system for acoustic monitoring of partial discharge in power transformer by Piezoelectric Sensor, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, 3225-3231, 2016
- [4] Duval M., De Pablo A., Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 database, *IEEE Elec. Insul. Mag.*, vol. 17, no. 2, March/April, 31-41, 2001
- [5] ZPBE Energopomiar-Elektryka Sp. z o.o., Ramowa instrukcja eksploatacji transformatorów, Gliwice, 2012
- [6] Szczechowski J., Werle P., Steiger M., Test arrangement for AC voltage testing of electrical high voltage components, Patent 8643381, 04 02 2014
- [7] Robles G., Albarracin R., Martinez-Tarifa J., Shielding Effect of Power Transformers Tanks in the Ultrahigh Frequency Detection of Partial Discharges, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 2, 678-684, 2013
- [8] Meijer S., Judd M., Tenbohlen S., Sensitivity Check for Radio Frequency Partial Discharge Detection for Power Transformers, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 2008
- [9] Coenen S., Mueller A., Beltle M., Kornhuber S., UHF and acoustic partial discharges localisation in transformers, *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, 2011