

doi:10.15199/48.2024.11.37

Monitoring on-line wylądowań niezupełnych w transformatorze energetycznym realizowany równocześnie metodą emisji akustycznej i metodą ultra wysokiej częstotliwości

Streszczenie. W artykule omówiono możliwości i korzyści jakie daje monitoring on-line wylądowań niezupełnych (WZN) w transformatorze energetycznym realizowany równocześnie metodą emisji akustycznej (EA) i metodą ultra wysokiej częstotliwości (UHF). Dodatkowo zaprezentowano wyniki badań uzyskane obiema metodami na kilku wybranych transformatorach, na których oprócz detekcji wylądowań niezupełnych w trybie monitoringu krótkookresowego przeprowadzono lokalizację źródeł WZN techniką trilateracyjną.

Abstract. The article discusses the potential and advantages of online monitoring of partial discharges (PD) in power transformers using both acoustic emission (EA) and ultra-high frequency (UHF) methods simultaneously. It also presents research results obtained from both methods on several selected transformers, where, in addition to detecting partial discharges in short-term monitoring, the localization of PD sources was performed using the trilateration technique. (*Online partial discharge monitoring of power transformers based on the simultaneous use of AE and UHF methods.*)

Słowa kluczowe: wylądowania niezupełne, monitoring on-line WZN, transformator energetyczny, emisja akustyczna, UHF.

Keywords: partial discharge, online PD monitoring, power transformer, acoustic emission, UHF.

Wstęp

Niezawodne funkcjonowanie transformatorów pozwala zapewnić ciągłość dostaw energii elektrycznej i stabilność systemu energetycznego. Poważnym problemem, nie tylko w skali kraju, ale również na całym świecie jest wysoki odsetek jednostek, które przekroczyły zaprojektowany okres eksploatacji szacowany zwykle na ok. 30–35 lat. Ze względu na wysokie koszty zakupu, transportu i ubezpieczenia oraz długi czas realizacji zamówienia, transformatory energetyczne po przekroczeniu okresu trwałości nie są natychmiast wymieniane na nowe. Duże koszty wymiany jednostki skłaniają operatorów energetycznych do maksymalnego wydłużania czasu jej eksploatacji, co niestety skutkuje rosnącym ryzykiem awarii.

Z raportu przygotowanego przez stowarzyszenie CIGRE wynika, że wylądowania niezupełne (WZN) są jednym z najczęściej występujących mechanizmów degradacji izolacji, które prowadzą do awarii transformatorów [1]. Dynamika rozwoju defektu spowodowana działaniem WZN zależy od wielu czynników, m.in. rodzaju samego wylądowania i jego energii, umiejscowienia defektu, stopnia zatarzenia i zawilgocenia układu izolacyjnego, charakterystyki obciążenia wpływającej na temperaturę oleju oraz proces migracji wilgoci. W niektórych przypadkach defekt może rozwijać się przez wiele lat eksploatacji transformatora nie doprowadzając do jego awarii. W innych przypadkach może rozwijać się niezwykle szybko, najczęściej w konsekwencji losowego zdarzenia, jak przepięcie czy nagły wzrost temperatury oleju spowodowany przeciążeniem jednostki lub awarią układu chłodzenia. Często zdarza się, że dynamika rozwoju defektu wzrasta w jego końcowym stadium, tuż przed samą awarią. Z tego powodu w ostatnich latach na znaczeniu zyskały systemy monitoringu on-line wylądowań niezupełnych [2-6]. Główne zalety, które dają monitoringowi on-line WZN przewagę nad badaniami okresowymi, to:

- możliwość natychmiastowego wykrycia zapłonu WZN oraz nagłego, skokowego wzrostu ich intensywności,
- możliwość wykrycia trendu wzrostowego wartości parametrów opisujących impulsy WZN, dzięki czemu służby eksploatacyjne mogą odpowiednio szybko opracować i wdrożyć procedury minimalizujące ryzyko awarii,

- możliwość dynamicznego kształtowania wymagań w zakresie okresowych badań diagnostycznych (np. ich przyspieszenie lub odroczenie) oraz planowania przestojów i prac konserwacyjnych w oparciu o dane rejestrowane przez system monitoringu WZN,
- możliwość wykrycia zależności pomiędzy aktywnością WZN a parametrami pracy transformatora, takimi jak napięcie, temperatura oleju czy pozycja podobciążeniowego przełącznika zaczeń, co z kolei otwiera możliwość prognozowania aktywności WZN w oparciu o modele statystyczne i metody sztucznej inteligencji,
- możliwość oszacowania przybliżonej lokalizacji źródła WZN na podstawie analizy sygnałów rejestrowanych przez przetworniki emisji akustycznej, a następnie dokładnego ustalenia położenia defektu za pomocą techniki trilateracyjnej.

Obecnie do najważniejszych, bezpośrednich metod detekcji WZN przystosowanych do pracy w trybie monitoringu on-line należy metoda emisji akustycznej (EA) i metoda elektromagnetyczna ultra wysokiej częstotliwości (UHF). Każda z tych metod ma swoje zalety i ograniczenia, dlatego żadna z nich nie może być uznana za idealną i wystarczającą technikę do monitorowania wylądowań niezupełnych. W aspekcie zaawansowanej diagnostyki transformatorów, coraz częściej sugeruje się równoczesne stosowanie obu metod [7-11]. Główną zaletą tej strategii jest przede wszystkim zwiększenie wiarygodności detekcji wylądowań. Wynika to z faktu, że omawiane metody bazują na różnych zjawiskach fizycznych, zatem sygnały rejestrowane tymi metodami nie będą jednocześnie obarczone zakłóceniami jednego rodzaju (tzn. sygnały EA nie będą podatne na zakłócenia elektromagnetyczne, a sygnały UHF na zakłócenia akustyczne). Podczas monitoringu transformatora metodą EA, potencjalnymi źródłami zakłóceń akustycznych są: pompy olejowe, wentylatory, rdzeń (tzw. szum Barkhausena), intensywne zjawiska pogodowe (np. obfite opady gradu) i operacje przełącznika zaczeń. Z kolei w metodzie UHF źródłem zakłóceń mogą być: nadajniki stacji radiowych i służb cywilnych, systemy nawigacji lotniczej oraz nadajniki operatorów telewizji cyfrowej DVB-T i telefonii komórkowej GSM. Zatem jeśli system pomiarowy rejestruje wyłącznie

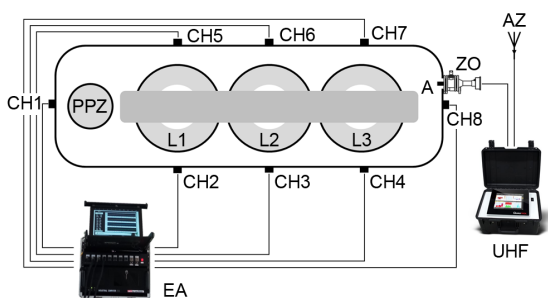
impulsy jednego rodzaju (UHF lub EA), to ich źródłem mogą być zarówno zakłócenia jak i wyładowania niepełne. Z kolei w przypadku, gdy system równocześnie rejestruje impulsy UHF i EA, a przy tym zmiany ich parametrów (amplituda, energia, częstotliwość itp.) są skorelowane, wtedy z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że pochodzą od wyładowań niepełnych. Dodatkowo wiarygodność takiej diagnozy można zwiększyć znajdując korelację pomiędzy parametrami WNZ a podstawowymi parametrami transformatora rejestrowanymi przez nadrzędny system SCADA.

Systemy monitoringu on-line wyładowań niepełnych

Do monitorowania sygnałów EA generowanych przez wyładowania niepełne użyto opracowanego na Politechnice Poznańskiej systemu PDtracker Portable, wyposażonego w osiem stykowych przetworników piezoelektrycznych typu A6890 zoptymalizowanych do detekcji WNZ w izolacji papierowo-olejowej [12,13]. System w czasie rzeczywistym rejestrował takie parametry emisji akustycznej jak: liczba impulsów EA oraz wartość średnią i maksymalną ich amplitudy i energii. Liczba impulsów podawana jest w procentach przy czym dla konfiguracji ośmiokanałowej systemu maksymalna liczba rejestrowanych impulsów w ciągu minuty wynosi 62400 (7800 impulsów na minutę na kanał).

Drugim, równolegle użytym w badaniu transformatorów urządzeniem pomiarowym był Qualitrol Portable PDM przeznaczony do monitorowania wyładowań niepełnych metodą UHF. System posiada cztery kanały pomiarowe, przy czym pierwsze trzy kanały służą do podłączenia detektorów WNZ pracujących w paśmie VHF/UHF natomiast ostatni kanał przeznaczony jest do podłączenia specjalnej anteny, której zadaniem jest redukcja zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych. Dynamiczny zakres czułości torów pomiarowych wynosi od -35 dBm do -75 dBm, a amplituda rejestrowanych impulsów jest odnieszona do maksymalnej wartości zakresu pomiarowego i podawana w procentach. Oprogramowanie systemu rejestruje m.in.: liczbę, amplitudę i rozkłady fazowo-rozdzielcze PRPD (ang. Phase Resolved Partial Discharge Pattern) impulsów wyładowań niepełnych, których obraz wykorzystywany jest w procesie identyfikacji defektu.

W przypadku każdego z badanych transformatorów, sześć przetworników emisji akustycznej instalowano na wprost każdej z trzech faz strony dolnego i górnego napięcia, natomiast pozostałe dwa przetworniki instalowano na bocznych ścianach kadzi transformatora (rys. 1).



Rys.1. Schemat ideowy monitoringu on-line WNZ prowadzonego równocześnie metodą emisji akustycznej i metodą ultra wysokiej częstotliwości: CH1-CH8 – piezoelektryczne przetworniki EA, L1, L2, L3 – uzwojenia poszczególnych faz transformatora, PPZ – podobciążeniowy przełącznik zaczeppów, ZO – zawór spustowy oleju, A – antena prętowa Qualitrol CMD01591, AZ – zewnętrzna antena przeciwzakłóceńowa, EA – system pomiarowy emisji akustycznej PDtracker Portable, UHF – system pomiarowy ultra wysokiej częstotliwości Qualitrol Portable PDM.

Do detekcji impulsów UHF wykorzystano antenę prętową typu Qualitrol CMD01591, którą wprowadzano do zaworu spustowego oleju (rys. 2). Podczas umieszczania anteny w zaworze olejowym monitorowano wartość współczynnika fali stojącej napięcia (ang. Voltage Standing Wave Ratio, VSWR), na którego wartość wpływa położenie anteny względem kadzi. W tym celu umieszczano antenę w takiej pozycji aby wartość VSWR była jak najbardziej zbliżona do jedności. Do pomiarów współczynnika VSWR użyto przenośnego, wektorowego analizatora sieci typu MEASALL KC901S+.



Rys.2. Widok ogólny anteny prętowej typu Qualitrol CMD01591 zainstalowanej w zaworze spustowym oleju transformatora.

Obiekty badań

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badania WNZ uzyskane w trybie monitoringu ciągłego, na dwóch autotransformatorach sieciowych, przy równoczesnym wykorzystaniu metody emisji akustycznej i metody elektromagnetycznej UHF, oznaczone na potrzeby artykułu jako transformator „A” i „B”. Są to jednostki o mocy znamionowej 160 MVA o uzwojeniach w układzie połączeń YNA0yN0, na napięcia znamionowe 230/120/15,75 kV. Dodatkowo w artykule przedstawiono wyniki lokalizacji źródła WNZ wykonanej techniką trilateracyjną dla obu badanych jednostek. Monitoring transformatora „A” prowadzono w okresie tygodnia od 17 do 24 października 2023, natomiast monitoring transformatora „B” był prowadzony przez 24 godziny, w dnach 6 i 7 listopada 2023.

Wyniki badań

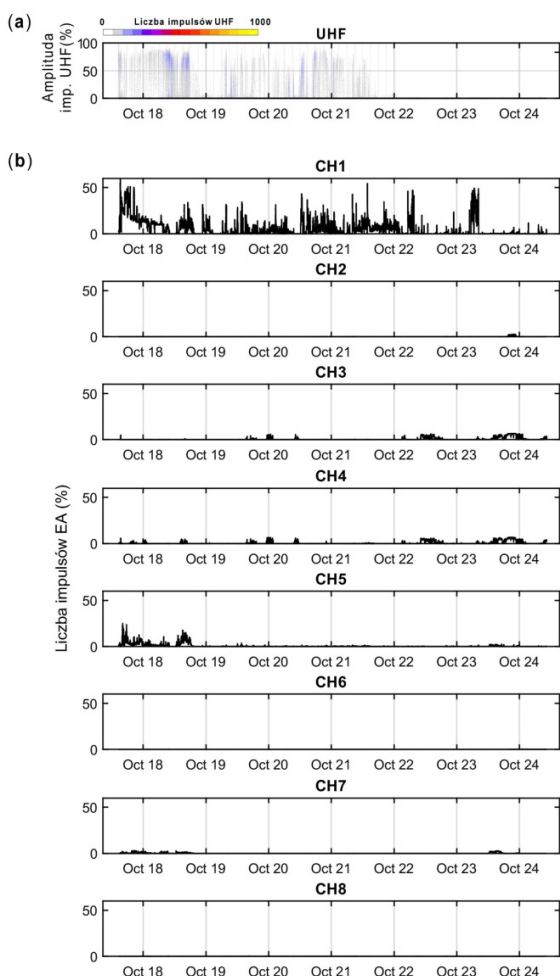
Monitoring i lokalizacja wnz – transformator „A”

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki rejestracji sygnałów UHF oraz sygnałów emisji akustycznej rejestrowanych w tym samym czasie przez osiem przetworników EA zamontowanych na kadzi badanego transformatora. Obydwa systemy zostały uruchomione w dniu 17.10.2023 o godzinie 15:00 i od momentu ich załączenia obserwowano wysoką intensywność wyładowań niepełnych. W wypadku badania WNZ metodą emisji akustycznej (EA), maksymalna liczba impulsów zarejestrowana przez przetwornik CH1, umieszczony w pobliżu podobciążeniowego przełącznika zaczeppów, wyniosła 4660 impulsów na minutę, tj. około 60% przepustowości toru pomiarowego. Przez pierwsze dwa dni pracy systemu monitoringu umiarkowaną intensywność impulsów EA rejestrował również przetwornik CH5 zainstalowany w pobliżu fazy L1 po stronie DN. Pozostałe przetworniki emisji akustycznej nie rejestrowały impulsów, bądź rejestrowały impulsy o niskiej intensywności. W wypadku badania WNZ metodą UHF, system rejestrował liczne impulsy o bardzo wysokiej amplitudzie sięgającej 90% maksymalnej wartości zakresu pomiarowego (rys. 3).

W monitorowanym transformatorze dominowały okresy wysokiej i umiarkowanej aktywności impulsów EA i UHF. Z kolei momenty całkowitego zaniku sygnałów były obserwowane niezwykle rzadko. Warto zaznaczyć, że okresy największej aktywności impulsów EA i UHF w dużej

mierze pokrywały się, co pozwala wnioskować, że ich wspólnym źródłem był defekt układu izolacyjnego generujący wyładowania niezupełne.

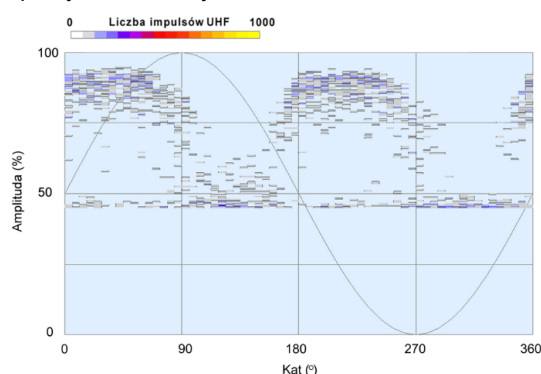
Wyładowania niezupełne występują w określonych warunkach, lecz ich aktywność zależy od wielu czynników, takich jak: (a) temperatura układu izolacyjnego, na którą wpływ ma zmienne obciążenie transformatora, temperatura otoczenia i wydajność systemu chłodzenia, (b) zawilgocone układu izolacyjnego oraz dwukierunkowa migracja wilgoci pomiędzy izolacją celulozową a olejem wywołana zmianami temperatury (woda koncentrująca się na granicy faz *olej-celuloza* może doprowadzić do zapióru wyładowań powierzchniowych), (c) zmiany napięcia, w tym jego nagłe, skokowe wzrosty wywołane przepięciami atmosferycznymi i łączeniowymi. W efekcie tego wyładowania niezupełne wykazują cechy zjawiska stochastycznego, które bardzo trudno się prognozuje. Dlatego, jeśli w programie badań transformatora jest również lokalizacja źródła wyładowań, to powinno się ją bezzwłocznie wykonać w momencie wykrycia przez system monitoringu wysokiej i stabilnej aktywności impulsów EA i UHF. Właśnie taka sytuacja miała miejsce w analizowanym przypadku transformatora „A”. Drugiego dnia monitoringu, od wczesnych godzin porannych obserwowano stabilny, wysoki poziom impulsów UHF i EA, przy czym jak już wcześniej wspomniano, zdecydowanie największą aktywność emisji akustycznej wykazywał przetwornik CH1, który zainstalowany był w pobliżu podobciążeniowego przełącznika zacze- pów.



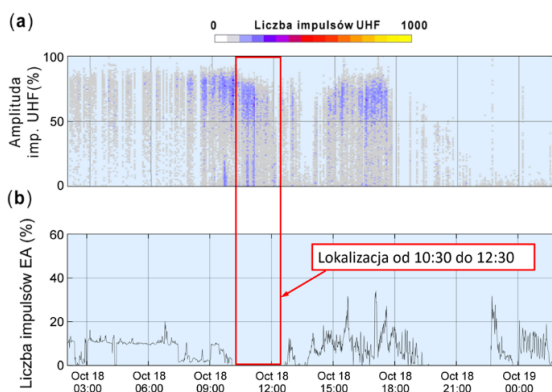
Rys.3. Wyniki monitoringu on-line wyładowań niezupełnych uzyskane na transformatorze „A” w przedziale czasu od 17 do 24 października 2023: (a) amplituda i liczba impulsów UHF, (b) liczba impulsów emisji akustycznej zarejestrowana przez osiem przetworników EA.

Co warto podkreślić, rejestrowane w tym czasie obrazy rozkładów fazowo-rozdzielczych PRPD (rys.4) były klasyfikowane przez oprogramowanie systemu monitoringu UHF jako typowe dla wyładowań niezupełnych. Dlatego w oparciu o zebrane dane, o godz. 10:30 zdecydowano się przesterwać monitoring prowadzony metodą emisji akustycznej i przeprowadzić lokalizację źródła WNZ, która trwała do godz. 12:30.

Przez cały czas trwania procedury lokalizacji defektu, system monitoringu UHF rejestrował wysoką aktywność WNZ (rys. 5). Niestety dnia 22 października o godz. 01:50 doszło do przedwczesnego zakończenia akwizycji danych UHF, co było spowodowane awarią systemu podtrzymania zasilania w czasie, kiedy na stacji wystąpiły kilkakrotne wyłączenia napięcia (w nocy z 21 na 22 października). Z danych uzyskanych przez nadrzędny system monitoringu transformatora SYNDIS ES wynikało, że nawet rejestrator położenia PPZ podawał w tym czasie błędne dane. Zaistniała sytuacja nie miała jednak znaczącego wpływu na uzyskany ogólny obraz aktywności wyładowań niezupełnych w badanym transformatorze.



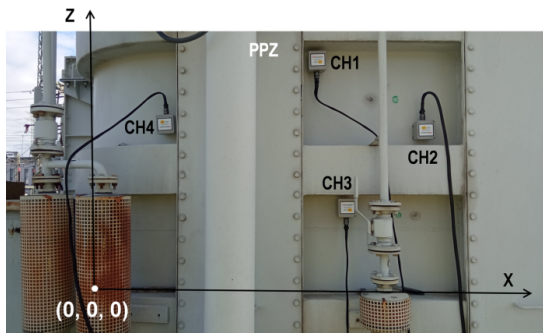
Rys.4. Charakterystyczny dla wyładowań niezupełnych obraz rozkładu fazowo-rozdzielczego impulsów UHF zarejestrowany 18 października 2023 roku o godz. 9:30 w transformatorze „A”



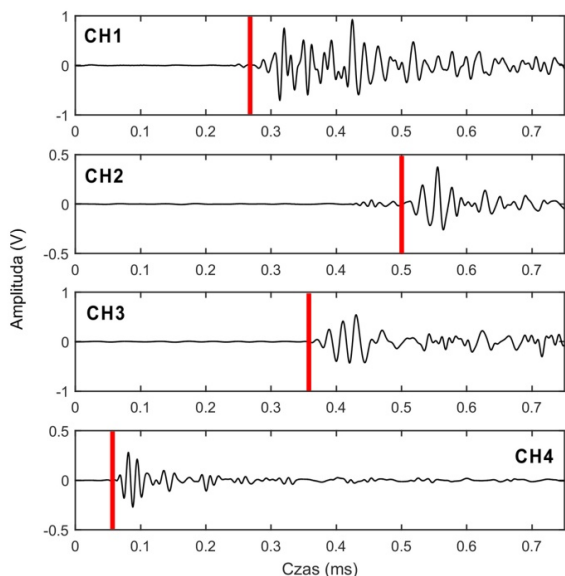
Rys.5. Wyniki monitoringu on-line wyładowań niezupełnych uzyskane na transformatorze „A” w dniu 18 października 2023 z zaznaczonym przedziałem czasu, w którym przeprowadzono lokalizację źródła WNZ: (a) amplituda i liczba impulsów UHF, (b) liczba impulsów emisji akustycznej zarejestrowana przetwornikiem CH1.

W celu lokalizacji źródeł WNZ w transformatorze „A” wykonano rejestrację impulsów EA w trzech różnych konfiguracjach położenia przetworników opisanych dalej jako „Test 1”, „Test 2” i „Test 3”. Ponieważ z informacji pozyskanych z monitoringu EA wynikało, że źródło WNZ znajduje się najprawdopodobniej w pobliżu przełącznika zacze- pów, dlatego procedurę lokalizacji ograniczono tylko do tego obszaru. Dla trzech testów przyjęto taki sam kartezjański układ współrzędnych, który pokazano na

rysunku 6. Wszystkie koordynaty opisujące położenie przetworników EA w poszczególnych testach pomiarowych zestawiono w tabeli 1. Lokalizację źródeł WNZ wykonano przy użyciu techniki trilateracyjnej, która polega na pomiarze różnic czasów przybycia sygnału (z ang. TDOA – Time Difference of Arrival) do co najmniej czterech przetworników EA. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe emisji akustycznej z zaznaczonymi początkami sygnałów, które zarejestrowano w trakcie „Testu 2”.



Rys.6. Zdjęcie boku kadzi transformatora „A” z zainstalowanymi przetwornikami EA („Test 2”) i naniesionym kartezjańskim układem współrzędnych przyjętym na potrzeby lokalizacji źródła WNZ techniką trilateracyjną.



Rys.7. Przykładowe przebiegi czasowe impulsów EA z zaznaczonym czerwonym kolorem początkiem sygnału, które zarejestrowano w trakcie „Testu 2”.

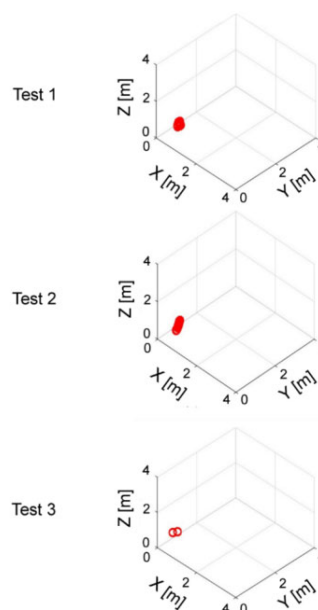
Tabela 1. Współrzędne położenia i oznaczenie przetworników EA użytych w poszczególnych testach pomiarowych („Test 1”, „Test 2” i „Test 3”), w trakcie których lokalizowano źródło WNZ.

Nr Testu	Oznaczenie przetwornika	Współrzędne przetwornika		
		X [m]	Y [m]	Z [m]
1	CH1	1,130	0	0,985
	CH2	1,580	0	0,700
	CH3	1,140	0	0,710
	CH4	1,630	0	0,980
2	CH1	1,130	0	0,985
	CH2	1,580	0	0,700
	CH3	1,250	0	0,360
	CH4	0,560	0	0,720
3	CH1	1,130	0	0,985
	CH2	0	0,590	0,895
	CH3	1,14	0	0,700
	CH4	0	0,790	0,750

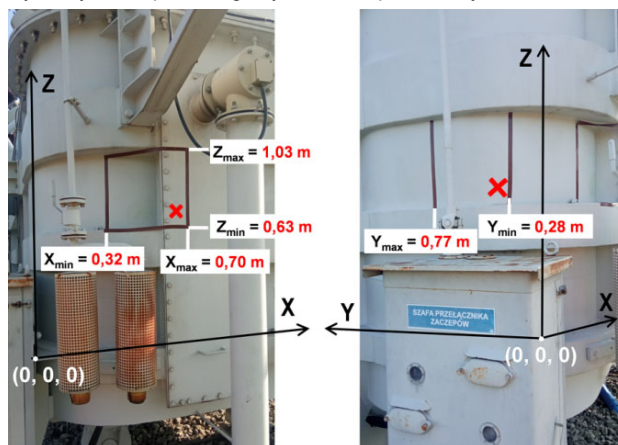
Przeprowadzone testy pozwoliły potwierdzić, że źródłem impulsów WNZ był defekt występujący w podobieżeniowym przełączniku zaczeów. W tabeli 2 zestawiono zakresy oraz wartości modalne (najczęściej występujące rozwiązanie) obliczonych współrzędnych źródła WNZ, natomiast graficzną interpretację wyników lokalizacji zilustrowano na rysunkach 8 i 9.

Tabela 2. Współrzędne wskazujące najbardziej prawdopodobną lokalizację źródła wyladowań oraz zakres współrzędnych, w którym znajdowały się rozwiązania dla transformatora „A”.

Zakres wyznaczonych współrzędnych źródła WNZ		
X [m]	Y [m]	Z [m]
0,32 ÷ 0,70	0,28 ÷ 0,77	0,63 ÷ 1,03
Wartość modalna współrzędnych źródła WNZ		
X [m]	Y [m]	Z [m]
0,65	0,33	0,70



Rys.8. Graficzna prezentacja wyników lokalizacji źródła WNZ uzyskanych dla poszczególnych testów pomiarowych.

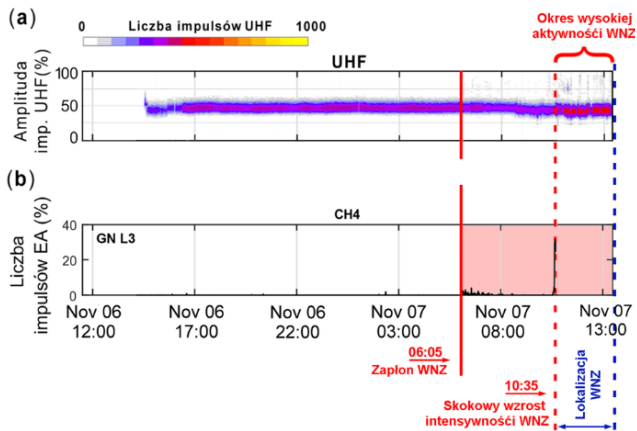


Rys.9. Przedstawione na zdjęciach kadzi transformatora „A” zakresy oraz wartości modalne (najczęściej występujące rozwiązanie, które zaznaczono na fotografii czerwoną literą „x”) obliczonych współrzędnych źródła WNZ.

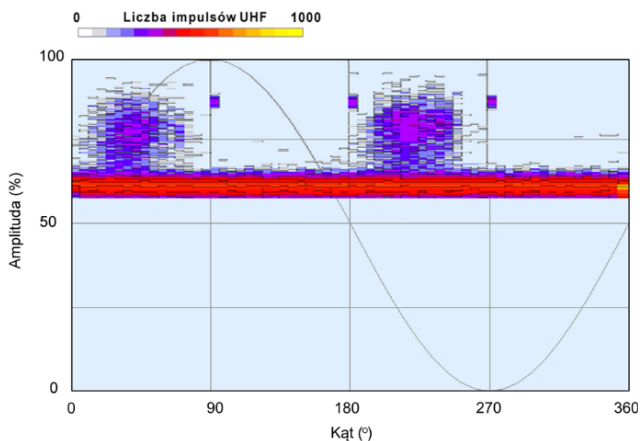
Monitoring i lokalizacja wnz – transformator B

W wypadku transformatora „B” w dniach 6 i 7 listopada 2023 roku przeprowadzono 24-godzinny monitoring w dniach 6 i 7 listopada 2023. W transformatorze nie stwierdzono występowania impulsów WNZ od momentu

załączenia systemów monitoringu WNZ, tj. 06.11.2023 godz. 14:02 do dnia 07.11.2023, godz. 6:05, kiedy zaczęto równocześnie rejestrować impulsy UHF i EA, przy czym sygnały akustyczne rejestrowane były wyłącznie przez przetwornik CH4 umieszczony w pobliżu fazy L3 strony górnego napięcia (rys.10). Obrazy rozkładów fazowo-rozdzielczych impulsów UHF potwierdziły obecność wyładowań niezupełnych (rys.11).



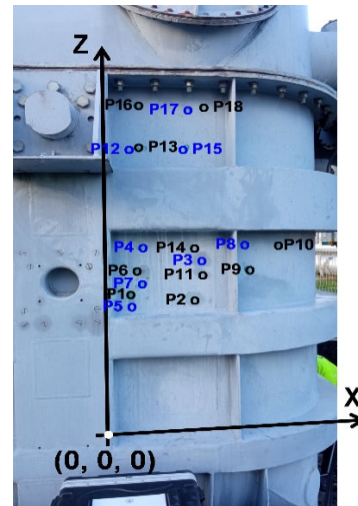
Rys.10. Wyniki 24-godzinnego monitoringu on-line wyładowań niezupełnych uzyskane na transformatorze „B”: (a) amplituda i liczba impulsów UHF, (b) liczba impulsów emisji akustycznej zarejestrowana przez przetwornik CH4, który zainstalowany był w pobliżu fazy L3, po stronie górnego napięcia.



Rys.11. Obraz rozkładu fazowo-rozdzielczego impulsów UHF zarejestrowany 07.11.2024 o godz. 9:31, który potwierdził obecność wyładowań w badanym transformatorze „B”.

Z tego powodu, podobnie jak miało to miejsce w przypadku transformatora „A”, zdecydowano się przerwać monitoring realizowany metodą emisji akustycznej i przeprowadzić procedurę lokalizacji źródła WNZ techniką trilateracyjną. W tym czasie nieprzerwanie prowadzono monitoring metodą UHF, który wykazywał wysoką aktywność wyładowań niezupełnych. W celu precyzyjnego zlokalizowania defektu, impulsy emisji akustycznej rejestrowano w 18 różnych punktach pomiarowych, w okolicy fazy L3 strony górnego napięcia. Miejsca montażu przetworników emisji akustycznej oraz przyjęty układ współrzędnych zilustrowano na rysunku 12, natomiast koordynaty przetworników zestawiono w tabelicy 3.

Wyniki lokalizacji zestawione w tabeli 4 i zilustrowane graficznie na rysunku 13 sugerują, że wyładowania niezupełne mogą generować się w stosunkowo dużym fragmencie układu izolacyjnego przyczyniając się do jego degradacji.



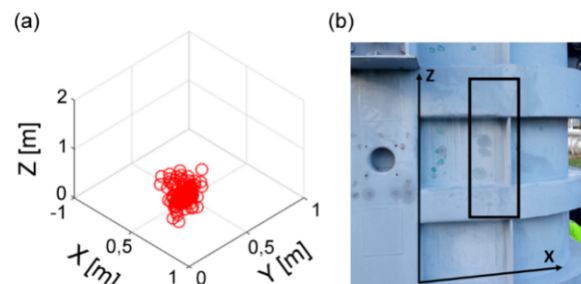
Rys.12. Zdjęcie fragmentu kadzi transformatora „B” z naniesionym kartezyjskim układem współrzędnych przyjętym na potrzeby lokalizacji źródła WNZ techniką trilateracyjną i zaznaczonymi 18 punktami pomiarowymi, w których instalowano przetworniki EA.

Tabela 3. Współrzędne położenia przetworników EA instalowanych w 18 punktach pomiarowych.

Punkt	Współrzędne			Punkt	Współrzędne		
	X [m]	Y [m]	Z [m]		X [m]	Y [m]	Z [m]
P1	0,09	0	0,73	P10	0,75	0,05	1
P2	0,38	0	0,7	P11	0,4	0	0,85
P3	0,41	0	0,91	P12	0,09	0	1,5
P4	0,13	0	0,99	P13	0,11	0	1,51
P5	0,09	0	0,7	P14	0,33	0	0,99
P6	0,1	0	0,86	P15	0,33	0	1,51
P7	0,13	0,01	0,78	P16	0,1	0	1,73
P8	0,59	0,01	1	P17	0,33	0	1,7
P9	0,6	0	0,87	P18	0,41	0	1,72

Tabela 4. Zakres współrzędnych źródła WNZ wyznaczonych techniką trilateracyjną w transformatorze „B”.

Zakres wyznaczonych współrzędnych źródła WNZ		
X [m]	Y [m]	Z [m]
0,31 ÷ 0,61	0,08 ÷ 0,34	0,42 ÷ 1,32



Rys.13. Wynik lokalizacji źródeł WNZ w transformatorze „B”: (a) przestrzeń znalezionych rozwiązań, (b) zakres znalezionych rozwiązań współrzędnej X (od 0,31 m do 0,61 m) i Z (od 0,42 m do 1,32 m) źródła WNZ naniesiony na zdjęcie fragmentu kadzi transformatora (faza L3 GN).

Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań potwierdziły wymierne korzyści, jakie daje monitoring on-line wyładowań niezupełnych prowadzony równocześnie metodą UHF i EA, z których najważniejsze to zwiększenie wiarygodności detekcji WNZ oraz możliwość wskazania fazy, w której znajduje się źródło sygnału emisji akustycznej, a następnie

precyzyjnego zlokalizowania jego położenia techniką trilateracyjną.

Warto zaznaczyć, że wszystkie nowe, krajowe transformatory energetyczne dużej mocy są wyposażone w co najmniej dwa aktywne okna dielektryczne. Dzięki większej liczbie sensorów WNZ, zwłaszcza anten UHF, możliwe będzie jeszcze skuteczniejsze monitorowanie i lokalizowanie wyładowań.

Obecnie autorzy prowadzą prace badawcze nad rozbudową systemu monitoringu o możliwość rejestracji impulsów WNZ konwencjonalną metodą elektryczną. W tym celu opracowywane są urządzenia sprzęgające instalowane na zaciskach pomiarowych izolatorów przepustowych.

Autorzy: dr hab. inż. Jarosław Gielniak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl; dr inż. Wojciech Sikorski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: wojciech.sikorski@put.poznan.pl;

LITERATURA

- [1] Tenbohlen S., Jagers J., Vahidi F., Bastos G., Desai B., Diggin B., Fuhr J., Gebauer J., Krüger M., Lapworth J. Transformer Reliability Survey, *Technical Brochure 642*; CIGRE: Paris, France, 2015.
- [2] Sikorski W., Walczak K., Moranda H., Gil W., Andrzejewski M. Partial discharge on-line monitoring system based on acoustic emission method— operational experiences, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(11 B), 117-121.
- [3] Badicu, L.V.; Broniecki, U.; Koltunowicz, W.; Körber, S.; Krüger, M.; Voegel, E. Prevention of transformer failure through continuous monitoring. *In Proceedings of the XIXth International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Pilsen, Czech Republic, 23–28 August 2015. Paper Number 274.
- [4] Gockenbach, E.; Borsi, H. Condition monitoring and diagnosis of power transformers. *In Proceedings of the 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 21–24 April 2008; pp. 894–897.
- [5] Mondal, M.; Kumbhar, G.B. Detection, measurement, and classification of partial discharge in a power transformer: Methods, trends, and future research. *IETE Tech. Rev.* 2018, 35, 483–493. *IEEE Guide for Application for Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2012.
- [6] Ranninger, U., Krüger M.. Measurement, localisation, and monitoring of partial discharges on a power transformer. *Transformers Magazine* 8.1 (2021): 106-113.
- [7] Witos F., Gacek Z., Application of the joint electro-acoustic method for partial discharge investigations within a power transformer. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2008, 154, 1951–6401.
- [8] Fuangsoongnern U., Plueksawan W., A measurement technique to identify and locate partial discharge in transformer with AE and HFCT. *Int. J. Eng. Res. Appl.* 2014, 4, 51–58.
- [9] Coenen S., Müller A., Beltle M., Kornhuber S., UHF and acoustic partial discharge localisation in power transformers, *Proceedings of the XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, 22–26 August 2011.
- [10] Markalous S.M., Tenbohlen S., Feser K., Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2008, 15, 1576–1583.
- [11] Kunicki M., Cichoń A., Characterization of surface type partial discharges using electrical, acoustic emission and UHF methods, *Measurement Automation Monitoring*, 2015, 61.
- [12] Sikorski W., Wielewski A., Low-Cost Online Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers, *Sensors*, 2023; 23(7):3405.
- [13] Sikorski W., Development of Acoustic Emission Sensor Optimized for Partial Discharge Monitoring in Power Transformers, *Sensors*, 2019; 19(8):1865.