

Jerzy SKUBIS, Sebastian BORUCKI, Andrzej CICHON
 POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
 INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI, KATEDRA WYSOKICH NAPIĘĆ
 Prószkowska 76, Budynek 2, 45-578 Opole

Ocena stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej

Prof. dr hab. inż. Jerzy SKUBIS

Od 2005 r. Rektor Politechniki Opolskiej, a wcześniej Jej czterokrotnie Prorektor. Autor ponad 150 prac naukowych i około 260 ekspertyz technicznych z zakresu nieniszczących metod detekcji, pomiaru i lokalizacji wylądowań niezupełnych. Wśród tych metod znaczenie szczególne posiada metoda emisji akustycznej oceny wylądowań elektrycznych. Członek Stowarzyszenia Elektryków Polskich oraz Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej.



e-mail: j.skubis@po.opole.pl

Dr inż. Sebastian BORUCKI

Adiunkt Instytutu Elektroenergetyki, Politechniki Opolskiej. Autor blisko 100 publikacji z zakresu wykorzystania nowoczesnych metod pomiarowych w diagnostyce urządzeń elektrycznych i wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Zainteresowania: technika wysokich napięć, diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych przy wykorzystaniu metod nieniszczących (m.in. metody emisji akustycznej, metody wibroakustycznej, pomiarów skorygowanego poziomu ciśnienia akustycznego).



e-mail: s.borucki@po.opole.pl

Streszczenie

Tematyka artykułu dotyczy wykonanych przez pracowników Politechniki Opolskiej badań związanych z detekcją, oceną intensywności i lokalizacją wylądowań niezupełnych metodą emisji akustycznej w trzech transformatorach elektroenergetycznych o mocach 125, 160 i 400 MVA. Rezultatem przeprowadzonych prac było sformułowanie rekomendacji technicznych dotyczących aktualnego stanu technicznego badanych jednostek. Analizę zarejestrowanych impulsów akustycznych przeprowadzono w dziedzinie czasu, częstotliwości i czasowo-częstotliwościowej.

Słowa kluczowe: transformator elektroenergetyczny, metoda emisji akustycznej, wylądowania niezupełne, izolacja papierowo-olejowa, diagnostyka.

Diagnostics of technical condition of power transformers with use of the Acoustic Emission Method

Abstract

An important part of a comprehensive evaluation of the technical condition of power transformers is detection, assessment of the intensity and location of partial discharges (PDs), that may occur in their paper-oil insulation systems. Modern monitoring techniques are increasingly using the acoustic emission (AE) method, which combines the features of the gas chromatography and electricity methods, to evaluate the electrical discharge. The paper presents investigations performed by a team of the Opole University of Technology dealing with the detection, evaluation, intensity and location of PDs by means of the AE method for three transformers of 125, 160 and 400 MVA power. The result of this work was formulation of technical recommendations for the current technical condition of units. The analysis of the recorded pulses EA was conducted in the time, frequency and time-frequency domain. The paper generally characterizes the possibility of the AE method, and the used measuring system (Fig. 1). There are given the technical parameters of the energy object under study (Figs. 2, 7 and 11). The results of detection, assessment of the intensity and location of electrical discharges in transformers diagnosed are shown in Figs. 3, 5, 6, 9, 10, 13, 14 and Tables 1-4.

Keywords: power transformer, acoustic emission method, partial discharges, paper-oil insulation, diagnostic.

Dr inż. Andrzej CICHON

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Pracownik Katedry Wysokich Napięć. Autor blisko 100 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



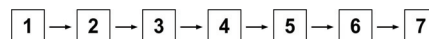
e-mail: a.cichon@po.opole.pl

1. Wstęp

Ważną częścią kompleksowej oceny stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych jest detekcja, ocena intensywności i lokalizacja wylądowań niezupełnych (WZN), które mogą występować w ich papierowo-olejowych układach izolacyjnych. Nowoczesne techniki monitoringu w coraz szerszym zakresie wykorzystują do oceny WZN metodę emisji akustycznej (EA), która w znacznym stopniu łączy w sobie cechy metody chromatografii gazowej oraz metody elektrycznej.

Metoda EA, jako jedna z metod diagnostycznych, stosowana jest w wielu gałęziach przemysłu, m.in. w hutnictwie, przemyśle budowlanym, transporcie, motoryzacji. Wykorzystywana jest głównie do określenia własności wytrzymałościowych materiałów. Szczególnie intensywny rozwój tej metody związany jest z możliwością jej zastosowania do diagnostyki układów izolacyjnych wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych, w szczególności transformatorów dużej mocy [1-4]. Obecnie metoda EA stanowi ważne uzupełnienie stosowanych w diagnostyce układów izolacyjnych metod pomiarowych. Podaje ona informacje o istnieniu, wielkości, a przede wszystkim o miejscu występowania wylądowań elektrycznych. Informacje takie są nieosiągalne innymi metodami. Najważniejszą zaletą tej metody jest możliwość stosowania jej w bardzo trudnych warunkach eksploatacji transformatorów, w których wykonywanie pomiarów WZN innymi sposobami było do tej pory niemożliwe [5-7].

Badania WZN w transformatorach elektroenergetycznych obejmują ich detekcję, a w przypadku stwierdzenia wylądowań – pomiar ich intensywności i lokalizację obszaru występowania. Podczas pomiarów i analizy mierzonych sygnałów akustycznych wykorzystuje się najczęściej układ składający się z elementów przedstawionych w postaci blokowej na rys. 1.



Ys. 1. Schemat układu do detekcji i wizualizacji sygnałów akustycznych od WZN: 1 – transformator, 2 – przetwornik piezoelektryczny, 3 – przedwzmacniacz, 4 – filtr, 5 – wzmacniacz, 6 – analizator EA, 7 – komputer

Fig. 1. Diagram for digital registration of the acoustic signals from partial discharges: 1 – transformer, 2 – transducer, 3 – sub-amplifier, 4 – filter, 5 – amplifier, 6 – emission analyzer, 7 – computer

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i analizy sygnałów EA dotyczących diagnostyki układu izolacyjnego trzech transformatorów elektroenergetycznych dużej mocy. Pierwszym z diagnozowanych obiektów był transformator o mocy 125 MVA, który zainstalowano na stacji wysokiego napięcia 330/110 kV w Kownie na Litwie. Natomiast kolejne dwa urządzenia zbadano podczas realizacji fabrycznych prób odbiorczych w firmach

Verbano Transformatori (transformator 160 MVA) i Tamini Legnano (transformator 400 MVA) we Włoszech.

Głównym celem przeprowadzonych przez autorów prac było określenie aktualnego stanu technicznego izolacji mierzonych transformatorów, a szczególnie stwierdzenie istnienia WNZ w ich wewnętrznym układzie izolacyjnym. Informacje te miały dostarczyć przesłanek do racjonalnego zaplanowania przeglądu transformatorów, a przede wszystkim do uniknięcia w przyszłości ich awarii.

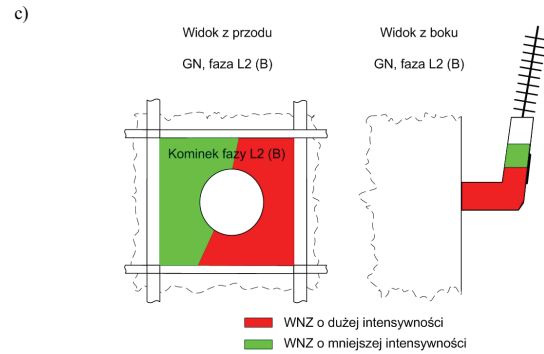
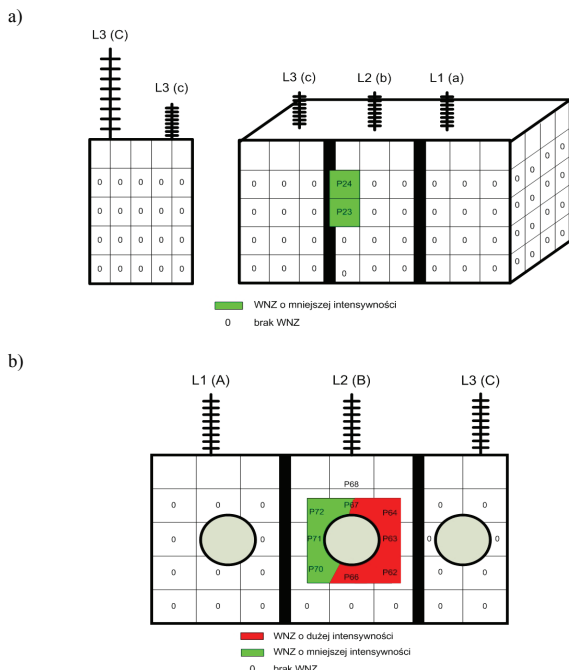
2. Ocena stanu technicznego układu izolacyjnego transformatora typu OBU 125/510

Ekspertyza dotyczyła detekcji, oceny intensywności i lokalizacji WNZ metodą EA w transformatorze o mocy 125 MVA. Diagnozowana jednostka, której widok ogólny przedstawiono na rys. 2, charakteryzowała się następującymi parametrami technicznymi: producent - Pouwels Trafo Belgium, typ - OBU 125/510, moc - 125 MVA, przekładnia - 330/110/10 [kV/kV/kV], rok produkcji - 1998 r.

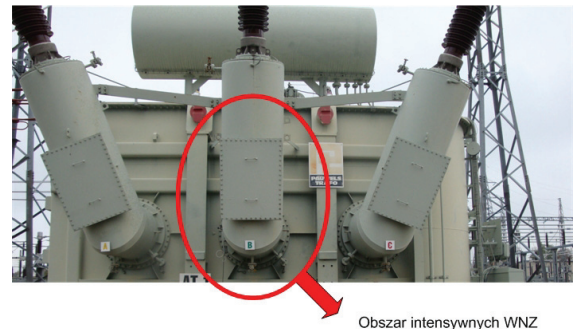


Rys. 2. Widok ogólny transformatora typu OBU 125/510 zainstalowanego na stacji elektroenergetycznej
Fig. 2. Overall view of the OBU 125/510 transformer installed in the power station

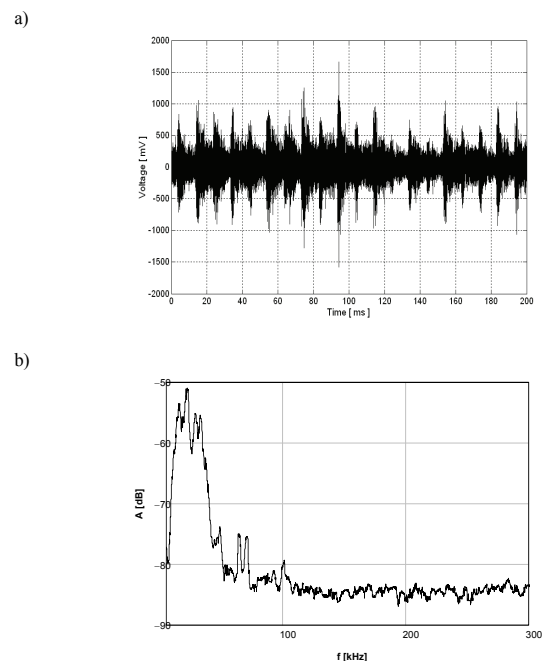
Praca obejmowała detekcję, pomiar intensywności i lokalizację WNZ w transformatorze AT-1 zainstalowanym na stacji Kowno na Litwie. Badania zostały zlecone przez litewską firmę elektroenergetyczną, a ich celem było określenie rodzaju i ewentualnego miejsca występowania wylądowań elektrycznych w izolacji badanego transformatora. Pomiar diagnostyczny zrealizowano w ramach ekspertyzy wykonano w 2009 roku, a uzyskane wyniki obejmujące: detekcję, lokalizację oraz intensywność WNZ przedstawiono na rys. 3-6.



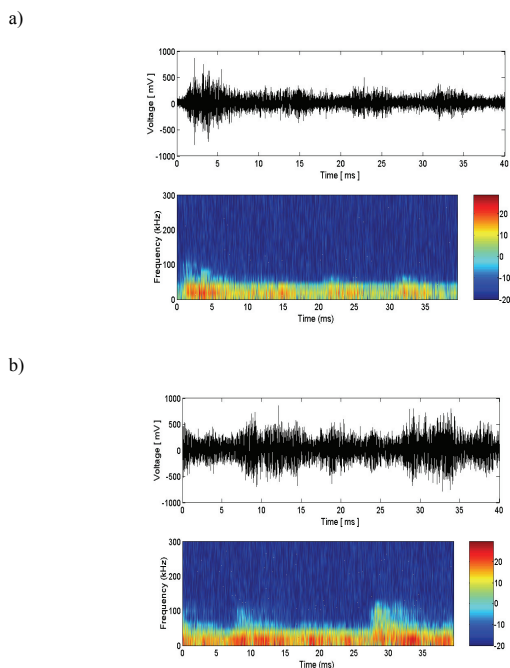
Rys. 3. Widok kadzi badanego transformatora z zaznaczonymi obszarami występowania WNZ: a) ściana boczna od strony fazy L3 (C) i ściana boczna od strony fazy L1 (A) oraz od strony wyprowadzenia dolnego napięcia, b) ściana od strony wyprowadzeń górnego napięcia, c) obszar wyprowadzenia górnego napięcia wokół kominka fazy L2 (B)
Fig. 3. View of the transformer tank under study with areas of PDs appearance: a) side wall from the phase L3 (C), side wall from the phase L1 (A) and the wall from the lower voltage terminal, b) wall from the upper voltage terminal, c) area of the outlet of phase L2 (B) around high-voltage bushing



Rys. 4. Widok ogólny obszaru kadzi transformatora OBU125/510, w którym rejestrowano najwyższe amplitudy i największą intensywność WNZ
Fig. 4. Overall view of the OBU125/510 power transformer tank area in which highest amplitudes and intensity of PDs were registered



Rys. 5. Przebieg czasowy (a) i przebieg widma amplitudowego (b) mierzonych sygnałów akustycznych zarejestrowanych na kominku fazy L2 (B), strony górnego napięcia
Fig. 5. Time course (a) and amplitude spectrum (b) of the acoustics signals registered for phase L2 (B) bushing, from the upper voltage terminal



Rys. 6. Przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widma gęstości mocy sygnałów EA zarejestrowanych na kominku (a) oraz na wlocie rewizyjnym kominka (b) fazy L2 (B), strony górnego napięcia

Fig. 6. Time courses and two-dimensional spectrograms of the power spectral density of the EA signals registered for phase L2 (B) bushing (a) and the access opening of phase L2 (B) bushing of the upper voltage terminal

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz zgromadzonej dokumentacji historycznej pracy badanego transformatora wyprowadzono konkluzje diagnostyczne i rekomendacje techniczne przedstawione poniżej:

- w wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono występowanie wewnętrznych WNZ. Wyładowania elektryczne występują od strony górnego napięcia, w kominku izolatora górnego napięcia fazy L2 (B) i w jego okolicach. Obszar występowania stwierdzonych WNZ, w zależności od ich intensywności, zaznaczono kolorem zielonym i czerwonym na rys. 3. Bardzo słabe sygnały akustyczne od wyładowań występujących w tym źródle są także zauważalne z drugiej strony kadzi – rys. 3a,
- na rys. 3c i na zdjęciu (rys. 4) przedstawiono powierzchnię kadzi, na której sygnały od wewnętrznych wyładowań elektrycznych mają najwyższą intensywność. Analiza widmowa zarejestrowanych sygnałów wskazuje (rys. 5b), że stwierdzone wyładowania występują najprawdopodobniej w oleju. Prawdopodobnym miejscem występowania tych wyładowań jest: wyprowadzenie fazy L2 (B) z uzwojeń w kominku strony górnego napięcia, olejowa część przepustu fazy L2 (B) lub połączenie wyprowadzenia fazy L2 (B) z uzwojeniami,
- dla technicznego zweryfikowania przedstawianych w niniejszej ekspertyzie rezultatów detekcji, pomiarów i lokalizacji WNZ w badanym transformatorze, zalecono wykonanie przeglądu kominka fazy L2 (B) strony górnego napięcia. Szczególnemu sprawdzeniu powinny podlegać olejowe części tego przepustu, układ izolacyjny wyprowadzenia napięcia, i połączenia styków w tym kominku oraz w jego okolicach.

3. Pomiary WNZ metodą EA w transformatorze typu ATOE TIPO A324

W ramach umowy wdrożeniowej wykonano prace obejmujące detekcję i lokalizację WNZ w autotransformatorze typu ATOE TIPO A324, znajdującym się na stacji prób w firmie Verano Trasformatori Novara, Włochy. Badana jednostka, której widok ogólny przedstawiono na rys. 7 posiadała następujące parametry techniczne: producent - Verano Trasformatori, typ - ATOE

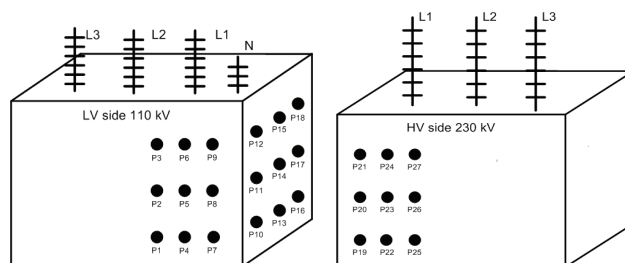
TIPO A324, moc - 160 MVA, przekładnia - 230/135 [kV/kV], rok produkcji - 2010 r.



Rys. 7. Widok ogólny transformatora typu ATOE A324 zainstalowanego na stacji prób

Fig. 7. Overall view of the ATOE A324 power transformer installed in the test station

Pomiary sygnałów EA generowanej przez występujące w papierowo-olejowym układzie izolacyjnym badanego transformatora WNZ wykonano w trakcie długotrwałej próby napięciem przemiennym, indukowanym ACLD (*ang. Long-duration induced AC voltage*). Podczas realizacji procedury pomiarowej, określonej przez normę [8], rejestrację impulsów akustycznych przeprowadzono w 27 punktach pomiarowych. Ze względu na podejrzenie występowania wyładowań elektrycznych w izolacji cewki fazy L1, punkty pomiarowe na kadzi transformatora rozmieszczono wyłącznie wokół uzwojenia tej fazy (rys. 8). Pomiary wykonywano w sposób on-line przez cały czas próby, tj. ok. 80 minut. Przykładowe wyniki przeprowadzonych analiz w dziedzinie czasu, częstotliwości i czasowo-częstotliwościowej zmierzonych sygnałów akustycznych przedstawiono w tabelach 1 i 2 oraz na rys. 9 i 10.



Rys. 8. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na kadzi transformatora typu ATOE TIPO A324

Fig. 8. Distribution of measurement points of the transformer tank, type ATOE TIPO A324

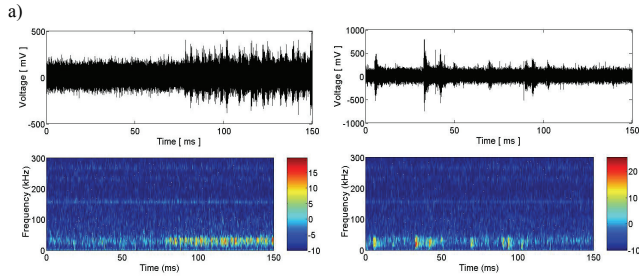
Wyniki detekcji wyładowań elektrycznych w transformatorze typu ATOE TIPO A324, podczas realizacji próby napięciowej określonej przez normę [8], przedstawiono w tablicach 1 i 2 oraz na rys. 9 i 10.

Tab. 1. Obszary występowania sygnałów EA od wewnętrznych WNZ na kadzi transformatora na początku próby

Tab. 1. Occurrence areas of the AE signals from inner PDs on the transformer tank at the test start

L2-L1 (110 kV)	L1 - N (110kV)	N (110kV)	Boczna ścianka transformatora						(N) - L1 (220 kV)	L1 (220 kV)	L1-L2 (220 kV)						
P3	NO PD'S	P6	NO PD'S	P9	NO PD'S	P12	NO PD'S	P15	NO PD'S	P18	NO PD'S	P21	NO PD'S	P24	NO PD'S	P27	NO PD'S
P2	NO PD'S	P5	NO PD'S	P8	NO PD'S	P11	NO PD'S	P14	NO PD'S	P17	NO PD'S	P20	NO PD'S	P23	NO PD'S	P26	NO PD'S
P1	NO PD'S	P4	NO PD'S	P7	NO PD'S	P10	NO PD'S	P13	NO PD'S	P16	NO PD'S	P19	NO PD'S	P22	NO PD'S	P25	NO PD'S

Na rys. 9 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanej na początku prób napięciowych transformatora, przy napięciu indukowanym fazy L1 (oznaczenie punktów pomiarowych zgodnie z rys. 8). Szczegółowe wyniki pomiarów dla wszystkich 27 punktów pomiarowych przedstawiono w raporcie [9].



Rys. 9. Przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widma gęstości mocy sygnałów EA zarejestrowane na początku próby: a) punkt nr 16, b) punkt nr 19

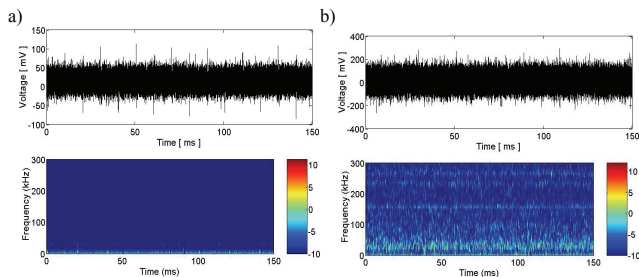
Fig. 9. Time courses and two-dimensional spectrograms of the power spectral density of the EA signals registered at the test start at the measurements point: a) number 16, b) number 19

Tab. 2. Obszary występowania sygnałów EA od wewnętrznych WNZ na kadzi transformatora pod koniec próby

Tab. 2. Occurrence areas of the AE signals from inner PDs on the transformer tank at the test end

L2-L1 (110 kV)		L1-N (110kV)		N (110kV)		Boczna ścianka transformatora						(N) - L1 (220 kV)		L1 (220 kV)		L1-L2 (220 kV)	
P3	NO PD'S	P6	NO PD'S	P9	NO PD'S	P12	NO PD'S	P15	NO PD'S	P18	NO PD'S	P21	NO PD'S	P24	NO PD'S	P27	NO PD'S
P2	NO PD'S	P5	NO PD'S	P8	NO PD'S	P11	NO PD'S	P14	NO PD'S	P17	NO PD'S	P20	NO PD'S	P23	NO PD'S	P26	NO PD'S
P1	NO PD'S	P4	NO PD'S	P7	NO PD'S	P10	NO PD'S	P13	NO PD'S	P16	NO PD'S	P19	NO PD'S	P22	NO PD'S	P25	NO PD'S

Na rys. 10 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanej pod koniec prób napięciowych transformatora, przy napięciu indukowanym fazy L1 (oznaczenie punktów pomiarowych zgodnie z rys. 8). Szczegółowe wyniki pomiarów przedstawiono w raporcie [9].



Rys. 10. Przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widma gęstości mocy sygnałów EA zarejestrowane pod koniec próby, w punktach pomiarowych: a) numer 16, b) numer 19

Fig. 10. Time courses and two-dimensional spectrograms of the power spectral density of the EA signals registered at the test end, in the measurements point: a) number 16, b) number 19

Na podstawie przeprowadzonych badań przedstawiono następujące wnioski diagnostyczne i rekomendacje techniczne:

- ze względu na wykrycie WNZ metodą elektryczną w fazie L1, badania akustyczne obejmowały jedynie obszar uzwojeń tej fazy. Rejestrację sygnałów EA przeprowadzono w 27 punktach pomiarowych, których szczegółowe rozmieszczenie zilustrowano na rys. 8,
- w początkowym etapie próby, przy napięciu zasilania $1.5 U_m/\sqrt{3}$, stwierdzono występowanie wewnętrznych WNZ w dolnej części kadzi transformatora w obszarze obejmującym punkty P16 i P19 (tabela 1, rys. 9),
- pod koniec próby, przy napięciu indukowanym $1.5 U_m/\sqrt{3}$, zaobserwowano zanik występujących wcześniej wyładowań, a rejestrowane sygnały EA w punktach P16 i P19 miały charakter szumu magnetostrykcyjnego (tabela 2, rys. 10),
- ze względu na zanik WNZ pod koniec próby napięciem indukowanym, ogólny wynik badania można uznać za pozytywny,

- w związku z obecnością WNZ w pierwszym etapie próby zalecono wykonanie pomiarów kontrolnych transformatora typu ATOE TIPO A324, obejmujących analizę chromatograficzną DGA po 6 miesiącach jego eksploatacji, natomiast detekcję i ewentualną lokalizację WNZ metodą EA, po 1 roku.

4. Diagnostyka izolacji papierowo-olejowej transformatora typu ATOE 400-400A/230T

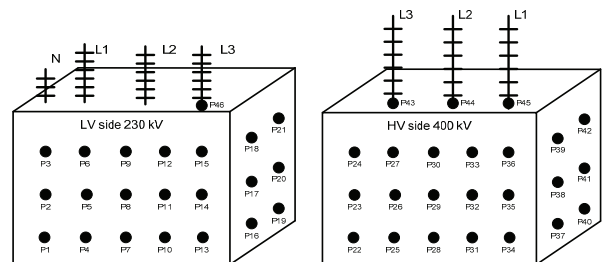
Praca obejmowała detekcję i lokalizację WNZ w autotransformatorze typu ATOE 400-400A/230T znajdującym się na stacji prób w firmie Tamini Legnano, Włochy. Rejestrację i analizę sygnałów EA generowanych w transformatorze zasilanym napięciem znamionowym przeprowadzono w 46 punktach pomiarowych. Dodatkowo wykonano ocenę sygnałów akustycznych generowanych podczas próby napięciem indukowanym dla fazy L3. Diagnozowany transformator, którego widok ogólny na stanowisku stacji prób przedstawiono na rys. 11 charakteryzował się następującymi parametrami technicznymi: producent - Tamini, typ - ATOE 400-400A/230T, moc - 400 MVA, przekładnia - 400/230 [kV/kV], rok produkcji - 2010r.



Rys. 11. Widok ogólny transformatora typu ATOE 400A/230T zainstalowanego na stacji prób

Fig. 11. Overall view of the power transformer type ATOE 400A/230T installed in the test station

Na rys. 12 schematycznie przedstawiono rozmieszczenie punktów pomiarowych na kadzi diagnozowanego transformatora.



Rys. 12. Schematyczne rozmieszczenie punktów pomiarowych na kadzi badanego transformatora

Fig. 12. Distribution of measurement points of the transformer tank under study

Przykładowe wyniki detekcji WNZ w badanym transformatorze przedstawiono w tablicach 3 i 4.

Tab. 3. Obszary występowania sygnałów EA od wewnętrznych WNZ na kadzi transformatora ATOE 400A/230T od strony wyprowadzenia dolnego napięcia

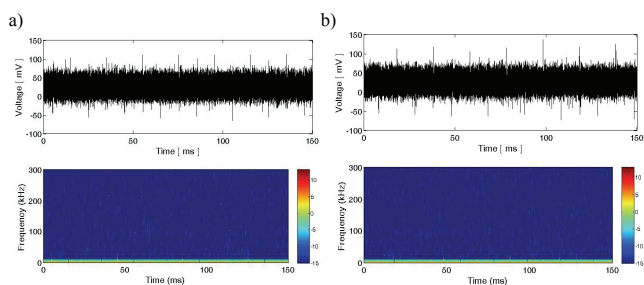
Tab. 3. Occurrence areas of the AE signals from inner PDs on the ATOE 400A/230T transformer tank from the side of the lower voltage terminal

L1	L1 - L2	L2	L2 - L3	L3	Boczna ścianka tr.								
P3	NO PD'S	P6	NO PD'S	P9	NO PD'S	P12	NO PD'S	P15	NO PD'S	P18	NO PD'S	P21	NO PD'S
P2	NO PD'S	P5	NO PD'S	P8	NO PD'S	P11	NO PD'S	P14	NO PD'S	P17	NO PD'S	P20	NO PD'S
P1	NO PD'S	P4	NO PD'S	P7	NO PD'S	P10	NO PD'S	P13	NO PD'S	P16	NO PD'S	P19	NO PD'S

Tab. 4. Obszary występowania sygnałów EA od WNZ na kadzi transformatora ATOE 400A/230T od strony wyprowadzenia górnego napięcia
Occurrence areas of the AE signals from inner PDs at the ATOE 400A/230T transformer tank from the side of the upper voltage terminal

L3		L3 – L2		L2		L2 – L1		L1		Boczna ścianka tr.	
P24	NO PD'S	P27	NO PD'S	P30	NO PD'S	P33	NO PD'S	P36	NO PD'S	P39	NO PD'S
P23	NO PD'S	P26	NO PD'S	P29	NO PD'S	P32	NO PD'S	P35	NO PD'S	P38	NO PD'S
P22	NO PD'S	P25	NO PD'S	P28	NO PD'S	P31	NO PD'S	P34	NO PD'S	P37	NO PD'S
										P42	NO PD'S
										P41	NO PD'S
										P40	NO PD'S

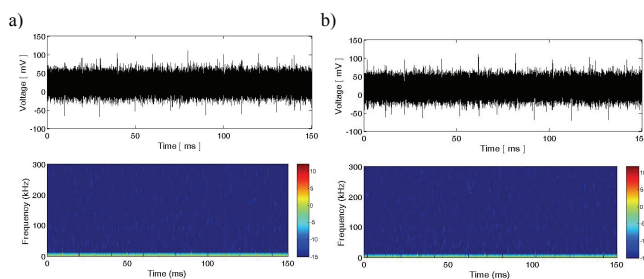
Na rys. 13 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanej podczas pracy jałowej badanego transformatora, przy trójfazowym zasilaniu i znamionowym napięciu (oznaczenie punktów pomiarowych zgodnie z rys. 12). Szczegółowe wyniki pomiarów dla wszystkich 46 punktów pomiarowych przedstawiono w raporcie [10].



Rys. 13. Przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widma gęstości mocy sygnałów EA zarejestrowanych przy próbie napięciem znamionowym w punktach pomiarowych: a) numer 8, b) numer 20

Fig. 13. Time runs and a two-dimensional spectrograms of the power spectral density of the EA signals registered during the rated voltage probe in the measurements point: a) number 8, b) number 20

Na rys. 14 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widmowej gęstości mocy sygnałów EA generowanej podczas prób odbiorczych transformatora, przy napięciu indukowanym (oznaczenie punktów pomiarowych zgodnie z rys. 12). Szczegółowe wyniki pomiarów przedstawiono w raporcie [10].



Rys. 14. Przebiegi czasowe i dwuwymiarowe spektrogramy widma gęstości mocy sygnałów EA zarejestrowanych przy próbie napięciem indukowanym w punktach pomiarowych: a) numer 15, b) numer 26

Fig. 14. Time courses and two-dimensional spectrograms of the power spectral density of the EA signals registered during the induced voltage probe in the measurements point: a) number 15, b) number 26

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i stosowanych analiz wysunięto konkluzje diagnostyczne i zalecenia techniczne:

- przy zasilaniu transformatora napięciem znamionowym U_N (230 / 400 kV) w zadnym z 46 punktów pomiarowych, zarówno od strony górnego jak i dolnego napięcia, a także na bocznych ściankach kadzi nie stwierdzono występowania wewnętrznych WNZ. Dotyczy to także kominków, w których są zamontowane przepusty transformatorowe (tablice 3-4 i rys. 13),
- po przeanalizowaniu rozkładów akustycznej aktywności wszystkich obszarów badanego transformatora, do dodatkowych pomiarów, przeprowadzonych przy próbie transformatora napięciem indukowanym, wytypowano 18 punktów pomiaro-

wych. Wytypowane obszary koncentrowały się wokół fazy L3. Podczas wykonywania tej próby także nie stwierdzono występowania WNZ (rys. 14),

- uzyskane wyniki wykazały, że w mierzonym transformatorze nie stwierdzono występowania WNZ w jego wewnętrznym układzie izolacyjnym,
- zalecono wykonanie pomiarów kontrolnych obejmujących detekcję i ewentualną lokalizację WNZ metodą EA tego transformatora (typ ATOE 400-400A/230T) po 1 roku jego eksploatacji.

5. Wnioski

Metoda EA stanowi aktualnie ważne uzupełnienie metod stosowanych w diagnostyce układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych. Podaje informacje nieosiągalne innymi metodami o istnieniu, wielkości i miejscu występowania WNZ. Umożliwia także rozstrzygnięcie bezpośrednio przy diagnozowanym transformatorze, czy przyczyną degradacji izolacji papierowo-olejowej są wewnętrzne wyładowania elektryczne lub inne zjawiska.

W przedstawionym artykule zaprezentowano trzy przykłady skutecznej diagnostyki transformatorów elektroenergetycznych dużej mocy, pod kątem występowania w ich układach izolacyjnych wewnętrznych WNZ. Przeprowadzone w warunkach normalnej eksploatacji (transformator OBU125/510) oraz na stacjach prób (transformatory ATOE TIPO A324 i ATOE 400-400A/230T) badania z wykorzystaniem metody EA pozwoliły na detekcję i lokalizację obszarów, w których występowały WNZ. Dodatkowo, kompleksowa analiza sygnałów EA w dziedzinie czasowej, częstotliwościowej oraz czasowo-częstotliwościowej pozwoliła na precyzyjnie określenie intensywności mierzonych WNZ oraz ocenę ich struktury częstotliwościowej.

Przedstawione w artykule wyniki przeprowadzonych przez zespół pracowników Instytutu Elektroenergetyki prac, stanowią przykład kolejnych wdrożeń w energetyce polskiej i zakładach elektroenergetycznych innych krajów Unii Europejskiej opracowanej na WEAiI Politechniki Opolskiej technologii diagnostycznej, polegającej na pomiarach EA, generowanej przez WNZ.

6. Literatura

- [1] Emisja akustyczna: źródła, metody, zastosowania, pod red. I. Maleckiego i J. Ranachowskiego, PAN, Warszawa, 1994.
- [2] Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, IPPT - PAN, Warszawa 1994.
- [3] Skubis J., Cichoń A., Borucki S.: Ocena wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej jako komponent systemu monitorującego stan izolacji transformatorów, Energetyka nr 6 (660), str. 346-349, 2009.
- [4] Skubis J., Cichoń A., Borucki S.: Praktyczny przykład skutecznej detekcji i lokalizacji wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej w transformatorze elektroenergetycznym, PAK vol. 55, nr 1, str. 30-33, 2009.
- [5] Gockenbach E., Feser K.: Sensitive online PD-measurements of onsite oil/paper-insulated devices by means of optimized acoustic emission techniques (AET), IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 158 – 162, 2005.
- [6] Boczar T.: Obiektywizacja wyników akustycznej metody oceny wyładowań niepełnych przy zastosowaniu do opisu sygnałów analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania, Of. Wyd. PO, z. 149, 2003.
- [7] Praca zbiorowa pod red. J. Subocza: Transformatory w eksploatacji, wyd. 2, Energo-Complex, Piekary Śląskie, 2007.
- [8] Norma IEC 60076-3:2002, Transformatory, Część 3: Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępy izolacyjne w powietrzu, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2002.
- [9] Skubis J., Borucki S., Cichoń A.: Pomiary i ocena wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej w autotransformatorze typu ATOE TIPO A324. Raport z badań, nr 2/W/DNiTT/2010, Pol. Op., 2010.
- [10] Skubis J., Borucki S., Cichoń A.: Pomiary i ocena wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej w autotransformatorze typu ATOE 400-400A/230T. Raport z badań, nr 1/W/DNiTT/2010, Pol. Op., 2010.