

Jerzy SKUBIS, Andrzej CICHON, Sebastian BORUCKI

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

Praktyczny przykład skutecznej detekcji i lokalizacji wylądowań niezupełnych metodą emisji akustycznej w transformatorze elektroenergetycznym

Prof. dr hab. inż. Jerzy SKUBIS

Wieloletni Prorektor, a obecnie Rektor Politechniki Opolskiej. Autor ponad 140 prac naukowych i około 250 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. Andrzej CICHON

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Pracownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 50 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



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

Dr inż. Sebastian BORUCKI

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Pracownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 50 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



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

Streszczenie

W artykule przedstawiono przykład diagnostyki transformatora elektroenergetycznego pod kątem oceny stanu technicznego papierowo - olejowego układu izolacyjnego zagrożonego występowaniem wylądowań niezupełnych (WZN). Badania przeprowadzono podczas normalnej pracy jednostki transformatorowej, rejestrując w 36 punktach na powierzchni kadzi sygnały emisji akustycznej (EA) pochodzącej od zjawisk fizycznych występujących wewnątrz transformatora. Zarejestrowane sygnały poddano analizie w dziedzinie czasowej, częstotliwościowej i czasowo - częstotliwościowej. Wynikiem badań była detekcja i lokalizacja miejsca występowania wylądowań elektrycznych oraz wskazanie prawdopodobnej przyczyny i miejsca ich powstawania.

Słowa kluczowe: wylądowania niezupełne, metoda emisji akustycznej, diagnostyka, transformator elektroenergetyczny.

Practical example of effective detection and location of partial discharges by the acoustic emission method in an electric power transformer

Abstract

Three measurement methods: gas chromatography method (DGA), electrical method and AE method are used in the assessment of the technical condition of paper-oil insulation of high-power transformers exposed to the occurrence of partial discharges (PDs). The acoustic method of PD detection is used as a supplementary one to the two others, mainly the gas chromatography method which does not make it possible to locate the place of the insulation system defect appearance. The basic advantage of the AE method, compared with the electrical one, is the possibility of its application during regular operation of power appliances [2, 3]. The paper presents the measurement results of the AE signals accompanying regular operation of a power transformer of 270 MVA. In order to assess the intensity of the AE signals measured on the object under study, coming from physical phenomena taking place inside a tub, three analyses were performed: in the time, frequency and time-frequency domains. Registration of the AE signals, the distributions of which is shown in Fig. 2, was carried out at 36 measurement points. An exemplary waveform of the AE

signals registered is shown in Fig. 3, while the results of the analysis in the time domain are listed in Tables 1 and 2. In order to assess the waveforms registered more accurately, the analysis in the frequency domain was carried out and amplitude spectra were determined, an example of which is presented in Fig. 4. The time-frequency analysis was performed by using a short-time Fourier transform (STFT) determining two-dimensional spectrograms of the power density spectrum (Fig. 5). The assessment of the technical condition of the transformer under study made it possible to detect and locate areas in which PDs occurred. Damage of magnetic screens is a probable cause of their occurrence.

Keywords: partial discharges, acoustic emission method, diagnostics, power transformer.

1. Wprowadzenie

Wprowadzenie w Polsce wolnego rynku energii elektrycznej spowodowało powstanie konkurujących między sobą przedsiębiorstw wytwórczych i dystrybucyjnych. Wraz z uwolnieniem cen energii elektrycznej zwiększyły się wymagania dotyczące jakości dostarczanej energii, jak również niezawodności jej dostaw. Zwiększenie niezawodności systemu elektroenergetycznego wiąże się m.in. z wiarygodnej precyzyjnej diagnostyki urządzeń elektroenergetycznych, w szczególności transformatorów mocy, które stanowią jeden z najbardziej newralgicznych punktów systemu elektroenergetycznego [1].

Nowoczesne podejście do diagnostyki transformatorów elektroenergetycznych oparte jest na analizie wyników pomiarowych uzyskiwanych wieloma metodami badawczymi. W ocenie stanu technicznego izolacji papierowo - olejowej, zagrożonej występowaniem wylądowań niezupełnych (WZN), stosuje się głównie trzy metody pomiarowe: metodę chromatografii gazowej (DGA), metodę elektryczną i metodę EA. Akustyczna metoda detekcji i oceny intensywności WZN w transformatorach mocy jest stosowana jako uzupełnienie dwóch pierwszych metod, głównie metody chromatografii gazowej, która nie umożliwia lokalizacji miejsca występowania defektu układu izolacyjnego. Podstawową zaletą metody EA, w porównaniu do metody elektrycznej, jest możliwość jej stosowania w bardzo trudnych warunkach eksploatacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, podczas ich normalnej pracy [2]. Zakres stosowania metody EA może w pewnych warunkach zostać również ograniczony, m.in. poprzez wysoki poziom zakłóceń akustycznych lub elektromagnetycznych oraz złożoną geometrię układów chłodzenia transformatorów, uniemożliwiającą mocowanie do ich powierzchni przetworników pomiarowych [3].

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów sygnałów EA towarzyszących normalnej eksploatacji transformatora elektroenergetycznego o mocy 270 MVA i napięciu górnym 110 kV. W celu poprawnej oceny intensywności zmierzonych na badanym transformatorze sygnałów EA, pochodzących od występujących we-

wewnątrz kadzi zjawisk fizycznych, wykonano trzy rodzaje analiz: w dziedzinie czasu, częstotliwości oraz czasowo – częstotliwościowej. Uzyskane wyniki przedstawiono i zinterpretowano w kolejnych punktach niniejszego artykułu.

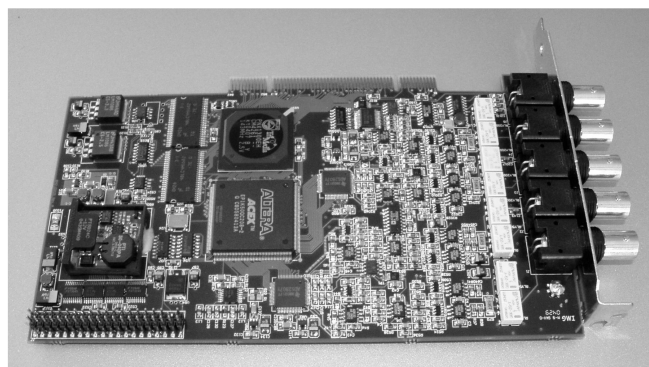
2. Charakterystyka układu pomiarowego

Sygnaly EA generowanej wewnątrz kadzi rejestrowano przetwornikiem stykowym WD AH17 firmy Physical Acoustics Corporation (PAC) umieszczonym na zewnętrznej ścianie kadzi. Wykorzystany przetwornik charakteryzuje się wysoką czułością: ($55 \text{ dB} \pm 1,5 \text{ dB}$ w odniesieniu do V/ms^{-1}) oraz szerokim pasmem przenoszenia: od 100 kHz do 1 MHz w zakresie $\pm 10 \text{ dB}$, przy czym całkowite jego pasmo częstotliwościowe mieści się w przedziale $(0 \div 1) \text{ MHz}$. Przetwornik poprzez przedwzmacniacz, podłączono do układu wzmacniającego i filtrującego. Zastosowano filtr pasmowo – przepustowy o częstotliwościach odcięcia 10 i 700 kHz . Sygnał pomiarowy wzmacniano o 43 dB . Przebiegi czasowe sygnałów EA generowanej przez WNZ rejestrowano za pomocą karty pomiarowej firmy Acquitek CH 3160. Maksymalna częstotliwość próbkowania karty wynosi 40 MHz , przy rozdzielczości 12 bitów. Podczas wykonywania pomiarów zastosowano częstotliwość próbkowania $2,56 \text{ MHz}$. Rejestrowano sygnały akustyczne występujące w pełnym okresie napięcia zasilającego. Ogólny widok przetwornika piezoelektrycznego wraz z przedwzmacniaczem, układem wzmacniająco – filtrującym oraz kartą pomiarową przedstawiono na rys. 1.

a)



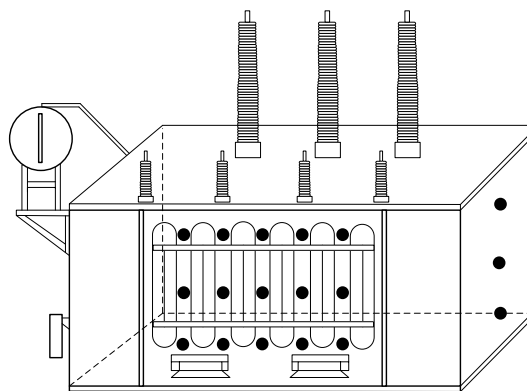
b)



Rys. 1. Widok układu pomiarowego: a) przetwornik piezoelektryczny, przedwzmacniacz i układ wzmacniająco – filtrujący, b) karta pomiarowa
Fig. 1. View of the measuring set-up: a) piezoelectric transducer, sub-amplifier and amplifying – filtering system, b) measuring card

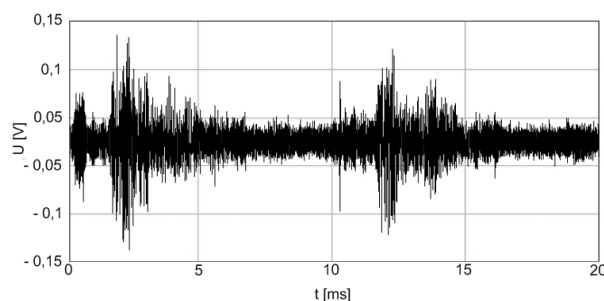
3. Analiza wyników pomiarowych

Rejestrację sygnałów EA występujących w badanym transformatorze wykonano w 36 punktach, symetrycznie rozmieszczonych wokół całej powierzchni kadzi. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na diagnozowanym transformatorze przedstawiono poglądowo na rys. 2 (strona dolnego napięcia).



Rys. 2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w badanym transformatorze
Fig. 2. Distribution of measurement points in the transformer under study

Rysunek 3 przedstawia przykładowy przebieg zarejestrowanych sygnałów EA w badanym transformatorze dużej mocy.



Rys. 3. Przykładowy przebieg czasowy zarejestrowanych sygnałów EA generowanej przez WNZ w badanym transformatorze

Fig. 3. Exemplary waveform of the registered AE signals generated by PDs in the transformer under study

Zarejestrowane sygnały EA poddano analizie czasowej, polegającej na wyznaczeniu maksymalnych wartości amplitud dla każdego punktu pomiarowego [8]. Wyniki analizy czasowej przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Tab. 1. Wyniki analizy czasowej sygnałów EA od WNZ, zarejestrowanych na kadzi transformatora od strony wyprowadzenia górnego napięcia

Tab. 1. Results of the time analysis of the AE signals from PDs registered on the transformer tub from the side of the upper voltage terminal

| Oznaczenie fazy | Amplitudy sygnałów EA od mierzonych WNZ [mV] | | | | | |
|-----------------|--|---------|----|---------|-----|-----------------------|
| | L1 | L1 – L2 | L2 | L2 – L3 | L3 | Boczna ścianka trans. |
| Góra kadzi | 90 | 60 | 0 | 80 | 160 | 110 |
| Środek kadzi | 50 | 0 | 0 | 0 | 70 | 40 |
| Dół kadzi | 0 | 40 | 0 | 0 | 0 | 60 |

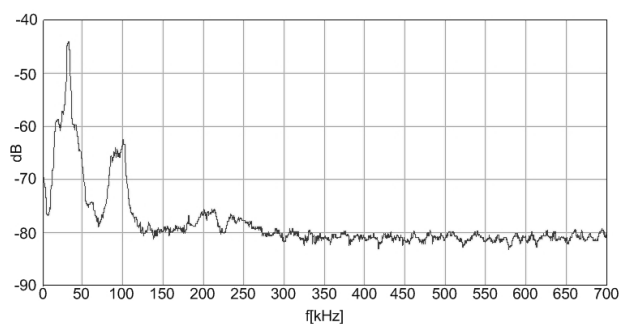
Tab. 2. Wyniki analizy czasowej sygnałów EA od WNZ, zarejestrowanych na kadzi transformatora od strony wyprowadzenia dolnego napięcia

Tab. 2. Results of the time analysis of the AE signals from PDs registered on the transformer tub from the side of the lower voltage terminal

| Oznaczenie fazy | Amplitudy sygnałów EA od mierzonych WNZ [mV] | | | | | |
|-----------------|--|---------|----|---------|----|-----------------------|
| | L3 | L3 – L2 | L2 | L2 – L1 | L1 | Boczna ścianka trans. |
| Góra kadzi | 100 | 40 | 0 | 50 | 60 | 100 |
| Środek kadzi | 30 | 0 | 0 | 0 | 50 | 40 |
| Dół kadzi | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Na podstawie wyników uzyskanych z analizy sygnałów EA w dziedzinie czasu można stwierdzić, że w mierzonym transformatorze występowały wewnętrzne WNZ. Miejsca w których zaobserwowano obecność wyładowań zlokalizowane są w okolicach fazy L1 oraz L3, zarówno po stronie dolnego jak i górnego napięcia. Zarejestrowane sygnały EA charakteryzują się stosunkowo wysoką amplitudą (do 160 mV), co wskazuje, że prawdopodobnie mają one charakter iskrowy i mogą powodować przyspieszone starzenie oleju i papieru izolacyjnego.

W celu dokładniejszej oceny zarejestrowanych sygnałów EA wykonano analizę w dziedzinie częstotliwości wyznaczając widma amplitudowe. Dane zarejestrowane za pomocą karty pomiarowej wprowadzono do algorytmów obliczeniowych zaimplementowanych w pakiecie oprogramowania Mathcad 14. Za pomocą autorskich procedur obliczeniowych wyznaczono widma amplitudowe, których przykładowy przebieg przedstawiono na rys. 4.

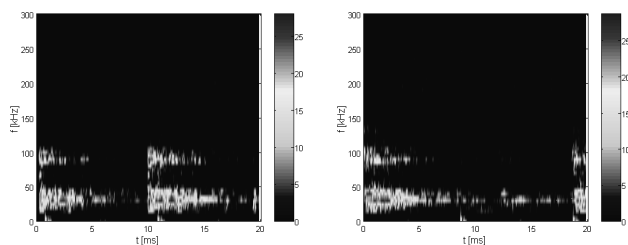


Rys. 4. Przykładowy przebieg widma amplitudowego zarejestrowanych sygnałów EA generowanych przez WNZ w badanym transformatorze elektroenergetycznym

Fig. 4. Exemplary amplitude spectrum of the registered AE signals generated by PDs in the transformer under study

W widmie amplitudowym zarejestrowanych sygnałów EA generowanej przez WNZ można zaobserwować składowe częstotliwościowe z przedziału (10 – 125) kHz. Widmo to cechuje się dwoma charakterystycznymi obszarami dominujących częstotliwości: pierwszy – (10 – 60) kHz, drugi – (75 – 125) kHz. Wyznaczone pasmo częstotliwości jest charakterystyczne dla występowania WNZ i wskazuje na iskrowy charakter tego zjawiska.

Analizę czasowo – częstotliwościową sygnałów EA generowanych przez WNZ wykonano przy zastosowaniu krótkoczasowej transformaty Fouriera (STFT). Procedury numeryczne umożliwiające wyznaczenie spektrogramów widmowej gęstości mocy wykonano w programie Matlab. W obliczeniach zastosowano okno czasowe Hamminga, powszechnie stosowane do przetwarzania sygnałów szybkochylnych [4, 5, 6]. Do prezentacji widma gęstości mocy w przestrzeni czas – częstotliwość wyznaczono dwuwymiarowe spektrogramy z zastosowaniem progowej funkcji odcinającej składowe o mniejszych wartościach amplitudy. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe spektrogramy zarejestrowanych sygnałów EA od WNZ.



Rys. 5. Przykładowe spektrogramy widma gęstości mocy zarejestrowanych sygnałów EA generowanej przez WNZ

Fig. 5. Exemplary spectrograms of the power density spectrum of the registered AE signals generated by PDs

Spektrogramy widma gęstości mocy przedstawiają dwa obrazy czasowo – częstotliwościowe charakteryzujące się pasmem częstotliwości (10 – 125) kHz. Struktury czasowo – częstotliwościowe odpowiadające sygnałom EA generowanej przez WNZ charakteryzują się dużą intensywnością i generowane są zarówno przy dodatnim, jak również przy ujemnym okresie napięcia zasilania.

4. Miejsce i przyczyna występowania wyładowań niezupełnych

Wykonane badania diagnostyczne stanu technicznego układu izolacyjnego badanego transformatora wykazały obecność wewnętrznych wyładowań niezupełnych. Uzyskane przez autorów publikacji wyniki pomiarów wyładowań elektrycznych z wykorzystaniem metody EA zastały potwierdzone wynikami badań uzyskanymi z metody chromatografii gazowej. Analiza DGA wykazała dużą koncentrację palnych składników rozpuszczonych w oleju gazów, a w szczególności wodoru i acetyleny. Taki skład gazów jest charakterystyczny dla wyładowań iskrowych. Zaobserwowano również znaczny przyrost gazów w porównaniu do wyników badań wykonanych w poprzednich latach. Podwyższone tempo narastania koncentracji wodoru i acetyleny może świadczyć o rozwoju wewnętrznego uszkodzenia transformatora.

Lokalizacja obszaru występowania WNZ w transformatorze przeprowadzona metodą największej głośności wskazała dwa rozległe obszary. Analiza dokumentacji dotyczącej pracy i zabiegów remontowych przeprowadzonych w badanej jednostce wykluczyła możliwość występowania WNZ na olejowych częściach przepustów lub ich połączeniach, zarówno od strony górnego, jak i dolnego napięcia. Prawdopodobną przyczyną występowania WNZ są uszkodzenia ekranów magnetycznych. Uszkodzenia te prawdopodobnie są związane z lokalnymi pęknięciami elementów mocujących ekran do kadzi lub wadliwymi połączeniami poszczególnych elementów. Na rys. 6 przedstawiono widok fragmentu ekranu magnetycznego stosowanego w tego typu transformatorach elektroenergetycznych.



Rys. 6. Widok konstrukcji ekranu magnetycznego [7]

Fig. 6. View of the magnetic screen construction [7]

5. Podsumowanie

Metoda EA stanowi ważne uzupełnienie metod stosowanych w diagnostyce transformatorów. Podaje informacje nieosiągalne innymi metodami o istnieniu, wielkości i miejscu występowania WNZ. Umożliwia rozstrzygnięcie bezpośrednio przy transformatorze, czy przyczyną degradacji izolacji są wyładowania lub inne zjawisko [3, 8].

W przedstawionym artykule zaprezentowano przykład diagnostyki transformatora opartej na wieloparametrycznej ocenie stanu jego izolacji pod kątem występowania WNZ. Badania przeprowadzone metodą akustyczną pozwoliły na detekcję i lokalizację obszarów, w których występowały WNZ. Kompleksowa analiza

sygnałów EA w dziedzinie czasowej, częstotliwościowej oraz czasowo – częstotliwościowej pozwoliła na precyzyjne określenie intensywności WNZ oraz ich struktury częstotliwościowej. Korelacja uzyskanych wyników z rezultatami analizy chromatografii gazowej oraz historią badań, remontów i przeglądów transformatora umożliwiła określenie prawdopodobnej przyczyny uszkodzenia transformatora.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę jako projekt badawczy nr 0304/R/2/T02/06/01

6. Literatura

- [1] GULSKI E.: „Diagnostowanie wylądowań niezupełnych w urządzeniach wysokiego napięcia w eksploatacji”, Of. Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2003.
- [2] SKUBIS J.: „Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych”, PAN IPPT, Of. Wyd. PO, 1998.
- [3] PRACA ZBIOROWA: „Transformatory w eksploatacji” Wydawnictwo Energo – Complex, 2007.
- [4] BOCZAR T., BORUCKI S., CICHONÁ A., LORENC M.: „Objectivization of the electrical discharge measurement results taken by the acoustic emission method”, Journal de Physique IV Proceedings, „35th Winter School on Wave and Quantum Acoustics”, November 2006, ISSN: 1155-4339, pp. 31 – 34.
- [5] COHEN L.: „Time – Frequency Analysis”, Englewood Cliffs. Prentice Hall, 1995.
- [6] RAK R., MAJKOWSKI A.: „Czasowo – częstotliwościowa analiza sygnałów”, Przegląd Elektrotechniczny, R. 80 nr 5/2004.
- [7] KLISTAŁA T. „Przegląd metod diagnostycznych układów izolacyjnych transformatorów dużej mocy w eksploatacji”, Pomiary Automatyka Kontrola nr 11/2008 str. 754-759
- [8] BOCZAR T.: „Identification of a Specific Type of Partial Discharges form Acoustic Emission Frequency Spectra”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No 4 August 2001, pp. 598-606.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE





PNEUMATICON

II Targi Pneumatyki, Hydrauliki, Napędów i Sterowań

3-5.03.2009

Kielce

Patronat medialny:



Targi Kielce, ul. Zakładowa 1, 25-672 Kielce
Menedżer Targów - Joanna Adamczyk, tel. 041 365 12 14, fax 041 365 13 13, e-mail: adamczyk.j@targikielce.pl
www.pneumaticon.targikielce.pl