

**Wojciech SIKORSKI, Paweł STANIEK, Krzysztof SIODŁA**  
POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

## Diagnostyka transformatorów energetycznych z zastosowaniem metody emisji akustycznej

Dr inż. Wojciech SIKORSKI

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 30 publikacji oraz zgłoszenia patentowego z zakresu diagnostyki transformatorów energetycznych.



e-mail: wojciech.sikorski@put.poznan.pl

Mgr inż. Paweł STANIEK

Doktorant na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor 10 publikacji z techniki badań wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: pawel.staniek@doctorate.put.poznan.pl

Dr hab. inż. Krzysztof SIODŁA

Zastępca dyrektora Instytutu Elektroenergetyki, Kierownik Zakładu Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych. Autor ponad 100 publikacji z techniki wysokich napięć, miernictwa wysokonapięciowego, badania i diagnostyki układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Członek Komitetu Studiów i Grupy Roboczej CIGRE, PTETiS, Komitetu Elektrotechniki PAN.



e-mail: krzysztof.siodla@put.poznan.pl

Takimi urządzeniami są przede wszystkim transformatory energetyczne dużych mocy oraz rozdzielnice izolowane gazem SF<sub>6</sub>.

## 2. Zaawansowane metody detekcji i identyfikacji wylądowań niezupełnych

Przeważająca część prowadzonych aktualnie prac badawczych związana jest z opracowywaniem procedur i narzędzi pozwalających na prawidłową interpretację uzyskiwanych wyników pomiarowych. W przypadku metody EA prace koncentrują się głównie na uzyskaniu zadowalającej skuteczności w detekcji, identyfikacji i lokalizacji defektów generujących wnz w izolacji wysokonapięciowej. W tym celu coraz częściej do analizy i opisu sygnałów EA wykorzystuje się zaawansowane techniki przetwarzania sygnałów. Jednym z głównych celów niniejszej pracy było znalezienie i użycie takich metod przetwarzania sygnałów, które byłyby odporne na szum i zakłócenia wąskopasmowe oraz charakteryzowały się dużą szybkością działania. Na podstawie licznych testów i symulacji do analizy częstotliwościowej wybrano algorytm MUSIC (ang. *Multiple Signal Classification*), zaś do łącznej analizy czasowo-częstotliwościowej algorytm CWT (ang. *Continuous Wavelet Transform*). Algorytm MUSIC jest przedstawicielem tzw. metod podprzeźrzeni, których główną zaletą jest wysoka rozdzielczość oraz możliwość detekcji sygnałów harmonicznych „zanurzonych” w szumie. Dzięki temu możliwa jest detekcja wylądowań niezupełnych rejestrowanych w warunkach silnych zakłóceń (np. na stacji rozdzielczej) jak również wylądowań wewnętrznych, których amplituda jest silnie tłumiona przez bariery przespanowe.

Z kolei łączna analiza czasowo-częstotliwościowa wykonana przy użyciu algorytmu ciągłej transformaty falowej CWT umożliwia detekcję wylądowań wieloźródłowych różnych typów i potwierdzenie wyników analizy częstotliwościowej.

Istotnym etapem wieloletnich prac badawczych był pomiar wylądowań niezupełnych generowanych w laboratoryjnych układach modelowych izolacji papierowo-olejowej (rys. 1).

Dzięki temu opracowano bazę wzorców dla typowych defektów izolacji transformatora będących źródłem wylądowań niezupełnych [1]. Kolejnym etapem prac badawczych było opracowanie wyspecjalizowanego oprogramowania *PD-Identifier* [2], za pomocą którego realizowana jest automatyczna detekcja, identyfikacja i szczegółowa analiza impulsów.

Dodatkowo w celu zoptymalizowania procesu automatycznej identyfikacji defektów posłużono się sztuczną siecią neuronową (SSN). Projektowanie sieci oraz proces uczenia przeprowadzono w symulatorze sztucznych sieci neuronowych NEURONIX firmy Aitech.

### Streszczenie

W artykule przedstawiono przykłady zastosowania metody emisji akustycznej do detekcji, identyfikacji i lokalizacji wylądowań niezupełnych (wnz) w transformatorach energetycznych. Dodatkowo omówiono takie kwestie jak: dobór optymalnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów emisji akustycznej, oprogramowanie wspomagające automatyczną identyfikację i analizę impulsów wnz oraz zakres aktualnie prowadzonych prac badawczych związanych z diagnostyką transformatorów przy wykorzystaniu metody emisji akustycznej.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka transformatorów energetycznych, metoda emisji akustycznej, wylądowania niezupełne.

## Diagnostics of power transformers using the acoustic emission method

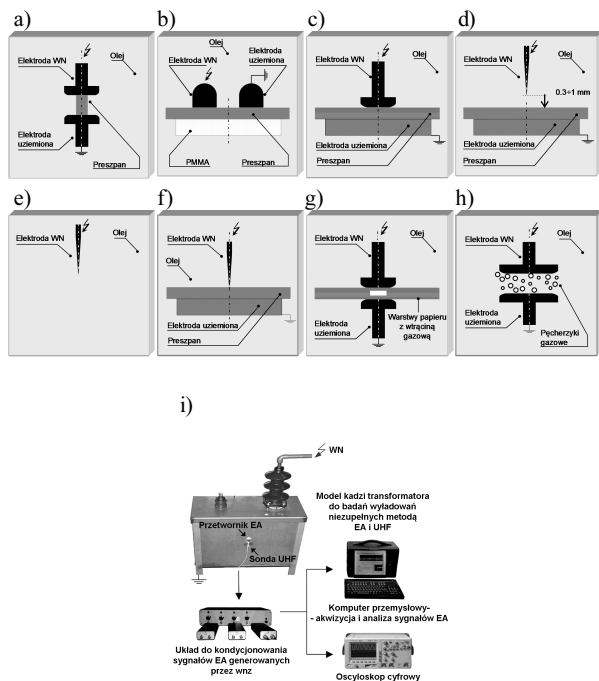
### Abstract

The paper presents some examples of using the acoustic emission method for detection, identification and location of partial discharges (PD) in high voltage power transformers. Moreover, there are discussed such problems as: selection of optimal methods used for digital processing of acoustic emission signals, software for automatic identification and analysis of PD pulses and the realised research works dealing with power transformer diagnostics with the use of the acoustic emission method.

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

## 1. Wprowadzenie

Za jedno z podstawowych zagadnień w eksploatacji układów wysokiego napięcia uznawane są problemy diagnostyki tych układów. Wśród tych zagadnień istotną rolę odgrywają badania wylądowań niezupełnych (wnz). Obok intensywnie rozwijanych metod elektrycznych coraz większe znaczenie zyskuje metoda emisji akustycznej (EA). Aktualnie metoda ta znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie wymagany jest pomiar wylądowań niezupełnych na pracującym urządzeniu, które ze względów technicznych lub ekonomicznych nie może być wyłączony z ruchu.



Rys. 1. Schematy układów elektrod, w których generowano: a) wyładowania powierzchniowe w równomiernym polu elektrycznym, w którym można pominąć składową normalną wektora natężenia pola; b) wyładowania powierzchniowe w polu umiarkowanie nierównomiernym, w którym występuje niewielka składowa normalna wektora natężenia pola; c) wyładowania powierzchniowe (klasyfikowane jako ślizgowe) w polu nierównomiernym, w którym występuje duża składowa normalna wektora natężenia pola; d) iskry ślizgowe; e) wyładowania w oleju z ostrza na wolnym potencjale; f) wyładowania wnikaające (penetrujące) w preszpan; g) wyładowania w wewnętrznych wtrącinach gazowych; h) wyładowania w pęcherzykach gazowych; i) zdjęcie zastosowanego w badaniach modelu kadzi transformatora i układu do pomiaru sygnałów EA

Fig. 1. Schematic diagrams of electrode systems in which there were generated: a) surface discharges in uniform electric field where the normal component of field strength vector is insignificant; b) surface discharges in moderate non-uniform electric field with small normal component of field strength vector; c) surface discharges (called creeping discharges) in non-uniform electric field, characterised by large normal component of field strength vector; d) creeping-discharge sparks; e) discharges in oil developing from free-potential point electrode; f) pressboard penetrating discharges; g) PD in internal gas voids; h) PD in gas bubbles in oil; i) model of transformer tank and equipment used for acoustic emission signal detection

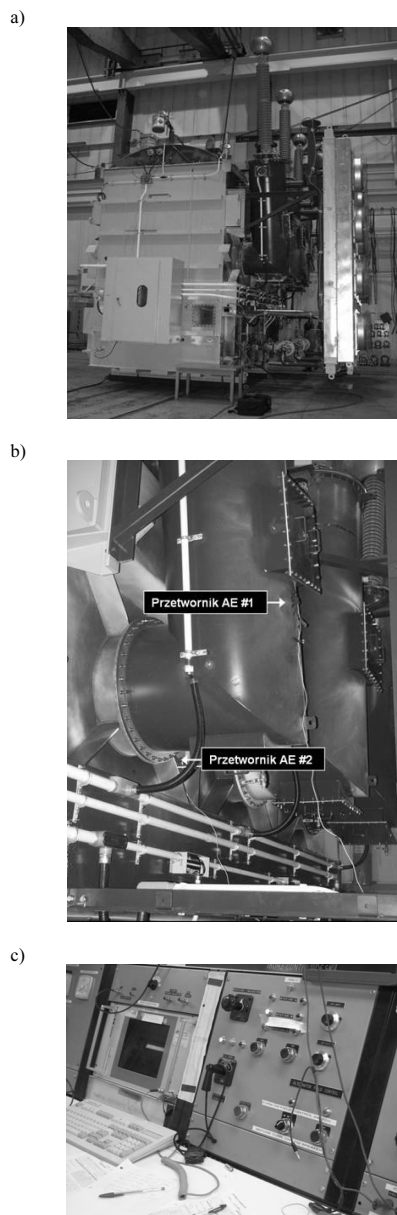
### 3. Przykłady zastosowania metody EA do detekcji, identyfikacji i lokalizacji wyładowań niepełnych w transformatorach energetycznych

Obecnie w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej prowadzone są zaawansowane prace nad systemem zdalnego monitoringu wyładowań niepełnych w transformatorach energetycznych opartym na metodzie emisji akustycznej. Według założeń realizowanego projektu badawczo-rozwojowego, pierwsze testowe systemy monitoringu zostaną w najbliższym czasie zainstalowane na wybranych transformatorach energetycznych. Równolegle prowadzone są prace nad rozwojem i udoskonaleniem metody emisji akustycznej. Ich głównym celem jest poprawa skuteczności procesu detekcji i identyfikacji defektów izolacji transformatora, które są źródłem wyładowań. Jedną z podstawowych zalet metody emisji akustycznej jest możliwość lokalizacji defektów. W celu poprawy dokładności lokalizacji źródeł wyładowań prowadzone są aktualnie badania nad zintegrowaniem metody emisji akustycznej i metody UHF (ang. *Ultra High Frequency*) [3].

W trakcie wieloletnich prac nad rozwojem metody emisji akustycznej przebadano kilkanaście transformatorów energetycznych pracujących na stacjach rozdzielczych jak również nowych trans-

formatorów poddanych próbom odbiorczym w przykładowym laboratorium wysokonapięciowym. Pomiary przeprowadzone na rzeczywistych transformatorach pozwoliły zweryfikować i rozbudować bazę wzorcowych wnz (typowych dla izolacji papierowo-olejowej) opracowaną w ramach badań modelowych.

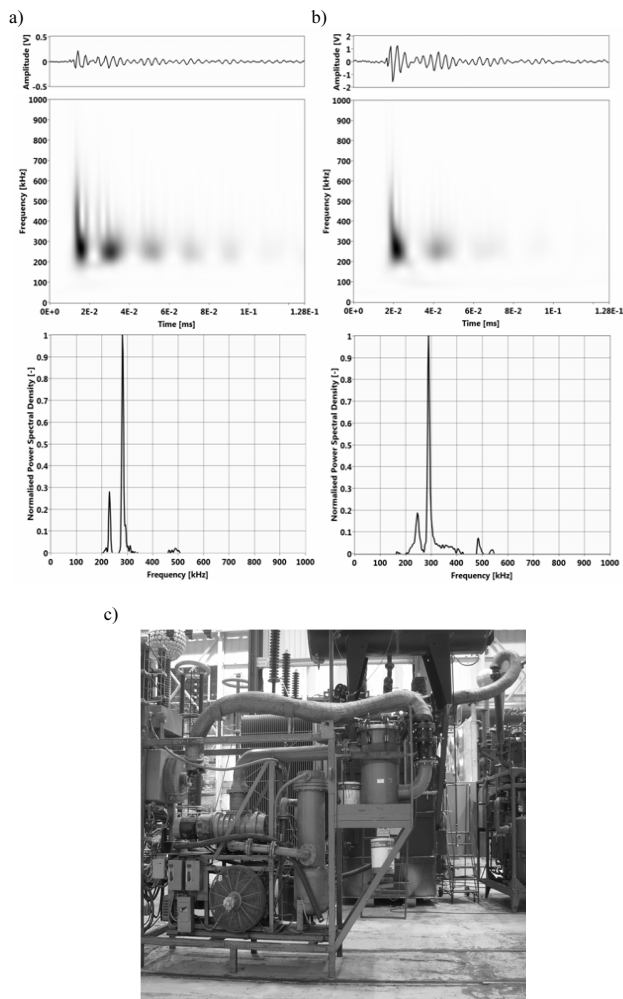
Interesującym przykładem jest transformator (rys. 2a), w przypadku którego zachodziło podejrzenie, że w wyniku awarii pompy w trakcie procesu napełniania olejem (rys. 3c) do kadzi mogła zostać wtłoczona pewna objętość powietrza.



Rys. 2. Wygląd zewnętrzny badanego transformatora (a); miejsce mocowania przetworników EA (b); stanowisko do pomiaru wyładowań niepełnych szerokopasmową metodą elektryczną (c)

Fig. 2. Overall view of the investigated transformer (a); position of acoustic sensor attachment (b); work-place for partial discharges investigation with the use of wide-band electrical method (c)

W trakcie próby napięciowej równolegle prowadzone pomiary metodą elektryczną i metodą emisji akustycznej wykazały, że w badanym transformatorze powstają wnz już przy napięciu dużo niższym od wartości napięcia znamionowego. Analiza porównawcza zarejestrowanych impulsów EA z bazą wzorców opracowaną na podstawie badań modelowych potwierdziła hipotezę, że źródłem wnz były pęcherzyki gazowe w oleju (rys. 3a i 3b).

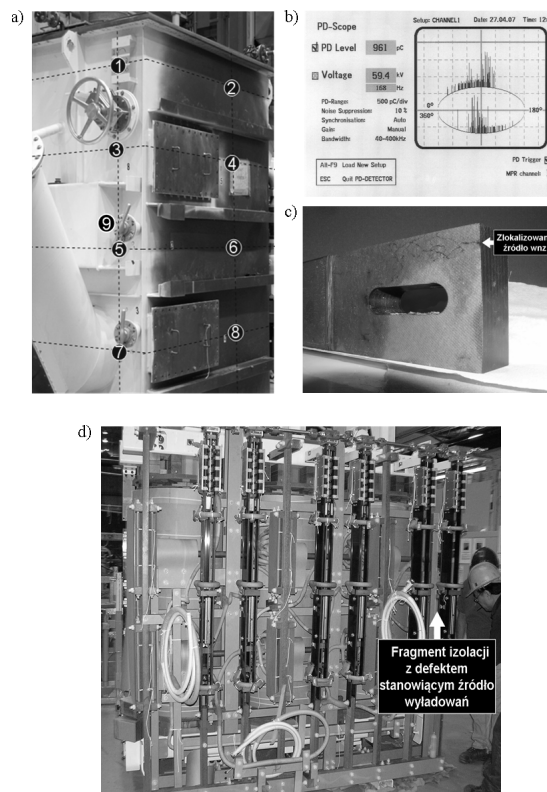


Rys. 3. Przebieg czasowy, spektrogram CWT, znormalizowane widmo gęstości mocy estymowane metodą MUSIC opracowane dla impulsów EA zarejestrowanych: a) w badanym transformatorze; b) w układzie modelowym, którego schemat elektrod przedstawiono na rysunku 1h; c) pompa próżniowa, której awaria spowodowała, że oprócz oleju do kadzi transformatora wtłoczone zostało powietrze

Fig. 3. Time waveform, CWT spectrogram and normalised MUSIC power spectrum density prepared for AE signals: a) registered in investigated transformer; b) generated by PD in air bubbles in electrode system whose schematic diagram is shown in Fig. 1h; c) vacuum pump whose failure was the cause that air got in the insulating oil pumped into the transformer tank

Kolejnym interesującym przykładem jest transformator przewodny, w przypadku którego w trakcie próby napięciowej w fazie L1 po stronie wysokiego napięcia rejestrowano bardzo intensywne (ok. 1000 pC) wyładowania niepełne (rys. 4b). Zdecydowano się przeprowadzić lokalizację źródła wyładowań przy użyciu techniki największej głośności (tzw. metoda osłuchowa), która oparta jest na pomiarze wartości amplitud EA w różnych punktach kadzi i znalezieniu takiego miejsca, w którym amplitudy EA są największe [4]. Stosując się do zaleceń IEEE [5], wybrano wstępnie 8 punktów na kadzi, w których montowane były przetworniki akustyczne (rys. 4a). Spośród wybranych ośmiu punktów tworzących siatkę pomiarową, największe amplitudy impulsów EA rejestrowano w punkcie 5. Następne pomiary prowadzone już w bliskim sąsiedztwie tego punktu pozwoliły na precyzyjne wskazanie punktu, w którym rejestrowane impulsy miały największą amplitudę (punkt 9 na rysunku 4a). Analiza porównawcza zarejestrowanych impulsów EA z bazą wzorców opracowaną na podstawie badań modelowych izolacji wykazała, że w badanym transformatorze generowane były wyładowania powierzchniowe występujące w równomiernym polu elektrycznym, z pomijalnie małą lub niewielką składową normalną wektora natężenia. Ten typ wyładowań podczas badań modelowych generowano w układach elektrod, których schematy pokazano na rysunku 1a i 1b. Demontaż części układu izolacyjnego transformatora i jego szczegółowa

inspekcja (rys. 4d) wykazała, że źródłem wyładowań powierzchniowych była ostra metalowa wtrącina znajdująca się w preszpanowej belce wsporczej (rys. 4c) szeregowo-równoległego przełącznika zaczeptów.



Rys. 4. Rozmieszczenie przetworników EA podczas lokalizacji źródła wyładowań w fazie L1 strony WN transformatora przewodnego (a); wynik pomiaru wzn szerokopasmową metodą elektryczną (b); preszpanowa belka wsporcza ze śladami wyładowań powierzchniowych (c); inspekcja i demontaż fragmentu izolacji z defektem generującym wzn (d)

Fig. 4. Position of acoustic emission sensor attachment during PD source location in L1 phase of the investigated mobile transformer (a); the result of PD measurements with the use of wide-band electrical method (b); pressboard supporting beam with visible surface discharge tracks (c); inspection and dismantling of transformer insulation with defect generating PD (d)

Pracę zrealizowano w ramach grantu badawczo-rozwojowego nr R01 057 03, pt.: "Monitoring wyładowań niepełnych w wysokonapięciowych transformatorach energetycznych przy wykorzystaniu metody emisji akustycznej", który finansowany jest przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

#### 4. Literatura

- [1] W. Sikorski, K. Siodła: Identification of Partial Discharge Sources in High Voltage Insulating Systems Using Acoustic Emission Method. The 14th International Symposium on High Voltage Engineering ISH-2005, Beijing, China, August 25-29, 2005
- [2] W. Sikorski, P. Staniek, K. Walczak: Joint UHF/AE Method of Partial Discharges Detection and Identification. International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials APTADM'2007, Wrocław, 2007
- [3] W. Sikorski, K. Siodła, P. Staniek: On-line Monitoring System of Partial Discharges Occurring in Power Transformer Insulation Using Acoustic Emission Method. The 15th International Symposium on High Voltage Engineering ISH-2007, Ljubljana, Slovenia, August 2007
- [4] J. Skubis: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Wyd. Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 1993
- [5] IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors. C57.127-2007, 2007