

Tomasz BOCZAR, Paweł FRĄCZ

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI
INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI

System ekspertowy oceny stanu układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej

Dr hab. inż. Tomasz BOCZAR

Prodziekan Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Kierownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 180 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: t.boczkar@po.opole.pl

Dr inż. Paweł FRĄCZ

Adiunkt Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Pracownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 30 publikacji z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: p.fracz@po.opole.pl

Streszczenie

Tematyka niniejszego artykułu dotyczy doskonalenia praktycznych zastosowań metody emisji akustycznej (EA) w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. W szczególności przedstawiono podstawowe założenia oraz opisano poszczególne elementy eksperckiego systemu diagnostycznego wykorzystującego metodę akustyczną do oceny stanu mierzonej izolacji transformatorów energetycznych, wykonywanej podczas ich normalnej pracy w warunkach przemysłowych.

Słowa kluczowe: metoda emisji akustycznej, wyładowania elektryczne, wyładowania niezupełne, system ekspercki, wysoko-napięciowe systemy izolacyjne.

Expert system for assessment of electric power transformer insulation systems using the acoustic emission method

Abstract

The subject matter of this paper refers to the development of practical applications of the acoustic emission (EA) method to diagnostics of high-voltage insulation systems of power appliances, carried out during their regular operation in industrial conditions. First of all, basic assumptions are presented and the particular elements of the expert diagnostic system using AE method for the assessment of the condition of the electric power transformer insulation measured are described. Fig. 1 shows its block diagram in which the following modules can be distinguished: a measuring system (Figs. 2 and 3), a processing – analysing system, a knowledge base and a classifier. These modules are characterised successively in Section 2 of the paper. Special attention is given to the description of the group of multiparametric descriptors (Fig. 4) characterising the AE signals in the time, frequency and time-frequency domains, including descriptive statistics indexes and correlative parameters. Accordant descriptors make it possible, under strictly defined metrological conditions, to recognize basic partial discharge forms (PDs) that may occur in paper-oil insulation. In this way a catalogued knowledge base containing the so-called ‘fingerprints’ was created for basic types of high-voltage defects of insulation systems. The scope of the research work carried out in the Institute of Power Engineering, connected with a practical implementation of the system suggested, is characterised in the last section of the paper.

Keywords: acoustic emission method, electrical discharge, partial discharge, expert system, high-voltage insulation systems.

1. Wprowadzenie

Jedną z podstawowych przyczyn przyspieszonej degradacji układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia są wyładowania niezupełne (WNZ). Ich ocenę umożliwiają obecnie trzy metody diagnostyczne: elektryczna, chromatografii gazowej i emisji akustycznej (EA). Wykonuje się również

pomiary o charakterze szacunkowym, wielkości powstającego ciepła, emitowanego światła – spektrofotometria i zmian ciśnienia w obszarze generacji WNZ [9].

Podjęcie prac naukowo-badawczych związanych z praktycznym zastosowaniem EA emitowanej przez wyładowania elektryczne do oceny stanu badanej izolacji wynikało z trudności metrologicznych występujących podczas pomiarów diagnostycznych wykonywanych w warunkach przemysłowych przy wykorzystaniu metody elektrycznej. W warunkach normalnej pracy urządzeń elektroenergetycznych pomiar WNZ metodami elektrycznymi, ze względu na wysoki poziom zakłóceń elektromagnetycznych, jest znacznie utrudniony, a w wielu przypadkach nie jest w ogóle możliwy. Natomiast istotnym problemem w metodzie chromatografii gazowej jest możliwość zafałszowania wyników pomiarowych wynikająca z niewłaściwego sposobu pobierania, a także transportu próbek oleju izolacyjnego. Z kolei informacje o występowaniu, intensywności i lokalizacji WNZ w układach izolacyjnych mają podstawowe znaczenie dla poprawnej oceny stanu izolacji urządzeń, a w konsekwencji decydują o właściwej prognozie dotyczącej ich dalszej bezawaryjnej pracy. Określenie przewidywanego czasu dalszej eksploatacji diagnozowanych urządzeń ma, oprócz waloru poznawczego oraz aspektu naukowego, bezpośrednie przełożenie na konkretny i znaczący wymiar finansowy dla elektrowni i spółek dystrybucyjnych [3-5].

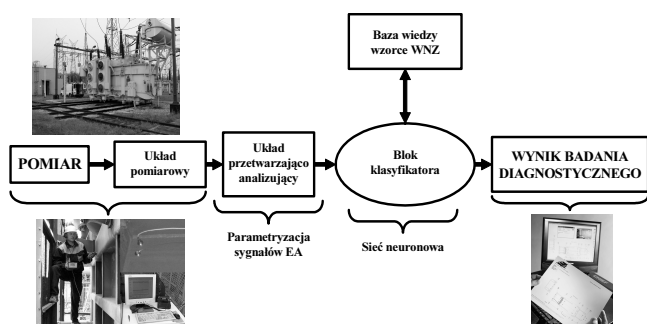
Zastosowanie metody EA umożliwia detekcję czyli stwierdzenie występowania WNZ w izolacji transformatorów elektroenergetycznych, na podstawie pomiarów diagnostycznych wykonywanych on-line, bez konieczności odłączania badanych jednostek. Ponadto na podstawie uzyskiwanych wyników istnieje możliwość lokalizacji obszarów generacji WNZ w wysokonapięciowej izolacji papierowo-olejowej. W tym celu stosuje się metodę osłuchową czyli największej głośności lub triangulacyjną [9].

Natomiast istotnym problem jest pomiar intensywności i ocena wielkości zmierzonych metodą EA WNZ. Jest to spowodowane występowaniem na drodze propagacji sygnałów EA generowanej przez WNZ wielu warstw izolacyjnych, najczęściej o różnych współczynnikach tłumienia i odbicia, które należy brać pod uwagę przy wyznaczeniu zastępczej prędkości rozchodzenia się fal akustycznych. Ponadto zakres wykorzystania metody EA może być ograniczony m. in. następującymi czynnikami: wysokim poziomem zakłóceń akustycznych, złożoną geometrią mierzonych obiektów, która uniemożliwia zamocowanie do ich powierzchni przetworników pomiarowych, a także stosowaniem dielektryków lub układów izolacyjnych o niskim współczynniku sprężystości i złożonej budowie geometrycznej. Jednocześnie należy podkreślić, że metoda EA nie zastępuje metod diagnostycznych stosowanych do tej pory, a jedynie podając nowe wskaźniki charakteryzujące mierzoną izolację może stanowić ich ważne uzupełnienie. W ten sposób metoda akustyczna wypełnia lukę, jaka istniała

w metrologii pomiarów WNZ generowanych w układach izolacyjnych transformatorów dużych mocy [3-5].

2. Charakterystyka systemu eksperckiego pomiaru WNZ przy zastosowaniu metody EA

Prowadzone obecnie w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Opolskiej prace naukowo-badawcze zmierzają do wdrożenia w pomiarach diagnostycznych komputerowego systemu eksperckiego, który w oparciu o wyniki uzyskiwane metodą EA umożliwiłaby ocenę stanu izolacji, podczas normalnej pracy badanego transformatora elektroenergetycznego. Schemat blokowy opracowanego rozwiązania został przedstawiony na rys. 1. Wykonany system ekspercki składa się z czterech podstawowych modułów tj.: układu pomiarowego, układu przetwarzająco-analizującego, bazy wiedzy i klasyfikatora, które kolejno scharakteryzowano w dalszej części artykułu.

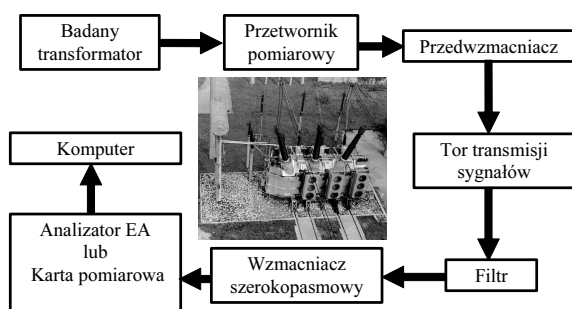


Rys. 1. Schemat blokowy systemu eksperckiego oceny stanu układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem metody emisji akustycznej

Fig. 1. Block diagram of the expert system for assessment of electric power transformer insulation condition using the AE method

2.1. Układ do rejestracji sygnałów EA od WNZ

Schemat blokowy układu do rejestracji sygnałów EA generowanej przez WNZ, jaki może być stosowany zarówno podczas badań prowadzonych w warunkach laboratoryjnych, jak również do pomiarów diagnostycznych wykonywanych podczas normalnej eksploatacji transformatora elektroenergetycznego zilustrowano na rys. 2.

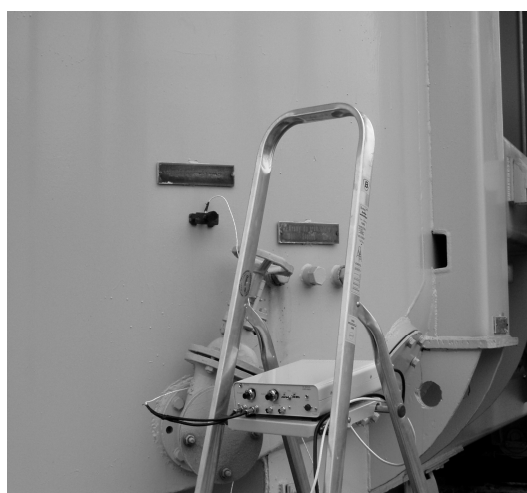
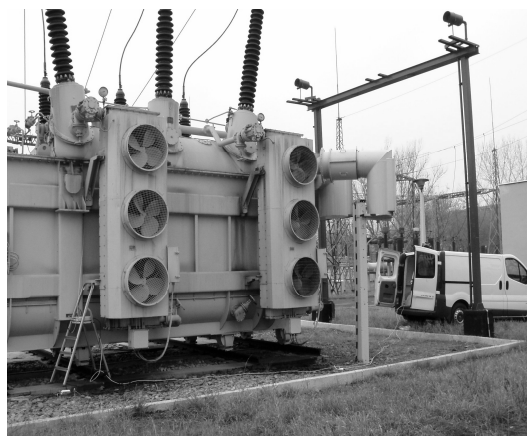


Rys. 2. Schemat blokowy układu do rejestracji sygnałów EA od WNZ

Fig. 2. Block diagram of the system for registration of AE signals from PDs

W pomiarach sygnałów EA od WNZ wykorzystuje się przetworniki piezoelektryczne szerokopasmowe stykowe, które za pomocą specjalnych uchwytów magnetycznych mocuje się do kadzi badanego transformatora. Na wyjściu przetworników uzyskuje się sygnał napięciowy o wartości proporcjonalnej do rejestrowanych impulsów EA, który po wzmocnieniu i odfiltrowaniu mierzony jest przez umieszczoną w komputerze kartę pomiarową

lub analizator EA. Na rys. 3 przedstawiono widok układu pomiarowego zastosowanego podczas pomiarów diagnostycznych wykonywanych bezpośrednio na pracującym transformatorze elektroenergetycznym.



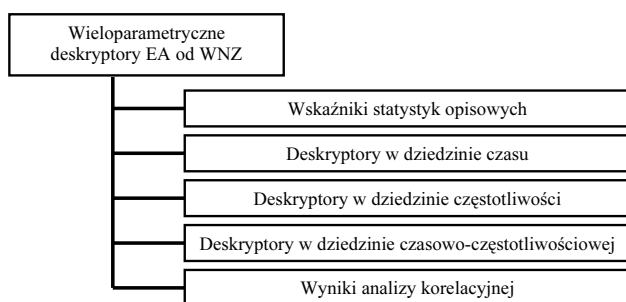
Rys. 3. Pomiary WNZ przy zastosowaniu metody EA podczas normalnej pracy transformatora elektroenergetycznego

Fig. 3. PD measurements using the AE method during a regular operation of an electric power transformer

2.2. Baza wiedzy z wzorcami WNZ

Na podstawie wykonanych prac naukowo-badawczych, których wyniki były szeroko publikowane m. in. w pracach [1-10] opracowano dla podstawowych form WNZ mierzonych metodą EA bazę wiedzy złożoną z wzorców porównawczych tzw. „odcisków palców” (ang. fingerprints). Utworzona baza zawiera skatalogowane wieloparametryczne grupy deskryptorów charakteryzujące sygnały EA (rys. 4), które przy ściśle określonych warunkach metrologicznych umożliwią rozpoznawanie następujących form WNZ: wyładowania w układzie ostrze-ostrze w oleju, które można powiązać z WNZ powstałymi na skutek uszkodzenia izolacji dwóch sąsiadujących zwojów uzwojenia transformatora; wyładowania w układzie ostrze-ostrze w oleju z pęcherzykami gazowymi, które mogą odzwierciedlać WNZ w oleju zagazowanym i spowodowane są uszkodzeniem izolacji dwóch sąsiadujących zwojów transformatora; wyładowania w układzie ostrze-płyta w oleju, które mogą modelować WNZ występujące między uszkodzoną częścią izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi); wyładowania w układzie powierzchniowym dwóch elektrod płaskich między którymi znajduje się izolacja papierowo-olejowa jest to najczęstsza forma WNZ występująca w tzw. punkcie potrójnym, w którym powierzchnia elektrody styka się z dielektrykiem stałym i ciekłym;

wyładowania w układzie powierzchniowym jednej elektrody płaskiej, drugiej wieloostrowej, między którymi znajduje się izolacja papierowo-olejowa w układzie tym występuje inny rozkład natężenia pola elektrycznego w porównaniu z wyładowaniami w układzie powierzchniowym z dwoma elektrodami płaskimi; wyładowania w układzie wieloostrowe-płyta w oleju, które mogą modelować WNZ występujące między wielopunktowym uszkodzeniem izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi); wyładowania w układzie wieloostrowe-płyta w oleju z pęcherzykami gazowymi, które mogą być powiązane z WNZ występującymi między wielopunktowym uszkodzeniem izolacji uzwojenia transformatora a uziemionymi częściami płaskimi (elementy kadzi), w zagazowanym oleju; wyładowania na cząstkach o nieokreślonym potencjale przemieszczających się w oleju, które mogą modelować WNZ występujące w oleju zawierającym cząsteczki włókien celulozowych powstałych w procesie stopniowej degradacji izolacji papierowo-olejowej spowodowanej procesami starzeniowymi.



Rys. 4. Klasyfikacja wieloparametrycznych deskrytorów EA od WNZ
Fig. 4. Classification of EA multiparametric descriptors from PDs

Z grupy ponad 100 parametrów, które mogą być wykorzystywane do opisu sygnałów EA, wyselekcjonowano następujące deskrytory, które stanowią „odciski palców” dla wymienionych wyżej podstawowych form WNZ:

- widmo amplitudowe i widmową gęstość mocy wyznaczone przy zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera (ang. FFT);
- dwu- i trójwymiarowe spektrogramy widma amplitudowego i gęstości mocy obliczone przy zastosowaniu krótko-czasowej transformaty Fouriera (ang. STFT);
- skalogramy wyznaczone przy zastosowaniu ciągłej transformaty falkowej (ang. CWT),
- przebiegi dekompozycji falkowej uzyskane przy zastosowaniu dyskretnej transformaty falkowej (ang. DWT);
- wartości deskrytorów obliczone w dziedzinie czasu, a w szczególności: suma EA (ΣEA), tempo EA ($EA/\Delta t$), suma zdarzeń akustycznych (ΣN), tempo zdarzeń akustycznych ($N/\Delta t$) oraz pierwiastek ze średniej kwadratów chwilowej wartości sygnału elektrycznego przetworzonego przez przetwornik pomiarowy z sygnału akustycznego (A_{RMS}), maksymalna amplituda (wierzchołek), średnia amplituda, powierzchnia nad wartością średnią, okres półtrwania;
- podstawowe parametry impulsów EA związane z przenoszoną energią, a w szczególności: wartość maksymalna i średnia RMS, suma RMS, wskaźnik wierzchołka 1, stosunek 2, 1/3, 1, wskaźnik wierzchołka 2, stosunek 3, 1/3, 2, energia pojedynczego impulsu lub zdarzenia;
- wartości deskrytorów wyznaczone w dziedzinie częstotliwości i czasowo – częstotliwościowej tj. zakresy pasm dominujących częstotliwości wyznaczone dla przyjętego progu dyskryminacji, częstotliwość maksymalnej intensywności w widmie, częstotliwość środkowa (medianowa), maksymalna intensywność lub wierzchołek o wybranych pasmach częstotliwości, średnia częstotliwość w widmie amplitud, szerokość pasma częstotliwości sygnałów przekraczających wybrany poziom, energia w wybranych pasmach częstotliwości, wartość maksymalna, wartość

średnia, wartość skuteczna, współczynnik szczytu, współczynnik kształtu;

- wyniki analizy korelacyjnej, a w szczególności przebiegi funkcji autokowariancji, kowariancji wzajemnej i koherencji;
- wskaźniki statystyk opisowych, będącymi miarami położenia tj. średnia arytmetyczna, średnia harmoniczna, moda, częstość mody, względna częstość mody, kwartył pierwszy, mediana, kwartył trzeci, średnia ucinana, średnia winsorowska, typ asymetrii rozkładu
- wskaźniki statystyk opisowych, będącymi miarami rozproszenia tj. wariancja, odchylenie przeciętne, odchylenie standardowe, odchylenie ćwiartkowe, rozstęp międzykwartyłowy, rozstęp, wartość maksymalna, wartość minimalna, względny współczynnik zmienności, typowy obszar zmienności, klasyczny typowy obszar zmienności
- wskaźniki statystyk opisowych, będącymi miarami asymetrii tj. współczynnik skośności, standaryzowany współczynnik skośności, wskaźnik asymetrii, asymetria rozkładu
- wskaźniki statystyk opisowych, będącymi miarami koncentracji tj. współczynnik kurtozy, standaryzowany współczynnik kurtozy, błąd standardowy kurtozy, charakter koncentracji;
- przebiegi wykresów pudełkowych, rozrzutu i symetryczności;
- przebiegi histogramów, odpowiadające im krzywe gęstości, skumulowane histogramy i skumulowane krzywe gęstości.

2.3. Parametryzacja zarejestrowanych sygnałów EA generowanej przez WNZ

Zarejestrowane za pomocą układu pomiarowego sygnały EA poddawane są kolejnym krokom przetwarzaniu cyfrowemu przy zastosowaniu procedur numerycznych napisanych w środowisku programistycznym Matlab (analiza czasowa, częstotliwościowa, czasowo-częstotliwościowa, korelacyjna) i Statistica (analiza statystyczna) w celu wyznaczenia wartości wybranych deskrytorów, które są wykorzystywane jako kryteria porównawcze do rozpoznawania podstawowych form WNZ. Następnie wyselekcjonowane parametry, reprezentujące zarejestrowane sygnały EA, przekazywane są do klasyfikatora.

2.4. Blok klasyfikatora

W bloku klasyfikatora następuje porównanie wartości wyselekcjonowanych parametrów wyznaczonych dla zarejestrowanych sygnałów EA z odpowiednimi deskrytorami zawartymi w utworzonej bazie danych, zawierającej „odciski palców” dla podstawowych form WNZ. W ten sposób dokonywany jest proces identyfikacji i klasyfikacji rejestrowanych WNZ, co w rezultacie daje możliwość wykonania oceny stanu mierzonej izolacji. Jako narzędzie umożliwiające wnioskowanie zastosowano jednokierunkową wielowarstwową sieć neuronową, którą zaimplementowano w środowisku programowym Matlab. Zastosowana struktura to sieć typu Feed – Forward Backpropagation Network (F - F BP), w której każdy z neuronów posiada sigmoidalną funkcję aktywacji. Wykorzystana struktura posiada trzy warstwy: warstwę wejściową, jedną warstwę ukrytą oraz warstwę wyjściową. Natomiast proces uczenia zastosowanej sieci przeprowadzono w oparciu o uczenie nadzorowane przy wykorzystaniu algorytmu RPROP (Resilient Backpropagation). Po przeprowadzeniu przez zastosowaną sieć neuronową procesu wnioskowania diagnostyk uzyskuje zobiektywizowane informacje o rodzaju występujących w izolacji WNZ, o powiązania ich z określonym typem defektu i w konsekwencji o stopniu degradacji mierzonej izolacji. Na tej podstawie istnieje możliwość oszacowania czasu dalszej bezawaryjnej pracy badanego transformatora. Do podstawowych zalet wykonanej w ten sposób diagnostyki można przede wszystkim zaliczyć niezależność uzyskiwanych wyników od subiektywnej oceny osób wykonujących pomiary i możliwość jej wykonywania podczas normalnej eksploatacji transformatorów w warunkach przemysłowych.

3. Podsumowanie

W chwili obecnej istnieje jeszcze potrzeba rozwiązania szeregu szczegółowych zagadnień związanych z praktycznym zastosowaniem w warunkach przemysłowych zaproponowanego systemu eksperckiego do oceny stanu układów izolacyjnych transformatorów elektroenergetycznych z wykorzystaniem metody EA. Realizowane w tym zakresie prace naukowo-badawcze są aktualnie prowadzone przez pracowników Katedry Wysokich Napięć w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Opolskiej.

Ponadto należy podkreślić, że istnieje także potrzeba kontynuacji prac dotyczących ujednoczenia przepisów i wprowadzenia międzynarodowych norm dotyczących badań diagnostycznych izolacji transformatorów dużych mocy oraz będących w eksploatacji przekładników prądowych i napięciowych. Aktualnie zakres i terminy okresowych pomiarów diagnostycznych ustalają przepisy i rozporządzenia wewnętrzne, które są różne w każdym kraju. Ujęte w tych przepisach rodzaje badań diagnostycznych dotyczą tylko podstawowych metod diagnostycznych i klasycznych wskaźników charakteryzujących izolację. Definiowane w przepisach zakresy badań diagnostycznych należy traktować jako niezbędne i wymagane minimum, które powinno być, w miarę potrzeb i możliwości technicznych oraz finansowych, rozszerzone o badania uzupełniające.

Praca finansowana ze środków na naukę jako projekt badawczy – rozwojowy nr R01 006 01.

4. Literatura

- [1] Boczar T. - Current Application Possibilities of the Acoustic Emission Method in Diagnostics of Insulation Systems of Power Appliances. *Acta Acustica United With Acustica*. Vol. 91, 2005, pp. 1-3.
- [2] 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.

- [3] Boczar T.: „Możliwości zastosowania do opisu sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania sygnałów”, *Studia i Monografie, Of. Wyd. Pol. Op.*, z. 146, Opole, 2003.
- [4] Boczar T.: „Obiektywizacja wyników akustycznej metody oceny wyładowań niezupełnych przy zastosowaniu do opisu sygnałów analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania”, *Studia i Monografie, Of. Wyd. Pol. Op.*, z. 147, Opole, 2003.
- [5] Boczar T.: „Widma emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne w izolacji olejowej”, *Studia i Monografie Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, z. 114, Opole, 2000.
- [6] Boczar T., Zmarzły D. - Application of Wavelet Analysis to Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 11, No 3, June 2004, pp. 433-449.
- [7] Boczar T., Zmarzły D. - Multiresolution Analysis of the Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges. *INSIGHT*. Vol. 45, No. 7, Great Britain, 2003, pp. 488-492.
- [8] Boczar T., Zmarzły D.: „The Application of Correlation Analysis to Acoustic Emission Pulses Generated by Partial Discharges”, *Materials Evaluation, An Official Journal of the American Society for Nondestructive Testing*, Volume 62, Number 9, Columbus, Ohio, USA, September 2004, pp. 935-942.
- [9] Skubis J. - EA w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. *IPPT-PAN, Studia i Monografie nr 99*, Opole, 1998.
- [10] Skubis J.: Boczar T., „Aktualne możliwości i perspektywy zastosowania metody emisji akustycznej w diagnostyce układów izolacyjnych”, *Pomiary Automatyka Kontrola, Miesięcznik Naukowo-Techniczny*, 10'2006, str. 44-45.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

XI Międzynarodowe Targi Analityki i Techniki Pomiarowych EuroLab 2009

Targi EuroLab to specjalistyczna impreza wystawiennicza łącząca świat nauki i biznesu, a odbywająca się w stolicy Polski - Warszawie, pod honorowym patronatem prof. Barbary Kudryckiej - Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz prof. dr hab. Michała Kleibera - Prezes Polskiej Akademii Nauk. Targi są okazją do poznania oferty dla laboratoriów, m.in. nowych urządzeń, narzędzi, odczynników, odzieży ochronnej, itp.

Targi EuroLab są ponadto znakomitym sposobem na poszerzenie wiedzy i podniesienie zawodowych kwalifikacji na licznych seminariach, konferencjach i wykładach prowadzonych przez specjalistów z zakresu: analityki chemicznej, metrologii, biotechnologii oraz Life Science.

Jedną z targowych nowości jest giełda pracy „Jobvector Career Day” - organizowana po raz pierwszy w Polsce przez portal www.jobvector.pl. Jego idea jest stworzenie kompleksowej oferty dla osób poszukujących pracy na rynku Life Science. Na wartościowy program składają się, m.in. certyfikowane warsztaty na

temat metrologii chemicznej poprowadzone przez autoryzowanych wykładowców europejskiego projektu TrainMiC® „Training in Metrology in Chemistry”.

Tradycyjnie, nie zabraknie konkursów, w kategoriach: analityka chemiczna, terenowa aparatura pomiarowa i wyposażenie laboratorium. Zostanie też wyróżnione najbardziej oryginalne i profesjonalne stoisko.

Po raz pierwszy targi odbywać się będą w Centrum Targowo-Kongresowe MT Polska w Warszawie w dniach 4-6 marca 2009 roku. Szczegóły: www.targieurolab.pl

Opracowanie: Artur Szuba Specjalista ds. PR & Eventów

Międzynarodowe Targi Polska Sp. z o.o.,
tel. 022 529 39 25, faks: 022 529 39 15
e-mail: aszuba@mtpolska.com.pl