

Filip POLAK\*  
Wojciech SIKORSKI\*

## WSPOMAGANA KOMPUTEROWO LOKALIZACJA WYLADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W TRANSFORMATORZE ENERGETYCZNYM

W artykule poruszono problematykę wspomaganą komputerowo, automatycznej lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych występujących w układzie izolacyjnym transformatora energetycznego. Główna część artykułu przedstawia opis przyjętych metod badawczych oraz wyniki testów przeprowadzonych na modelu kadzi transformatora w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Poznańskiej. W eksperymencie do lokalizowania defektów stosowano standardową technikę triangulacyjną oraz jej zmodyfikowaną wersję wykorzystującą pojęcie *psuedoczasów*, które zostało zaczerpnięte z techniki GPS. Głównym celem przeprowadzonych badań była analiza porównawcza dokładności lokalizacji źródeł wybranymi metodami. Zastosowane algorytmy lokalizacji oraz metody cyfrowego przetwarzania sygnałów zaimplementowano w środowisku programowania LabVIEW.

### 1. ZJAWISKO WYLADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Zjawisko wyładowań niezupełnych można zdefiniować jako lokalne wyładowania elektryczne, które odbywają się tylko w części wysokonapięciowego układu izolacyjnego i nie powodują bezpośrednio utraty jego własności izolacyjnych. Długotrwałe działanie wyładowań niezupełnych prowadzi zwykle, poprzez mikro- i makroskopowe zmiany w strukturze układu izolacyjnego, do wyładowania zupełnego (przebiecia) i groźnej w skutkach awarii urządzenia.

Ze zjawiskiem wyładowań niezupełnych związane są lokalne zmiany temperatury, chemiczne przemiany izolacji oraz udarowe odkształcenia sprężyste wraz z towarzyszącymi im falami emisji akustycznej. Zjawiska te zostały wykorzystane do opracowania szeroko stosowanych metod detekcji wyładowań niezupełnych, takich jak: termowizja, analiza gazów rozpuszczonych w oleju (DGA) czy metoda emisji akustycznej (EA). Pozostałymi zjawiskami występującymi przy wyładowaniach niezupełnych są promieniowanie świetlne i zmiany ciśnienia gazu, jednak nie znalazły one szerszego zastosowania w obszarze badania wnz [1-9].

---

\* Politechnika Poznańska.

## 2. TECHNIKI LOKALIZACJI ŹRÓDEŁ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH REJESTROWANYCH METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ

**Standardowa technika osłuchowa** (*SAT – Standard Auscultatory Technique*), zwana również metodą największej głośności stosowana jest zazwyczaj w transformatorach będących w użyciu. Technika ta opiera się na pomiarze wartości amplitud emisji akustycznej w różnych punktach kadzi. Na podstawie tak otrzymanych pomiarów określone jest miejsce, w którym amplitudy EA mają największą wartość. Na podstawie obszaru największej głośności, można w przybliżeniu oszacować miejsce występowania wnz [8].

W celu poprawy dokładności metody osłuchowej, opracowana została tzw. **zaawansowana technika osłuchowa** (*AAT – Advanced Auscultatory Technique*), która polega na jednoczesnym pomiarze średniej energii docierającego do przetwornika piezoelektrycznego sygnału emisji akustycznej  $e$  oraz średniej wartości ładunku pozornego wyładowań niezupełnych  $q$ . Wprowadzony został dodatkowy parametr  $p$ , równy ilorazowi zmierzonych wartości średnich  $e$  i  $q$ . Dzięki takiemu zabiegowi prawidłowa wartość energii impulsów EA zależy głównie od efektu osłabienia fali akustycznej, co przekłada się jednoznacznie na odległość pomiędzy źródłem wnz a przetwornikiem piezoelektrycznym zainstalowanym na kadzi transformatora. Dzięki temu ograniczono negatywny wpływ fluktuacji energii na dokładność lokalizacji miejsca największej głośności znajdującego się w pobliżu źródła wyładowań [4].

Szeroko stosowana w diagnostyce transformatorów energetycznych **metoda triangulacyjna** bazuje na obliczaniu różnicy czasowej nadejścia (z ang. *TDOA – Time Difference of Arrival*) sygnału emisji akustycznej do przetworników piezoelektrycznych umieszczonych na kadzi transformatora. W przypadku, gdy nie ma możliwości wyzwolenia akwizycji sygnałem elektrycznym (np. przy użyciu sondy UHF), wtedy dokładny moment inicjacji wyładowań niezupełnych nie jest znany. W takim przypadku konieczne jest zastosowanie co najmniej czterech przetworników EA. Generowana w trakcie wyładowań fala akustyczna, docierając do najbliższej położonego względem defektu przetwornika, zapoczątkowuje akwizycję sygnałów przez pozostałe przetworniki. Przyjmuje się przy tym uproszczenie, że fala akustyczna propaguje się jedynie w ośrodku olejowym z prędkością, w zależności od temperatury oleju, od 1240 do 1400 m/s. Zastosowanie czterech sond pozwala wyznaczyć różnice czasowe rejestrowanych sygnałów i na ich podstawie oszacować współrzędne defektu (źródła wyładowań niezupełnych). W efekcie prowadzonych przez ostatnie lata badań algorytm klasycznej techniki triangulacyjnej ulegał pewnym modyfikacjom. Jedną z takich modyfikacji polega na wykorzystaniu tzw. *pseudoczasów* (czasy przebycia pewnych odcinków z dodatkowym nieznanym offsetem czasowym ( $\Delta t$ ) nawiązujących do

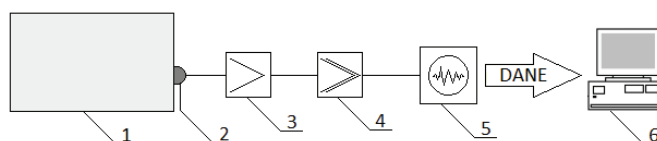
*pseudoodległości* stosowanych w systemach nawigacji GPS. Oznacza to, że jeśli *pseudoczas* przemnoży się przez prędkość rozchodzenia się fali w danym ośrodku otrzyma się właśnie *pseudoodległości* (czyli odległości między przetwornikami a źródłem sygnałów EA).

Szczegółowy opis technik i algorytmów stosowanych do lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych zawarto m.in. w pracach [3, 4].

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

#### 3.1. Układ pomiarowy i obiekt badań

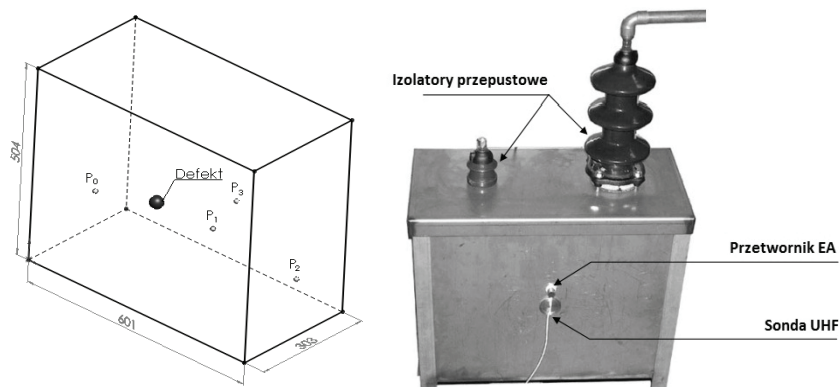
Pomiary przeprowadzono na terenie Laboratorium Wysokich Napięć i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego Politechniki Poznańskiej. Układ pomiarowy wykorzystywany w badaniach składał się z: (2) czterech szerokopasmowych przetworników piezoelektrycznych typu PAC WD, (3) czterokanałowego układu do kondycjonowania sygnałów zawierającego przedwzmacniacze, wzmacniacze i filtry oraz (4) oscyloskopu cyfrowego typu DSO-X 2024A firmy Agilent (rys. 1).



Rys. 1. Schemat ideowy zastosowanego układu pomiarowego: 1 – model kadzi transformatora, 2 – przetwornik piezoelektryczny, 3 – przedwzmacniacz 40 dB, 3 – wzmacniacz i filtry analogowe, 4 – oscyloskop cyfrowy, 5 – komputer PC ze specjalistycznym oprogramowaniem

Badania przeprowadzono na wykonanym ze stali nierdzewnej i wypełnionym olejem mineralnym modelu kadzi transformatora (rys. 2). Wewnątrz kadzi umieszczono układ elektrod do generacji wyładowań ślizgowych. Przetworniki piezoelektryczne mocowano na bocznych ścianach kadzi, a jako substancję sprzęgającą akustycznie i mechanicznie użyto kleju silikonowego. Przed przystąpieniem do pomiarów układ za każdym razem kalibrowano przy użyciu metody *Hsu-Nielsena*.

Procedury przetwarzania zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej oraz algorytmy lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych zaimplementowano w środowisku LabVIEW. Istotną cechą stworzonego oprogramowania do lokalizacji wnz jest możliwość automatycznej estymacji początków sygnałów (ang. *onset time estimation*). W tym celu wykorzystano kryterium Akaike (AIC - *Akaike information criterion*) oraz kryterium Hinsey'a (zwane również kryterium energetycznym *EC* – *energy criterion*).



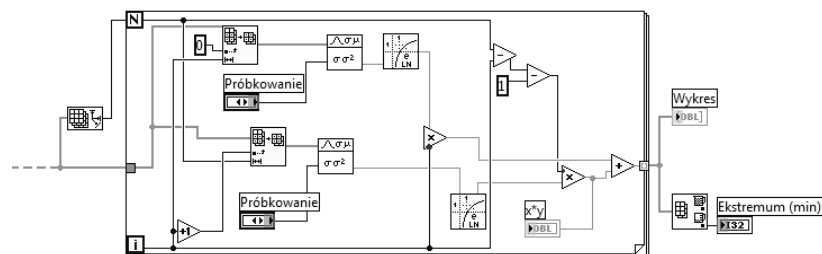
Rys. 2. Schemat ideowy przedstawiający sposób rozmieszczenia przetworników EA i położenie defektu (a) oraz zdjęcie modelu kadzi wykorzystanego w badaniach (b)

Według założeń kryterium Akaike w celu oszacowania początku sygnału należy znaleźć minimum następującej funkcji:

$$AIC_k = k \cdot \ln(\sigma_{1,k}^2) + (N - k - 1) \cdot \ln(\sigma_{k+1,N}^2) \quad (1)$$

gdzie:  $k$  – numer aktualnej próbki,  $N$  – liczba próbek,  $\sigma^2$  – wariancja z określonego w indeksie dolnym przedziału.

Na rysunku 3 przedstawiono implementację kryterium AIC w języku G (środowisko LabVIEW).

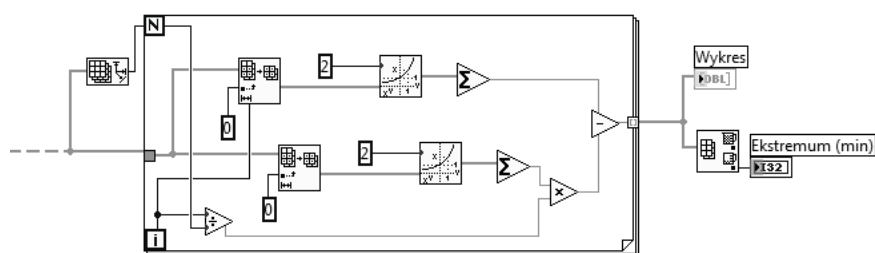


Rys. 3. Implementacja kryterium Akaike (AIC) w języku G

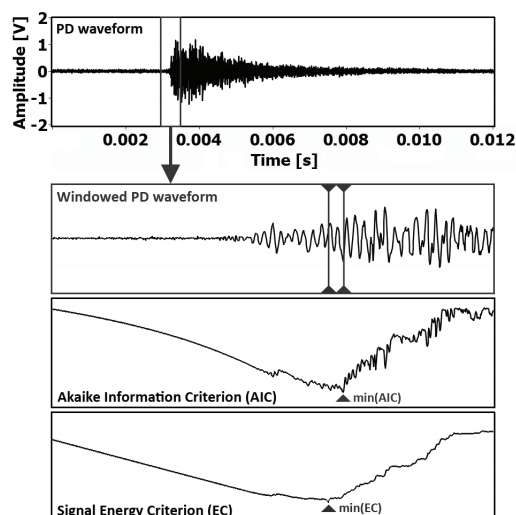
W przypadku kryterium energetycznego, podobnie jak w przypadku kryterium AIC, poszukiwana jest wartość minimalna funkcji, która opisana jest następującą zależnością:

$$EC_k = \sum_{i=1}^k x_i^2 - k \cdot P_x \quad (2)$$

gdzie:  $x_i$  – wartość aktualnej próbki,  $P_x = \frac{E_x}{N}$  – średnia moc sygnału w przedziale o szerokości N-próbek,  $E_x = \sum_{k=1}^N x_k^2$  – całkowita energia sygnału.



Rys. 4. Implementacji kryterium energetycznego (EC) w języku G



Rys. 5. Ilustracja sposobu wyznaczania początku sygnału przy użyciu kryteriów AIC i EC

Na podstawie znajomości współrzędnych przetworników oraz położenia defektu generującego impulsy EA obliczono, traktując każdą jako trójwymiarowy układ kartezjański, odległości pomiędzy przetwornikami a defektem:

$$|DP_i| = \sqrt{(x_D - x_P)^2 + (y_D - y_P)^2 + (z_D - z_P)^2} \quad (3)$$

gdzie:  $|DP_i|$  – długość odcinka między defektem ( $D$ ) a przetwornikiem ( $P_i$ ),  $x_D$  – współrzędna defektu ( $x$ ,  $y$  lub  $z$ ),  $x_P$  – współrzędna przetwornika ( $x$ ,  $y$  lub  $z$ ).

Znając odległości  $DP_i$  stanowiące najkrótsze drogi geometryczne dla fali akustycznej (w rzeczywistości przetwornik najpierw rejestruje sygnał propagujący się po najkrótszej drodze akustycznej) oraz przyjęciu, że fala EA rozchodzi się z prędkością 1315 m/s, wyznaczono teoretyczne opóźnienia czasowe rejestrowanych sygnałów. W tabeli 1 zestawiono odległości przetworników od defektu oraz wartości spodziewanych opóźnień czasowych względem przetwornika  $P_3$  znajdującego się najbliżej defektu, które uzyskano na drodze obliczeń analitycznych.

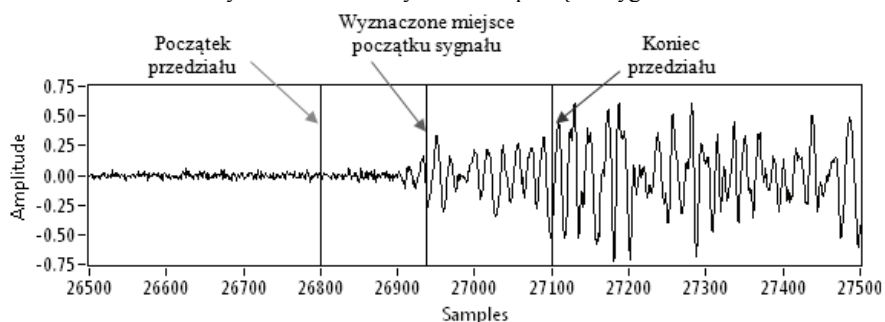
Tabela 1. Odległości przetworników od defektu oraz uzyskane na drodze obliczeń analitycznych wartości spodziewanych opóźnień czasowych względem przetwornika  $P_3$ , który znajdował się najbliżej defektu (źródła sygnałów)

Odległości od defektu [mm]				Opóźnienia czasowe [s]		
$ DP_0 $	$ DP_1 $	$ DP_2 $	$ DP_3 $	$T'_{S30}$	$T'_{S31}$	$T'_{S32}$
196,6	395,6	406,8	175,8	0,0000158	0,0001671	0,0001756

Głównym celem pracy było zbadanie wpływu przyjętego kryterium estymacji początku sygnału oraz zastosowanego algorytmu na dokładność lokalizacji źródła wnz. Oprócz kryteriów automatycznych (AIC, EC) stosowano także manualne, a więc całkowicie subiektywne, ustalanie początku sygnału (rys. 6).



Rys. 6. Manualne wyznaczenie początku sygnału



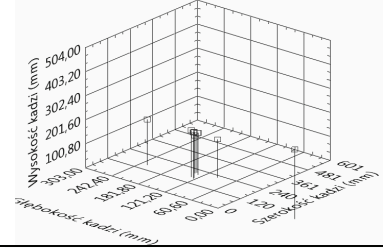
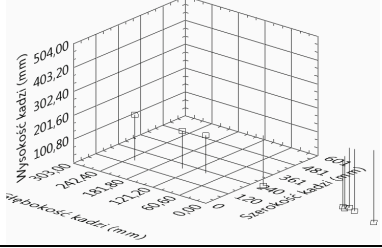
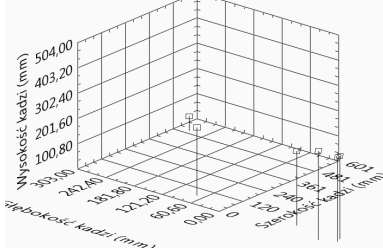
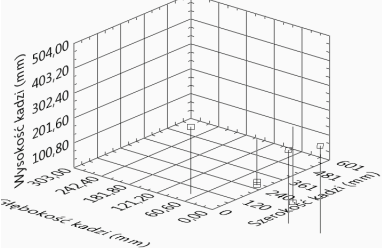
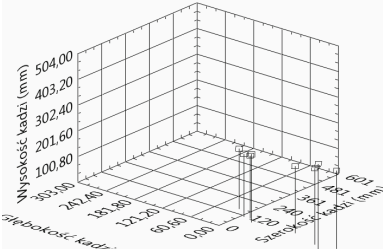
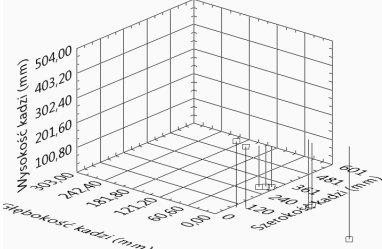
Rys. 7. Sposób ustalania przedziału, w którym szukany jest początek sygnału w oparciu o kryterium AIC lub EC

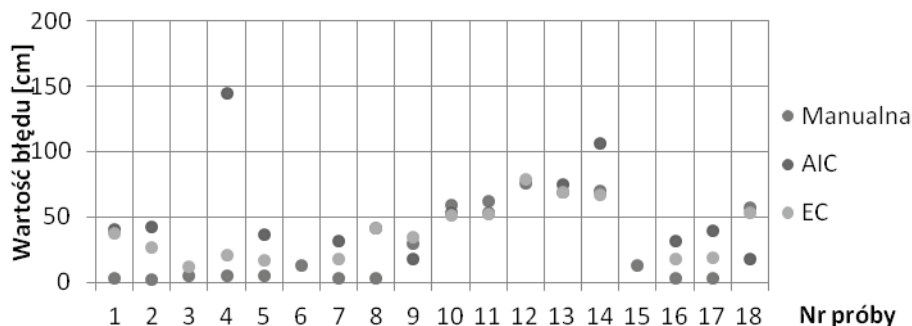
W przypadku kryterium AIC oraz EC, aby zwiększyć skuteczność rozpoznawania początku sygnału, należało dodatkowo zdefiniować przedział sygnału, w którym zawierały się zarówno próbki tła akustycznego (szum) jak i początkowe próbki impulsu wyładowania niepełnego (rys. 7).

### 3.2. Wyniki pomiarów

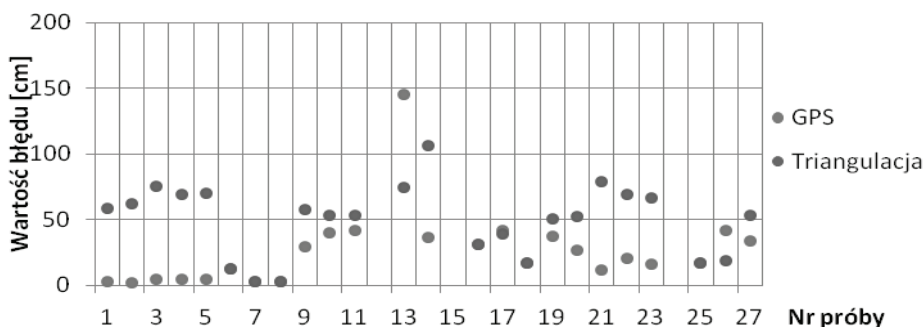
W tabeli 2 zestawiono zilustrowane graficznie wyniki lokalizacji źródeł wnz w zależności od przyjętego kryterium estymacji początku sygnału i zastosowanej techniki (triangulacyjna i GPS), natomiast na rysunkach 8 i 9 przedstawiono analizę błędów lokalizacji defektu.

Tabela 2. Graficzna prezentacja wyników lokalizacji, w zależności od przyjętego kryterium estymacji początku sygnału i zastosowanej techniki

	Zmodyfikowana technika triangulacyjna (wykorzystująca pseudoczas)	Klasyczna technika triangulacyjna
Wyznaczanie manualne		
Kryterium Akaike		
Kryterium energetyczne		



Rys. 8. Analiza błędów lokalizacji (w cm) źródła wnz w zależności od zastosowanego kryterium oceny początku sygnału



Rys. 9. Analiza błędów lokalizacji (w cm) źródła wnz w zależności od zastosowanej techniki

#### 4. WNIOSKI

Automatyczne mechanizmy wyznaczania miejsca nadejścia sygnału EA wykazały się akceptowalną dokładnością. Wyższą dokładnością charakteryzowało się kryterium EC ze średnim błędem ustalania współrzędnych wynoszącym 38,3cm. W przypadku kryterium EIC błąd ten wynosił 52,1cm. Należy zauważyć, iż w przypadku wyznaczania początku sygnału przez kryteria automatyczne występują pomiary, dla których obliczenie współrzędnych defektu nie było możliwe. Z przeprowadzanych badań wynika, że wciąż najbardziej dokładnym kryterium estymacji początku sygnału EA jest jego manualne wyznaczenie, gdzie wartość błędu w większości pomiarów nie przekraczała 30cm.

Z dwóch zastosowanych metod lokalizacji źródeł wyładowań niezupełnych zauważalnie wyższą dokładnością cechowała się metoda triangulacyjna oparta na *pseudoczasach* zaczerpniętych z techniki GPS. Wykorzystanie algorytmu, znanego z systemu pozycjonowania, skutkuje niemal dwukrotnie dokładniejszymi



wynikami lokalizacji. Średnia wartość błędu dla tej metody wyniosła 26,2 cm, a w przypadku standardowej techniki triangulacji 49,8cm.

Na uwagę zasługuje tu jednocześnie zastosowanie manualnego wyznaczania początku sygnału i metody „GPS”, dla których średnia wartość błędu lokalizacji wyniosła tylko 7,6 cm.

## LITERATURA

- [1] Florkowska B., *Mechanizmy, pomiary i analiza wylądowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Wydawnictwo IPPT PAN, Warszawa, 2001.
- [2] Malewski R. i in., *Transformatory w eksploatacji*, Wydawnictwo Energo-Complex, Chorzów, 2005.
- [3] Markalous S. M., *Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signal*, Rozprawa doktorska, University of Stuttgart, 2006.
- [4] Sikorski W. i in., *Location of partial discharge sources in power transformers based on advanced auscultatory technique*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, December 2012.
- [5] Szczepański Z., *Wylądowania niezupełne w izolacji urządzeń elektrycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1973.
- [6] Szpor S., *Wytrzymałość elektryczna i technika izolacyjna*, Państwowe Zakłady Wydawnictw Szkolnych, Warszawa, 1951.
- [7] Witos F., *Badania wylądowań niezupełnych metodą emisji akustycznej i metodą elektryczną*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2008.
- [8] Skubis J., *Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, 1998.
- [9] Sikorski W. (pod red.), *Acoustic Emission*, InTECH Publishing, ISBN 978-953-51-0056-0, 2012.

## COMPUTER AIDED LOCATION OF PD SOURCES IN POWER TRANSFORMERS

In this paper the phenomenon of partial discharges, standard auscultatory and triangulation methods of PD sources localization were shortly explained. The main part of paper contains results of research conducted on a power transformer tank model in the high voltage laboratory of Poznan University of Technology. A triangulation method with its extension using the GPS technique was used in the experiment. In order to improve signal processing an advanced program was written in the LabVIEW environment. The measurement system and the method of time of arrival estimation (TOA) were described. For every method used in the survey, waveforms with marked beginnings of the AE signals and error graphs were shown. On the basis of the results an evaluation of accuracy of each methods was prepared.