

Franciszek Witos<sup>1</sup>, Zbigniew Gacek<sup>2</sup>, Edward Siwy<sup>2</sup>, Henryk Kaźmierczak<sup>2</sup>

## ANALIZA SYGNAŁÓW EMISJI AKUSTYCZNEJ GENEROWANYCH PRZEZ ZAMODELOWANE ŹRÓDŁA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono metodę emisji akustycznej (EA) polegającą na rejestracji sygnałów EA w sytuacjach pomiarowych, kiedy modelowano różne źródła wyładowań niezupełnych (wnz). Dla tak zarejestrowanych sygnałów zbudowano akustyczne obrazy wnz związane z konkretnymi sytuacjami pomiarowymi. Na podstawie rozkładów amplitudowych sygnałów EA, będących elementem zbudowanych obrazów akustycznych, zdefiniowano deskryptory EA (akronimy ADC i ADP) oraz przygotowano dane uczące dla sieci neuronowej Kohonena. Wykazano istnienie korelacji pomiędzy deskryptorami ADC i ADP a ładunkiem elektrycznym pozornym charakteryzującym źródło. Pokazano związek pomiędzy wynikami klasyfikacji i testowania obiektów przez sieć Kohonena a wartościami ładunku pozornego wprowadzanego przez źródła wnz.

**Słowa kluczowe:** emisja akustyczna, wyładowania niezupełne, deskryptory, ładunek elektryczny pozorny, sieć neuronowa Kohonena

### 1. Wstęp

Emisja akustyczna (EA) daje unikalne możliwości obserwacji procesów deformacyjnych [3,4]. Jej podstawowe ograniczenia (typowe dla metod akustycznych) powodowane zmianami fal sprężystych EA (emitowanych przez źródło wnz w trakcie propagacji w ośrodku, detekcji i obróbki zarejestrowanego sygnału) mogą zostać wyeliminowane poprzez dobór odpowiednich deskryptorów [9]. Takie podejście powoduje, że EA wykazuje wystarczające cechy, aby stać się wiarygodną uzupełniającą metodą pomiarową stosowaną podczas eksploatacji wysokonapięciowych układów izolacyjnych.

### 2. Układ pomiarowy i metodyka badań oraz wyniki pomiarów

W przeprowadzonych badaniach stosowano układ pomiarowo-badawczy emisji akustycznej DEMA-COMP [6]. Układ ten stwarza zaawansowane możliwości

<sup>1</sup> Instytut Fizyki Politechniki

<sup>2</sup> Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechnika Śląska 44-100 Gliwice, ul. B. Krzywoustego 2

pomiarowo-badawcze zapewniając rejestrację sygnałów EA w czasie rzeczywistym w paśmie do 2,5 MHz, w każdym z czterech torów pomiarowych, a następnie obróbkę zarejestrowanych danych w celu stworzenia dowolnych deskryptorów EA.

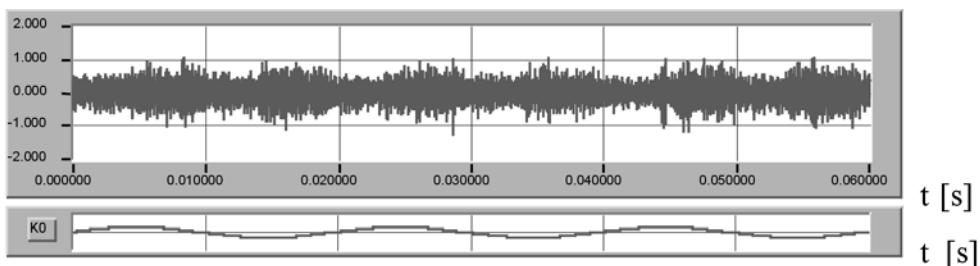
Badania prowadzono w Laboratorium Wysokich Napięć ZTS IZO-ERG w Gliwicach na stanowisku pomiarowym, którego elementem była kadź z zamontowanym przepustem kondensatorowym. W kadzi modelowano źródła wnz i stosowano różne zakończenia przepustu umieszczone w oleju: A - zakończenie zawierające gwint, B - zakończenie zawierające ostrze, C – zakończenie bez dodatkowych elementów.

W wybranych punktach pomiarowych montowano czujniki EA typu R6 firmy PAC. Do przepustu przykładano napięcia zasilające o wybranych wartościach. Rejestrowano impulsy EA oraz mierzono wartość ładunku elektrycznego pozornego (miernikiem ERA firmy F.C.Robinson). Po zakończeniu serii badań obiekt demontowano i powtarzano procedurę dla kolejnego rodzaju zakończenia przepustu.

W dalszych rozważaniach analizuje się impulsy EA zarejestrowane w jednym torze pomiarowym. Określając je parametry można podzielić na:

1. Parametry wspólne dla wszystkich impulsów obejmujące: a/ parametry toru pomiarowego (tor K2: czujnik EA R6#2, przedwzmacniacz różnicowy B, DEMA posiadająca wzmocnienie 40 dB); b/ parametry rejestracji (częstość próbkowania 1MHz, czas rzeczywisty rejestrowanych fragmentów 2 sekundy);
2. Parametry indywidualne dla każdego impulsu obejmujące: a/ typ źródła wnz A, B, lub C; b/ ładunek pozorny jaki posiada działające źródło (w pC); c/ napięcie zasilania przyłożone do przepustu.

Przykładowy fragment zarejestrowanego impulsu EA o długości 60 milisekund (trzy okresy napięcia zasilającego) jest przedstawiony na rys. 1. Widoczny jest losowy i periodyczny charakter impulsów EA.

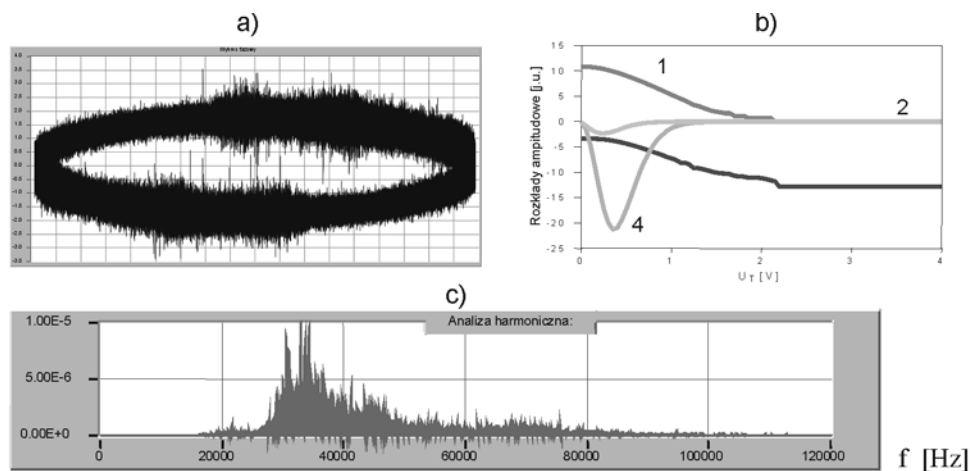


Rys. 1. Fragment zarejestrowanego impulsu EA (C, 890 pC, 123 kV) oraz napięcie odniesienia

### 3. Akustyczny obraz zarejestrowanych impulsów EA

Opracowano zasady obróbki danych w dziedzinach czasu, częstotliwości i progu dyskryminacji. Stworzyło to możliwość zbudowania akustycznego obrazu zarejestrowanego zjawiska (wnz) na podstawie charakterystyk fazowych i częstotliwościowych oraz rozkładów amplitudowych sygnałów EA. Przykładowy obraz akustyczny zarejestrowanego zjawiska wnz jest przedstawiony na rys.2. Impulsy EA są generowane dwukrotnie w okresie napięcia zasilającego, wykazują dominujące pasmo w dziedzinie częstotliwości 30-50 kHz oraz indywidualny „wzorzec” określony przez wybrane rozkłady amplitudowe. Charakterystyki amplitudowe są prze-

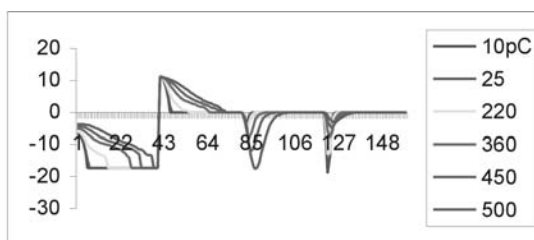
skalowane tak, aby mogły być rozróżnialne na jednym rysunku. Dla lepszego rozróżnienia procesów deformacyjnych na wykresach rozkładów amplitudowych tempa zliczeń i mocy sygnału EA zastosowano skalę logarytmiczną. Daje to wyróżnienie pojedynczych procesów w postaci liniowych fragmentów na wykresach tych rozkładów amplitudowych.



**Rys. 2.** Obraz akustyczny zarejestrowanego wnz ( $C, 890 \text{ pC}, 123 \text{ kV}$ ), a – charakterystyka fazowa, b – rozkłady amplitudowe: 1 –  $\ln(dN/dt)$ , 2 –  $\ln P$ , 3 –  $d(dN/dt)/dU_i \cdot (50000)^{-1}$ , 4 –  $dP/dU_i \cdot 300$ , c – charakterystyka częstotliwościowa

#### 4. Rozkłady amplitudowe impulsów EA

Na rysunku 3 przedstawione są rozkłady amplitudowe impulsów EA uzyskane w przypadku dla źródła wnz typu C i różnych wartości napięcia zasilającego. Na jednym rysunku przedstawiono cztery rodziny rozkładów amplitudowych. Zmienną niezależną są cechy wybrane do analizy z użyciem sieci Kohonena. Każdy z przedziałów wartości cech: [1,40], [41,80], [81,120], [121,160] odpowiada przedziałowi wartości progu dyskryminacji [0,4] V. Skala przeliczenia jest liniowa, a wartości pochodnych rozkładów amplitudowych tempa zliczeń i mocy sygnału są przeskalowane. Przeskalowanie jest wspólne dla wszystkich typów badanych źródeł wnz, dzięki czemu zachowano relacje fizyczne pomiędzy analizowanymi impulsami.



**Rys. 3.** Rozkłady amplitudowe impulsów EA zarejestrowanych dla zamodelowanego źródła wnz typu A (opisy w tekście)

Takie charakterystyki obliczone dla wszystkich rodzajów źródeł wnz są bazą do dalszych analiz wykonanych metodą „pattern recognition” (patrz 5) i z zastosowaniem sieci neuronowej Kohonena (patrz 6 pracy).

Analizowana sytuacja pomiarowa zakłada wielokrotnie instalowanie czujnika EA iżródeł wnz przy założeniu, że ich lokalizacja w tych pomiarach jest stała. Taka sytuacja ma istotne znaczenie praktyczne.

## 5. Deskryptory ADC i ADP oraz ich związek z ładunkiem pozornym

Autorzy poszukiwali korelacji między ładunkiem elektrycznym pozornym a właściwościami zarejestrowanych impulsów EA. Ładunek pozorny odnosi się bezpośrednio do źródła wnz, natomiast deskryptory EA opisują zarejestrowane impulsy EA, które zmieniają się w trakcie propagacji, rejestracji i obróbki [6]. Aby uzyskać pełną postać poszukiwanej korelacji należałoby odtworzyć sygnał generowany przez źródło z zarejestrowanego impulsu, czyli znaleźć deskryptor EA nie obciążony ograniczeniami zjawiska fizycznego i metody pomiarowej EA. Jest to zagadnienie bardzo złożone.

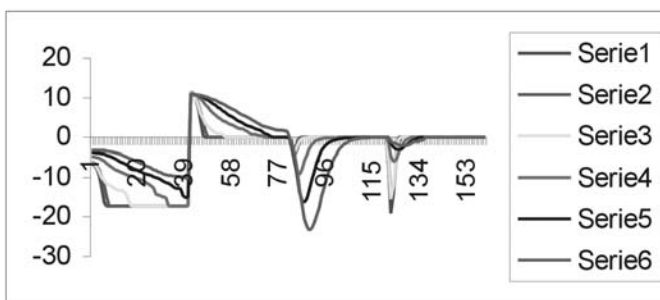
Dla rozpatrywanej sytuacji pomiarowej (p.4) znaleziono deskryptory (o akronimach ADC i ADP) kierując się prawidłowościami kształtów rozkładów amplitudowych tempa zliczeń EA i mocy sygnałów EA. Wartości deskryptorów wyznaczano w następujący sposób. Minimum pochodnej rozkładu amplitudowego (tempa/mocy) definiuje wartość progu dyskryminacji  $U_{T+}$ . Dla wartości progu dyskryminacji większych od  $U_{T+}$  rozkład amplitudowy (tempa/mocy) jest aproksymowany linią prostą. Współczynnik kierunkowy tej prostej jest jednocześnie wartością deskryptora ADC. Wartości obliczonych w ten sposób deskryptorów ADC i ADP dla zamodelowanych źródeł wnz typu A, B i C są przedstawione w tabeli 1. Widoczna jest korelacja między deskryptorami a ładunkiem elektrycznym pozornym odpowiadających źródełom wnz w ramach następujących grup: [0,100], [180, 220], [360, 500] i [890, 1000] pC

## 6. Analiza impulsów EA z zastosowanie sieci Kohonena

Danymi uczącymi są obiekty o 160 cechach, będące obrazami rozkładów amplitudowych sygnałów EA, pochodzących od źródeł typu A, B i C. Postać neuronów zwycięskich oraz wyniki klasyfikacji obiektów uczących sieć Kohonena są przedstawione na rys. 4 i w tabeli 2. Istotnym jest fakt, że sieć zbudowała neurony zwycięskie, zawierające jednocześnie krzywe na podstawie których definiowano deskryptory ADC i ADP (patrz rys. 3 i 4). Z porównania wyników klasyfikacji wykonanej przez sieć z ładunkami elektrycznymi pozornymi wynika podział obiektów na cztery grupy:

- obiekty określane poprzez ładunek pozorny o wartościach z przedziału [0,100] pC,
- obiekty określane poprzez ładunek pozorny o wartościach 180,220 pC,
- obiekty określane poprzez ładunek pozorny o wartościach z przedziału [360,500] pC,
- obiekty określane poprzez ładunek pozorny o wartościach 890, 1000 pC.

Dodatkowo wykonano testowanie sieci wprowadzając dane pochodzące od źródła typu C\*, tj. źródła typu C dodatkowo zamkniętego w elemencie izolacyjnym. Wyniki klasyfikacji takich obiektów są przedstawione w tabeli 3. Są one zgodne z powyżej określonymi grupami.



**Rys. 4.** Wykresy wag neuronów zwyciężkich dla sieci Kohonena zbudowanej na obiektach pochodzących od źródeł wnz typu A, B, C

**Tab.1.** Wartości deskrytorów ADC i ADP

Lp	q [pC]	ADC [j.u.]	R+	ADP [j.u.]	R+	źródło
1	0	-28.0	0.977	-23.9	0.965	B
2	0	-26.6	0.974	-26.2	0.991	B
3	<10	-27.9	0.968	-23.6	0.987	C
4	<10	-27.4	0.952	-21.7	0.993	C
5	10	-27.9	0.962	-31.5	0.962	A
6	25	-23.9	0.986	-23.9	0.992	A
7	50	-19.6	0.995	-17.2	0.997	C
8	89	-22.5	0.966	-20.2	0.976	C
9	100	-24.6	0.974	-26.5	0.985	B
10	180	-10.7	0.893	-4.7	0.836	B
11	220	-11.8	0.972	-5.9	0.932	A
12	220	-10.3	0.966	-4.9	0.975	C
13	360	-4.4	0.932	-3.2	0.967	A
14	450	-3.8	0.994	-2.9	0.988	A
15	500	-3.7	0.966	-3.1	0.996	A
16	890	-2.8	0.964	-2.2	0.994	C
17	1000	-3.5	0.984	-2.6	0.994	C
18	1000	-2.7	0.989	-2.2	0.988	C
19	1000	-3.3	0.991	-2.6	0.981	C

**Tab.2.** Wyniki klasyfikacji obiektów pochodzących od źródeł wnz typu A, B, C wykonanej przez sieć Kohonena o neuronach z rys. 4

Lp	q [pC]	S.1	S.2	S.3	S.4	S.5	S.6	Źródło
1	0	1						B
2	0	1						B
3	<10	1						C
4	<10	1						C
5	10	1						A
6	25	1						A
7	50		1					C
8	89		1					C
9	100	1						B
10	180			1				B
11	220			1				A
12	220			1				C
13	360				1			A
14	450				1			A
15	500				1			A
16	890						1	C
17	1000					1		C
18	1000						1	C
19	1000						1	C

**Tab. 3.** Wyniki testowania sieci o neuronach z rys.4 obiektami pochodzącymi od źródła typu C\*

Lp	q [pC]	S.1	S.2	S.3	S.4	S.5	S.6	źródło
1	0	1						C*
2	140		1					C*
3	500				1			C*
4	890						1	C*
5	1000						1	C*

## 7. Podsumowanie

Rozkłady amplitudowe sygnałów emisji akustycznej (EA), przygotowane w sposób umożliwiający analizę ich kształtów, stanowią bazę do szczegółowej analizy własności sygnałów EA.

Dla sprecyzowanych sytuacji pomiarowych, w trakcie których modelowano różne źródła wyladowań niepełnych (wnz), przeprowadzono analizę „metodą pattern recognition” oraz w oparciu o sieci neuronowe. W obu przypadkach wyniki analizy wykazują istnienie korelacji pomiędzy ładunkiem elektrycznym pozornym wprowadzonym przez źródło wnz a odpowiednim parametrem charakteryzującym stosowaną metodę analizy. W rozpatrywanych przypadkach są to odpowiednio deskryptory EA (o akronimach ADC i ADP) oraz wyniki klasyfikacji obiektów przez sieć neuronową Kohonena. Znalezione korelacje są prawdziwe dla sytuacji pomiarowych ogólnie zdefiniowanych poprzez następujące warunki: wielokrotnie instalowanie czujnika EA i źródeł wnz, stałą lokalizację czujnika EA i źródła wnz. Analiza tego zagadnienia w innych sytuacjach pomiarowych będzie przedmiotem dalszych badań.

Praca została wykonana w ramach grantu KBN 8T10C 034 16

## Literatura

- [1] **Cesari S., Hantouche C., Muraoka T., Pouliquen B.:** *PD measurements as a diagnostic tool*, ELECTRA, No.181 DECEMBER 1998, 25-51.
- [2] **Florkowska B.:** *Wyladowania niepełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia - analiza mechanizmów, form i obrazów*, IPPT PAN, Warszawa, 1997.
- [3] *Emisja Akustyczna - źródła, metody, zastosowania*, IPPT PAN Warszawa, 1994.
- [4] **Skubis J.:** *Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych*, IPPT PAN Warszawa 1993.
- [5] **Witos F., Opilski Z., Gacek Z., Maźniewski K.:** *Comparative investigations on PD generated in a model source*, 2nd Int. Conf. on Dielectric & Insulation, High Tatra 2000, 126-131.
- [6] **Malecki I., Witos F.,** *AE source parameters in coal samples*, Acustica 79(1993), 112-116.

- [7] **Giordano M., Condelli L., Nicolais L.:** *AE wave propagation in a viscoelastic plate*, Composites Science and Technology 59(1999), 1735-1743.
- [8] **Jemielniak K.:** *Some aspects of AE signal pre-processing*, J.Material Processing Technology, 09 (2001), 242-247.
- [9] **Witos F., Gacek Z., Opilski A.:** *The new AE descriptors for modelled sources of PD*, Archives of Acoustics (w druku).

## AN ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS GENERATED BY MODELLED SOURCES OF PARTIAL DISCHARGES

The AE method consisting in registration of AE signals for different modelled PD sources is presented. PD acoustic pictures connected with analysed measuring situations have been created. Based on amplitude distributions, as elements of the acoustic picture, AE descriptors (ADC and ADP) have been defined and learning data for the Kohonen neural network have been also prepared. Correlation between ADC and ADP descriptors and electric apparent charge value of the functioning PD source has proved. Additionally connections between classification and test results obtained using Kohonen neural network and apparent charge value of the different PD sources are presented.