

PRZEGLĄD DESKRYPTORÓW AKUSTYCZNYCH W DZIEDZINIE CZASU UMOŻLIWIAJĄCYCH OCENĘ WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Barbara KUCHARSKA

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki,
ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: kubar@po.opole.pl

Streszczenie

W artykule scharakteryzowano podstawowe deskryptory emisji akustycznej w dziedzinie czasu. Przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów wybranych deskryptorów EA. Oceniono przydatność poszczególnych parametrów do opisu zjawiska wyładowań niezupełnych.

Słowa kluczowe: deskryptory, emisja akustyczna, wyładowania niezupełne.

REVIEW OF ACOUSTIC DESCRIPTORS IN THE DOMAIN OF THE ALLOWING EVALUATION OF PARTIAL DISCHARGE

Summary

In the paper basic acoustic descriptors in the domain of time were characterized. Examples of the measurements of different descriptors were presented. Usefulness of particular parameters for the analysis of partial discharges was estimated.

Keywords: descriptors, acoustic emission, partial discharge.

1. WSTĘP

Jedną z podstawowych przyczyn przyspieszonej degradacji izolacji urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia (np. transformatorów dużej mocy) są wyładowania niezupełne (WNZ) [5]. Ich ocenę umożliwiają trzy metody: elektryczna, chromatografii gazowej i emisji akustycznej (EA). Pierwsza z metod, ze względu na duży wpływ zakłóceń elektromagnetycznych nie może być stosowana podczas normalnej eksploatacji urządzenia. Z kolei poważnym problemem w metodzie chromatografii gazowej jest możliwość zafałszowania wyników pomiarów podczas pobierania i transportu próbek oleju. Detekcję, pomiar i lokalizację wyładowań niezupełnych podczas normalnej pracy urządzenia umożliwia metoda emisji akustycznej [5, 6]. W porównaniu z pozostałymi metodami jest mało wrażliwa na zakłócenia a aparatura pomiarowa jest stosunkowo prosta i dostępna [5]. Techniczne zastosowanie metody EA datuje się od początku lat osiemdziesiątych. Obecnie jest ona szeroko stosowana w transformatorach, przekładnikach wysokiego napięcia, kondensatorach energetycznych oraz w rozdzielnicach z SF₆. Dla transformatorów o mocach powyżej 250 MVA ocena wyładowań niezupełnych metodą EA jest obligatoryjna.

Prace prowadzone nad metodą EA skupiają się między innymi na doskonaleniu techniki pomiarowej oraz na doborze wskaźników

(deskryptorów), które najlepiej charakteryzowałyby szkodliwość mierzonych WNZ [1, 2, 3].

W technice izolacyjnej przydatność różnych deskryptorów do oceny WNZ określa ich związek ze stopniem degradacji izolacji [5]. W wielu pracach dotyczących tej problematyki przyjmuje się, że wielkością najlepiej charakteryzującą mierzone WNZ jest największa amplituda zdarzenia akustycznego lub ciągu zdarzeń, która decyduje o szkodliwości wyładowań. Jednak takie podejście powoduje, że traci się wiele informacji przenoszonych przez sygnał akustyczny. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie innych wskaźników, możliwych do zastosowania w opisie impulsów emisji akustycznej pochodzących od WNZ.

2. DESKRYPTORY EMISJI AKUSTYCZNEJ

W pracy [4] wprowadzono rozróżnienie między sygnałem emisji akustycznej (EA) a impulsem EA. Przez sygnał EA rozumie się wielkość występującą w źródle emisji. Pod pojęciem impulsu emisji rozumie się wielkość rejestrowaną w punkcie odbioru. Związek między sygnałem a impulsem emisji jest określony przez funkcję przejścia. Tylko w prostych układach fizycznych, w których charakterystyki częstotliwościowe wszystkich elementów między źródłem EA a przetwornikiem są płaskie, sygnały i impulsy EA nie różnią się jakościowo. Wymaganie to spełnione jest rzadko, głównie ze względu na rezonansowe własności

ośrodków. W dielektrykach i układach izolacyjnych, rozróżnienie między sygnałem EA w punkcie generacji WNZ, a impulsem w punkcie odbioru jest istotne, gdyż przestrzeń propagacji sygnałów charakteryzuje się własnościami rezonansowymi. Zjawisko komplikuje się tym bardziej, im bardziej złożony jest układ izolacyjny i geometria mierzonego obiektu [6].

Podstawowe wielkości charakteryzujące impuls EA można podzielić na dwie grupy:

- deskryptory w dziedzinie czasu,
- deskryptory w dziedzinie częstotliwości.

W niniejszej pracy przedstawione zostaną deskryptory z pierwszej grupy.

2.1. Deskryptory emisji akustycznej w dziedzinie czasu

W dziedzinie czasu podstawowymi deskryptorami impulsów EA są pochodne przebiegów czasowych (rys.1):

- amplituda maksymalna A_{max} ,
- czas narastania T_1 ,
- czas trwania T_2 .

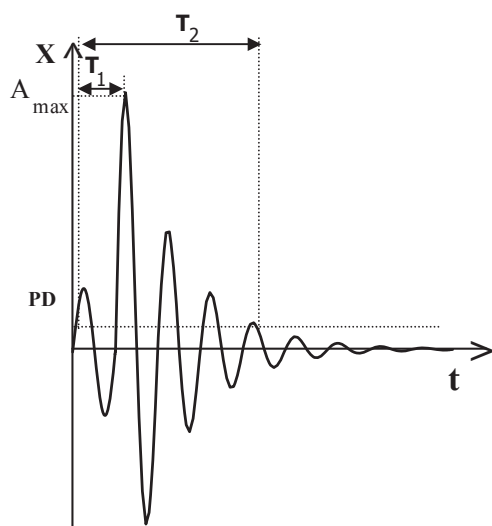
Inne znaczące parametry impulsu to pochodne energii:

- RMS amplitudy A_{rms} ,
- współczynnik szczytowy amplitudy $W\{x(t)\}$:

$$W\{x(t)\} = \frac{A_{max}}{A_{rms}} \quad (1)$$

- energia impulsu E :

$$E = \int_0^T x^2(t) dt \quad (2)$$



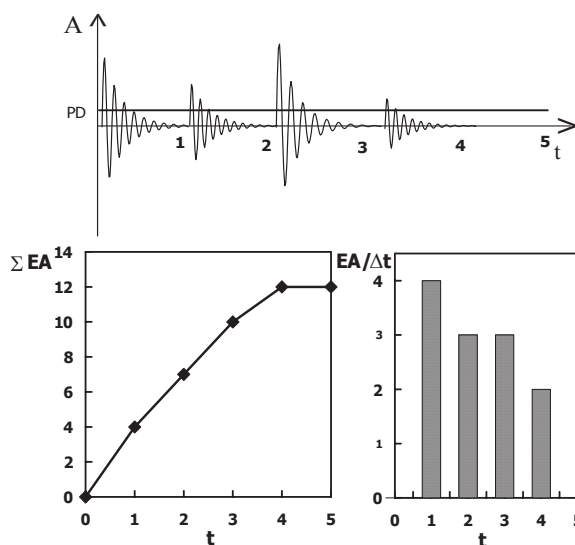
Rys. 1. Przebieg impulsu EA w funkcji czasu i jego parametry. Proóg dyskryminacji PD, amplituda maksymalna A_{max} , czas narastania T_1 , czas trwania impulsu T_2

Do grupy podstawowych deskryptorów EA należą również pochodne zmian w czasie:

- suma zliczeń amplitud EA, przekraczających przyjęty próg dyskryminacji impulsów (ΣEA),
- tempo zliczeń amplitud EA, przekraczających przyjęty próg dyskryminacji impulsów, w jednostkowym czasie pomiaru ($EA/\Delta t$),
- suma zdarzeń akustycznych, przekraczających przyjęty próg dyskryminacji zdarzeń (ΣN),
- tempo zdarzeń akustycznych, przekraczających przyjęty próg dyskryminacji ($N/\Delta t$).

Na rys. 2 i 3 przedstawiono poglądowo sposób określania ΣEA , $EA/\Delta t$, ΣN i $N/\Delta t$.

Deskryptory przedstawione na rys. 2 i 3 zależą od przyjętego progu dyskryminacji Upd . Wartość progu dyskryminacji zależy od warunków metrologicznych, zakłóceń zewnętrznych i stosowanej aparatury pomiarowej.



Rys. 2. Poglądowe przedstawienie sposobu określania sumy i tempa zliczeń EA

Wielokrotne pomiary powyższych deskryptorów, dla rosnących progów dyskryminacji Upd , prowadzą do nowych parametrów, będących rozkładami amplitudowymi mierzonych wielkości. Można w ten sposób określić:

- rozkład amplitudowy sumy zliczeń:

$$\Delta(\Sigma EA) = \{f_i = \Sigma EA(U_{pdi+1}) - \Sigma EA(U_{pdi}); i = 1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

- rozkład amplitudowy tempa zliczeń:

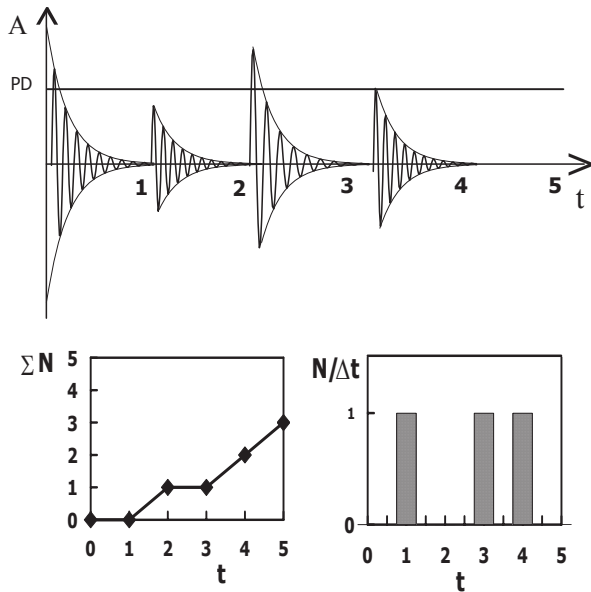
$$\Delta(EA / \Delta t) = \{f_i = EA / \Delta t(U_{pdi+1}) - EA / \Delta t(U_{pdi}); i = 1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

- rozkład amplitudowy sumy zdarzeń ΣN :

$$\Delta(\Sigma N) = \{f_i = \Sigma N(U_{pdi+1}) - \Sigma N(U_{pdi}); i = 1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

- rozkład amplitudowy tempa zdarzeń $N/\Delta t$:

$$\Delta(N / \Delta t) = \{f_i = N / \Delta t(U_{pdi+1}) - N / \Delta t(U_{pdi}); i = 1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$



Rys. 3. Poglądowe przedstawienie sposobu określania sumy i tempa zdarzeń akustycznych

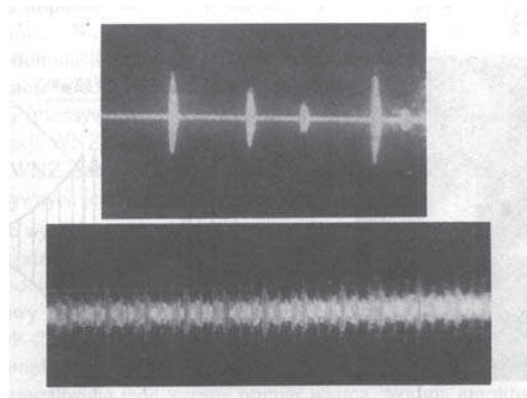
Scharakteryzowane powyżej deskryptory impulsów EA, zależnie od warunków pomiarowych i charakteru mierzonego zjawiska mogą być przedstawiane jako funkcje siły, ciśnienia, temperatury, napięcia elektrycznego lub innej wielkości fizycznej. Przez przetworzenie impulsów EA można uzyskać tak zwane "zaawansowane deskryptory EA" [4]. Zaawansowane deskryptory EA opisują albo własności impulsów charakterystyczne dla zastosowania EA, bądź opisują źródło EA. Pod względem zastosowania deskryptorów opisujących zagadnienie ilościowo, można zjawiska związane z zastosowaniem EA podzielić na następujące grupy :

- monitorowanie i testowanie urządzeń lub materiałów (badanie ma na celu porównanie bieżących danych pomiarowych z danymi przyjętymi za wzorcowe, przy czym konieczne jest przyjęcie wartości krytycznych określonego deskryptora),
- przewidywanie czasu życia materiałów i urządzeń (konieczna jest znajomość modelu niszczenia badanego materiału i odpowiedni dobór deskryptora),
- rozróżnianie źródeł EA (w przypadku występowania wielu źródeł EA, konieczne jest badanie kompleksowe kształtu impulsów tzw. „pattern recognition”, umożliwiające identyfikację źródeł) [7].

3. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW DESKRYPTORÓW AKUSTYCZNYCH

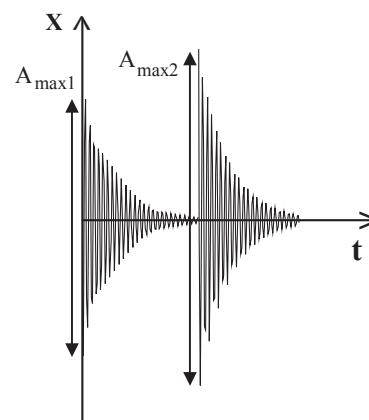
3.1. Maksymalna amplituda sygnałów

Podstawowe znaczenie w pomiarach WNZ metodą EA ma maksymalna amplituda sygnału akustycznego pochodzącego od wyładowań. Wynika to z bezpośredniego związku tego deskryptora ze stanem fizycznym dielektryka oraz łatwości pomiaru. Jako maksymalną amplitudę sygnału EA przyjmuje się największą amplitudę pojedynczego impulsu (rys. 1) lub ciągu impulsów (rys. 5).



Rys. 4. Oscylogramy WNZ: a) sporadycznych, o dużych amplitudach i małej energii b) ciągłych, o małych amplitudach i dużej energii [5]

Znaczenie maksymalnej amplitudy polega na jej fizycznej korelacji z zagrożeniem układu izolacyjnego w przypadku WNZ o dużej intensywności. W pracy [5] stwierdzono bezpośredni związek maksymalnej amplitudy z ładunkiem pozornym Q_p wyładowań. Deskryptor A_{max} nadaje się przede wszystkim do charakterystyki WNZ o dużych amplitudach.

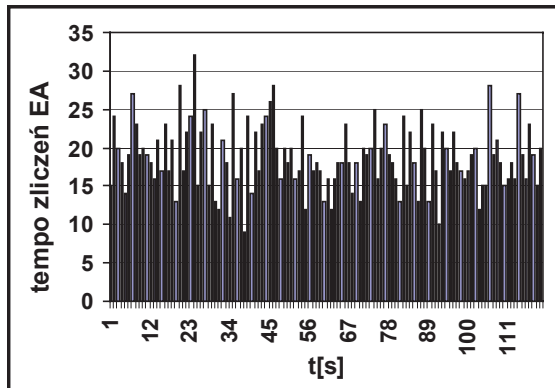


Rys. 5. Sposób określania maksymalnej amplitudy ciągu impulsów od WNZ

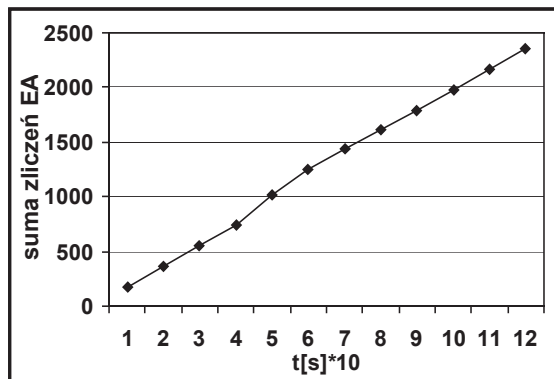
3.2. Tempo i suma zliczeń emisji akustycznej

Przykładowe przebiegi tempa zliczeń i sumy zliczeń amplitud EA obrazuje rys.6. Do generacji WNZ wykonano układ modelowy, w którym uzyskiwano wyładowania powierzchniowe. Impulsy EA emitowane przez wyładowania tego typu odbierano hydrofonem firmy Brüel-Kjear. Były one wzmacniane, a następnie przekazywane do analizatora Dema 100 i wizualizowane a następnie rejestrowane przy użyciu komputera.

a)



b)



Rys. 6. Tempo (a) i suma (b) zliczeń EA generowanych przez powierzchniowe WNZ, $U=20$ kV (71,4% Up)

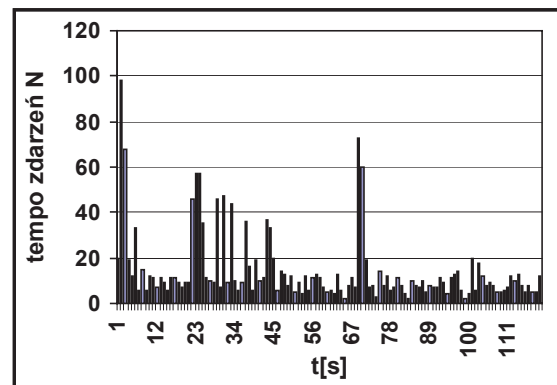
Oba deskryptory są uzależnione od napięcia generacji WNZ. Wadą obu tych deskryptorów jest to, że nie są związane bezpośrednio ani z energią, ani z częstotliwością sygnału. Są natomiast silnie uzależnione od przyjętego progu dyskryminacji. Stąd wielkości te są przydatne przede wszystkim do opisu dynamiki zjawiska WNZ, bądź do oceny porównawczej wyładowań występujących w danym obiekcie.

3.3. Tempo i suma zdarzeń emisji akustycznej

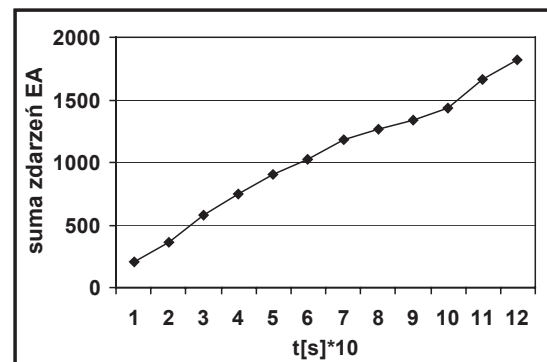
Do pomiarów tempa i sumy zdarzeń EA wykorzystano układ Dema 100. Pomiar przeprowadzono dla WNZ generowanych w pęcherzykach gazowych, przemieszczających się w oleju izolacyjnym. Przykładowe przebiegi

deskryptorów przedstawiono na rys. 7. Podobnie jak tempo zliczeń amplitud, również te deskryptory obrazują częstość występowania WNZ. W mniejszym stopniu niż tempo i suma zliczeń EA zależą od przyjętego poziomu dyskryminacji. Na wartość tych deskryptorów duży wpływ ma napięcie generacji WNZ. Tempo i suma zdarzeń akustycznych wykazują lepszą korelację z rzeczywistą czas trwania zdarzenia akustycznego. W literaturze najczęściej przyjmuje się, że czas trwania pojedynczego zdarzenia akustycznego związanego z WNZ wynosi $200 \div 1500 \mu s$.

a)



b)



Rys. 7. Tempo (a) i suma (b) zdarzeń EA generowanej przez WNZ występujące w pęcherzykach gazowych, $U=20$ kV (71,42 % Up)

3.4. Deskryptor A_{rms}

Deskryptor A_{rms} definiuje się jako pierwiastek ze średniej kwadratów chwilowej wartości sygnału elektrycznego przetworzonego przez przetwornik z sygnału akustycznego emitowanego przez wyładowanie niezupełne. Deskryptor ten opisuje następujący wzór

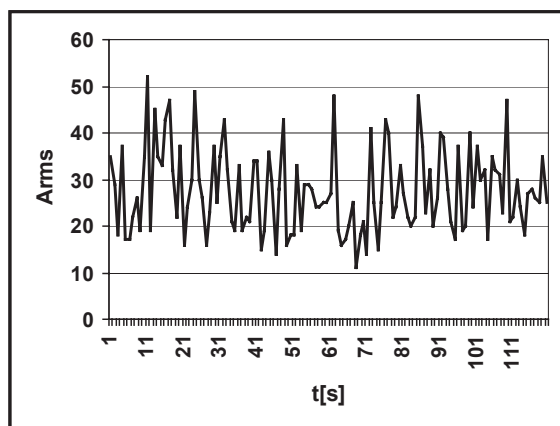
$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{(t)}^2 dt} \quad (7)$$

gdzie:

$u(t)$ - chwilowa wartość sygnału napięciowego, przetworzonego z sygnału akustycznego,
 T - przedział całkowania.

Deskryptor A_{rms} mierzono dla WNZ występujących na cząstkach o nieokreślonym potencjale. Wykorzystano w tym celu aparaturę Dema 100. Przykładowy przebieg tego deskryptora w funkcji czasu, przedstawiono na rys. 8.

Deskryptor A_{rms} stanowi sumę energii sygnału elektrycznego, ma więc bezpośredni, jakościowy związek z EA mierzonych WNZ. Na wartość tego parametru nie ma wpływu poziom dyskryminacji. Zerowy poziom A_{rms} wyznaczają szumy własne aparatury pomiarowej. Deskryptor jest natomiast uzależniony od przyjętego przedziału całkowania.



Rys. 8. Deskryptor A_{rms} WNZ występujących na cząstkach o nieokreślonym potencjale, $U=18kV$ (94,73% U_p)

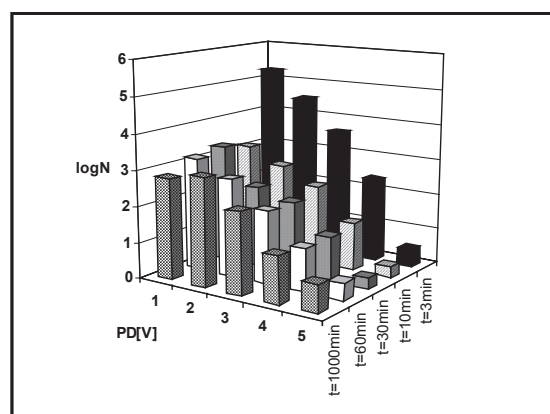
3.5. Rozkład amplitudowy

Sygnały EA od WNZ można również scharakteryzować za pomocą rozkładu (widma) amplitudowego. Pod tym pojęciem rozumie się zależność między częstotliwością występowania impulsów EA od WNZ, o amplitudzie przekraczającej wartość przyjętego progu dyskryminacji PD, a progiem dyskryminacji. Definicja ta odpowiada klasowaniu impulsów powyżej przyjętego poziomu. Rozróżnia się impulsy dodatnie i ujemne. Za impuls dodatni przyjmuje się impuls wywołany WNZ, w czasie którego elektrony kierują się od elektrody ujemnej w kierunku dielektryka stałego. Jeżeli elektrony przepływają od dielektryka stałego w kierunku elektrody dodatniej powstają impulsy ujemne. Zdefiniowanie impulsów dodatnich i ujemnych pozwala na wyznaczenie rozkładów obu biegunowości. Ich pomiar umożliwia np. aparatura typu Dema.

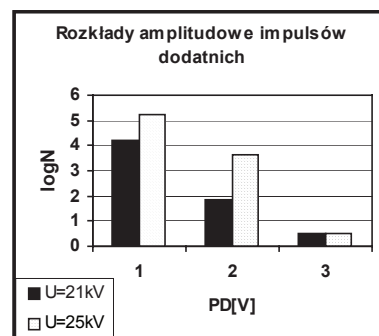
Na kształt widma amplitudowego EA od WNZ zasadniczy wpływ ma napięcie generacji wyładowań. Wzrost napięcia powoduje wzrost częstotliwości występowania impulsów i wzrost ich amplitud. Duży wpływ ma również czas oddziaływania napięcia na dielektryk - wraz z wydłużeniem czasu oddziaływania napięcia może dojść, w pewnych warunkach, do samowygaszenia się wyładowań. Parametry rozkładu amplitudowego

są również uzależnione od przestrzeni propagacji (a tym samym od tłumienia) impulsów EA. Celem określenia rozkładów amplitudowych EA od WNZ w izolacji papierowo-olejowej, wykonano odpowiednie pomiary, generując wyładowania powierzchniowe. Mierzono rozkłady dla dodatniej i ujemnej polaryzacji impulsów. Czas zliczania impulsów przyjmowano na poziomie 3, 10, 30, 60 i 1000 min. Pomiary przeprowadzano przy różnych napięciach generacji WNZ. Przykładowy rozkład amplitud impulsów dodatnich, przy napięciu generacji $U=25kV$, przedstawiono na rys. 9.

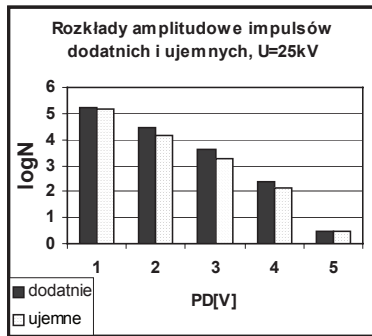
Rozkłady uzyskane dla różnych napięć generacji WNZ pokazano na rys. 10. Porównanie widm impulsów dodatnich i ujemnych uwidacznia rys. 11.



Rys. 9. Rozkłady amplitudowe EA od WNZ przeliczone z wartości 3, 10, 30, 60 i 1000 – minutowych na wartości jednonminutowe, napięcie generacji $U=25kV$



Rys. 10. Rozkłady amplitudowe EA od WNZ impulsów dodatnich dla dwóch napięć generacji (21kV i 25kV)



Rys. 11. Rozkłady amplitudowe EA od WNZ impulsów dodatnich i ujemnych dla napięcia generacji 25kV

4. PODSUMOWANIE

Z przeglądu literatury na temat deskryptorów EA wynika, że do opisu impulsów EA mogą być stosowane podstawowe deskryptory w dziedzinie czasu oraz deskryptory zaawansowane.

Przy doborze deskryptorów EA dla charakterystyki procesu generacji WNZ należy brać pod uwagę ich sens fizyczny, przewidywany związek ze stopniem degradacji dielektryka i możliwości metrologiczne. Z tego punktu widzenia podstawowe znaczenie wśród deskryptorów w dziedzinie czasu mają: maksymalna amplituda, A_{rms} , tempo zliczeń oraz tempo zdarzeń EA w dziedzinie czasu.

Badania nad deskryptorami w dziedzinie czasu skupiają się na zastosowaniu ich zarówno do lokalizacji, jak i do oceny szkodliwości WNZ. Deskryptor A_{rms} ma ścisły związek z aktywnością akustyczną procesu generacji WNZ, a tym samym z energią i szkodliwością WNZ występujących w badanym transformatorze. Tempo EA charakteryzuje przede wszystkim chwilowe zmiany intensywności generowanych WNZ. Deskryptor ten dobrze nadaje się do charakterystyki stabilności i równomierności procesu generacji WNZ. Ocenę stabilności i równomierności występowania WNZ, przy ustalonym napięciu generacji WNZ, można przeprowadzić przez wizualizację deskryptora $N/\Delta t$. Deskryptor $N/\Delta t$ podaje dokładniejszą informację o tych cechach procesu generacji WNZ, niż deskryptor $EA/\Delta t$. Między tymi dwoma deskryptorami istnieje ścisłe podobieństwo i w niektórych warunkach mogą być stosowane równolegle. Wszystkie deskryptory EA uzyskuje się wskutek elektronicznego przetworzenia sygnałów czasowych napięcia odbieranych na wyjściu przetwornika. Ze względu na to, że między źródłem a przetwornikiem istnieje kanał akustyczny, mierzone deskryptory nie dają informacji o bezwzględnej wartości parametrów źródła. Stąd w obiektach rzeczywistych zasadnicze znaczenie mogą mieć pomiary porównawcze.

LITERATURA

- [1] Gacek Z., Szadkowski M., Duda D., Witos F., Mażniewski K., *Poszukiwanie kompleksowej metody pomiaru, identyfikacji i lokalizacji WNZ w wysokonapięciowych układach izolacyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny Konferencje, nr 9, 2004.
- [2] Liu Y., Chen L., Bin Q., *"Partial Discharge (PD) Acoustic Wave Propagation in Power Transformers"*, EPRI, Ed. San Antonio, TX, 2001.
- [3] Okamoto T., Kato T., Yokomizu Y., Suzuoki Y., Tanaka T., *"PD characteristics as a stochastic process and its integral equation under sinusoidal voltage"*, IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, vol. 8, pp.82-90, 2001.
- [4] Ranachowski J., Malecki I.: *Emisja akustyczna. Źródła, metody, zastosowania*, IPPT PAN, Warszawa 1994.
- [5] Skubis J.: *Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych*. IPPT PAN, Warszawa, 1993.
- [6] Skubis J.: *Akustyczne techniki lokalizacji wyladowań niezupełnych. Transformatory w eksploatacji*. Energetyka zeszyt VI. 04.2005. s.73-76.
- [7] Witos F., Urbańczyk M., Opilski A., Olech W., Groszko M.: *O potrzebie stosowania metody "pattern recognition" do lokalizacji wnz*. Konferencja Transformator - 95, Koszalin 1995.



Dr inż. **Barbara KUCHARSKA** jest pracownikiem Instytutu Elektroenergetyki, Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej