



Tomasz BOCZAR, Sebastian BORUCKI, Andrzej CICHONÍ, Marcin LORENC

Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki

## Zastosowanie analizy falkowej do opisu wyładowań niezupełnych generowanych w olejach izolacyjnych o różnych parametrach fizykochemicznych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono rezultaty badań nad wpływem parametrów fizykochemicznych oleju izolacyjnego na wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów emisji akustycznej (EA) generowanej przez wyładowania niezupełne powierzchniowe (WNZP). Zmierzone sygnały EA poddano przekształceniu przy wykorzystaniu krótkoczasowej transformaty Fouriera STFT (Short-Time Fourier Transform), wyznaczając dwu- i trójwymiarowe spektrogramy widmowej gęstości mocy oraz trójwymiarowe spektrogramy widma amplitudowego. Wyniki przeprowadzonej analizy porównano z wynikami analizy falkowej wykonanej przy zastosowaniu ciągłej transformaty falkowej (CWT).

**Abstract.** (Application of wavelet transform for description of partial discharges generated in insulating oils with different physicochemical parameters). The paper presents the results of research about the influence of physicochemical parameters of insulating oils on the time-frequency analysis of the acoustic emission (AE) signals generated by partial discharges PDs. The AE signals conversion by use of Short-Time Fourier Transform (STFT) determines two- and three-dimensional spectrograms of the power spectrum density and three-dimensional spectrogram of the amplitude spectrum. The results of conducted analysis were compared with results of wavelet analysis by use Continuous Wavelet Transform (CWT).

**Słowa kluczowe:** wyładowania niezupełne, metoda emisji akustycznej, oleje izolacyjne, analiza falkowa.

**Keywords:** partial discharges, acoustic emission method, electroinsulating oils, wavelet analysis.

### Wstęp

W metodzie EA stosowanej do detekcji i lokalizacji WNZ w transformatorach elektroenergetycznych wykorzystywane jest zjawisko rozchodzenia się fali akustycznej w oleju izolacyjnym. Podczas eksploatacji transformatora olej podlega procesom starzeniowym i zmienia swoje właściwości fizykochemiczne. Wraz z nimi zmieniają się warunki propagacji fali akustycznej generowanej przez WNZ. Zjawisko to ma wpływ na tłumienie sygnału i prędkość rozchodzenia się fali akustycznej w oleju. Zarówno tłumienie jak i prędkość rozchodzenia się fali akustycznej wpływają na wyniki analizy czasowej, która charakteryzowana jest m.in. przez: maksymalną wartość amplitudy oraz wartość energii mierzonego sygnału [1].

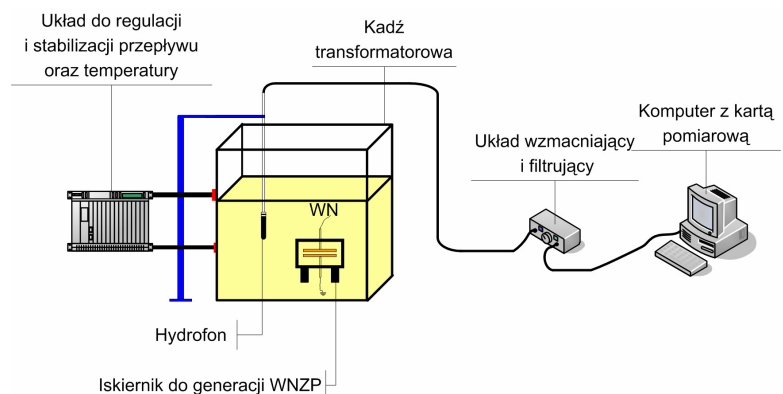
W ostatnich latach zmienił się sposób analizy sygnałów EA generowanej przez WNZ. Coraz rzadziej stosuje się opis czasowy sygnału ze względu na fakt, iż nie dostarcza on wielu istotnych informacji o mierzonej sygnale, a w szczególności uzyskiwane wyniki nie mogą być wykorzystane do rozpoznawania form WNZ. Ponadto analiza czasowa jest wrażliwa na zakłócenia oraz zmianę warunków generacji WNZ. Z tych powodów wprowadzono analizę częstotliwościową, której ograniczeniem jest jednak całkowita utrata informacji o czasie analizowanego sygnału. Najczęściej stosowanym sposobem opisu sygnałów EA generowanej przez WNZ jest analiza czasowo-częstotliwościowa, która łączy w sobie zalety analizy sygnału w dziedzinie częstotliwości, nie tracąc informacji o czasie wystąpienia mierzonego zdarzenia akustycznego [2].

W prezentowanym artykule przedstawiono wyniki badań nad wpływem parametrów fizykochemicznych oleju izolacyjnego na rezultaty analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów EA generowanej przez WNZ w układzie powierzchniowym (WNZP).

### Charakterystyka układu pomiarowego

Na rysunku 1 przedstawiono schemat układu pomiarowego do generacji, rejestracji i analizy sygnałów EA generowanej przez WNZP.

W kadzi wypełnionej olejem izolacyjnym umieszczono iskiernik generujący WNZP. Sygnały EA generowane przez WNZP rejestrowano hydrofonom typu 8103 firmy Brüel&Kjær. Hydrofon ten charakteryzuje się płaską charakterystyką przenoszenia w zakresie od 0,1 Hz do 180 kHz oraz dobrą czułością (-211 dB w odniesieniu do 1V/ $\mu$ Pa) [3,4]. Hydrofon podłączono do układu wzmacniającego i filtrującego. Zastosowano filtr pasmowo-przepustowy o częstotliwościach odcięcia 10 i 700 kHz. Sygnał pomiarowy był wzmacniany o 35 dB. Przebiegi czasowe sygnałów EA generowanej przez WNZP rejestrowano za pomocą czterokanałowej karty pomiarowej CH 3160 firmy Acquitek. Maksymalna częstotliwość próbkowania karty wynosi 40 MHz, przy rozdzielczości 12 bitów. Podczas wykonywania pomiarów stosowano częstotliwość próbkowania równą 2,56 MHz, zapisując ciągi 51200 próbek, co pozwoliło na rejestrację sygnału w czasie 20 ms.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

### Parametry badanych olejów izolacyjnych

Dzięki współpracy z Koncernem Energetycznym EnergiaPro oddział w Opolu pozyskano do badań próbki oleju izolacyjnego. Próbki te pobrano z transformatorów rozdzielczych charakteryzujących się różnym czasem eksploatacji. Dane techniczne transformatorów, z których pobrano próbki olejów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie danych znamionowych transformatorów, z których pobrano próbki oleju

Lp	Parametr	Olej nr 1	Olej nr 2	Olej nr 3	Olej nr 4
1	Typ	TOC 100/20	T3ZON E 50/20	T3ZONg 100/20	TAOFn 630/20
2	Rok produkcji	1957	1970	1965	1985
3	Moc znamionowa [kV·A]	100	50	100	630
4	Napięcie pierwotne [kV]	15000	15750	15000	15750
5	Napięcie wtórne [V]	400 - 231	400 - 231	400 - 231	400 - 231
6	Rodzaj pracy	C	C	C	C
7	Rodzaj chłodzenia	ON-AN	ON-AN	ON-AN	ON-AN
8	Masa oleju [kg]	280	195	250	470

Dla pobranych próbek oleju zmierzono parametry fizykochemiczne, które przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie parametrów fizykochemicznych badanych olejów elektroizolacyjnych.

Lp	Parametr	Olej nr 1	Olej nr 2	Olej nr 3	Olej nr 4
1	Gęstość w 20 °C [g/ml]	0,865	0,878	0,882	0,879
2	Temperatura zapłonu [°C]	166,1	148,1	145,2	146,1
3	Liczba kwasowa [mg KOH/g]	0,170	0,063	0,070	0,080
4	Zawartość wody [ppm]	14,7	12,6	16,2	24,8
5	Współczynnik stratności dielektrycznej – tgδ przy 50 °C i 50 Hz [%]	0,42	0,22	0,76	1,53
6	Rezystywność przy 50 °C [Ωm] · 10 <sup>10</sup>	11,2	38,0	4,68	8,78
7	Napięcie przebiecia przy 20 °C [kV]	66,5	68,3	66,7	62,5

### Wyniki analizy z wykorzystaniem STFT

Analizę czasowo-częstotliwościową sygnałów emisji akustycznej generowanych przez WNZP wykonano poprzez wyznaczenie ich krótkoczasowej transformaty Fouriera STFT.

Procedury numeryczne umożliwiające wyznaczenie spektrogramów przygotowano i wykonano w programie Matlab. W obliczeniach zastosowano okno czasowe Hamminga, powszechnie stosowane do przetwarzania sygnałów szybkozmiennych.

Dla sygnałów, które zostały przetworzone krótko-czasowym przekształceniem Fouriera wyznaczono spektrogramy, odpowiadające sygnałowi EA generowanemu przez WNZP w olejach o różnych parametrach fizykochemicznych.

Do prezentacji widma gęstości mocy wyznaczono obrazy w przestrzeni czas-częstotliwość oraz czas-częstotliwość-amplituda, dla widma amplitudowego wykonano spektrogramy w przestrzeni trójwymiarowej.

Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono spektrogramy wyznaczone z zastosowaniem funkcji progowej, odcinającej składowe o mniejszych wartościach amplitudy. Funkcję progową zastosowano w celu uwydatnienia otrzymanych struktur koherentnych.

Przedstawione na rysunku 2 spektrogramy widmowej gęstości mocy pokazują powtarzające się dla każdego z analizowanych przypadków obrazy zawarte w dwóch pasmach częstotliwości. Pierwsze z nich zawiera się w paśmie niskich częstotliwości od ok. 30 kHz do 180 kHz, natomiast drugie od ok. 220 kHz do 330 kHz.

Spektrogramy odpowiadające poszczególnym olejom izolacyjnym różnią się liczbą struktur występujących w czasie 20 ms. Na spektrogramach trójwymiarowych przedstawionych na rysunku 3 zauważalna jest różnica intensywności, z jaką generowane są WNZP.

Obrazy w przestrzeni czas-częstotliwość-amplituda potwierdzają udział dominujących pasm częstotliwości. Wartości amplitud na poszczególnych spektrogramach nie różnią się znacząco między sobą.

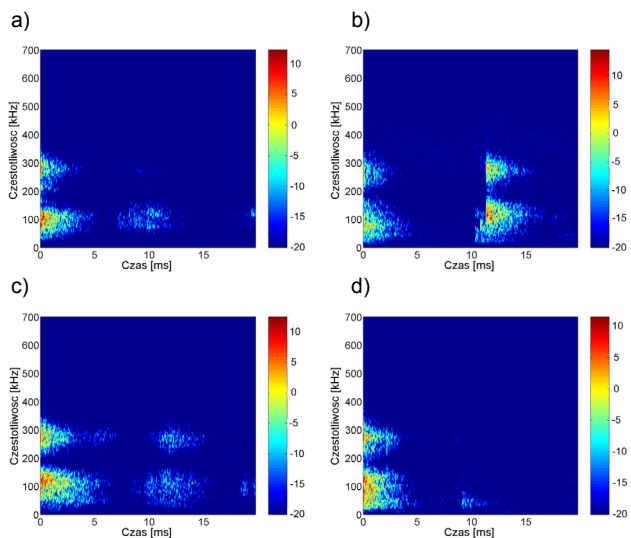
W widmie amplitudowym zaprezentowanym na rysunku 4 widoczny jest większy udział częstotliwości z pierwszego zakresu. Obrazy przedstawione na spektrogramach mają zbliżony kształt i charakter.

### Wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej z zastosowaniem ciągłej transformaty falkowej (CWT)

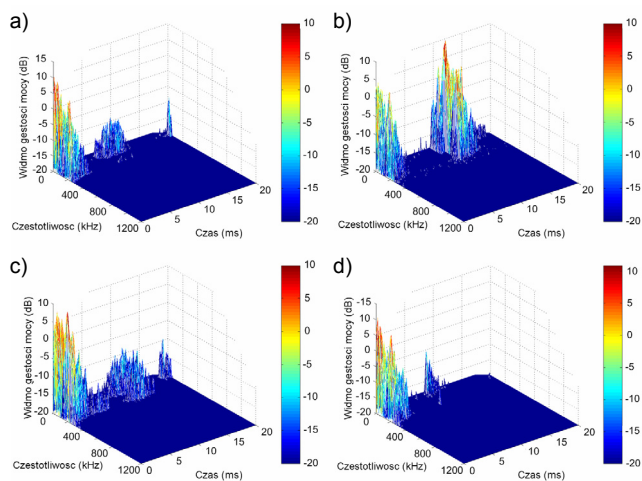
W ramach przeprowadzonych analiz, których wyniki są prezentowane w artykule, oprócz analizy STFT wykonano także przekształcenie falkowe. Było to spowodowane dwiema zasadniczymi przyczynami.

Po pierwsze, wykorzystanie analizy falkowej daje możliwość powiększenia rozdzielczości czasowo-częstotliwościowej. Podczas przetwarzania sygnałów mogą być wykorzystane wąskie okna obserwacyjne przy dużych częstotliwościach oraz szerokie okna analizujące dla częstotliwości niskich. Przekształcenie STFT wykorzystuje różne typy okien obserwacyjnych, ale o stałej długości czasowej i w konsekwencji niezmienną rozdzielczości na całej płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej. Ponieważ sygnały EA generowane przez WNZP mogą zawierać składowe zarówno nisko- jak i wysoko-częstotliwościowe, dlatego analiza falkowa wydaje się bardzo użyteczna przy ocenie charakteru wyznaczanych rozkładów czasowo-częstotliwościowych.

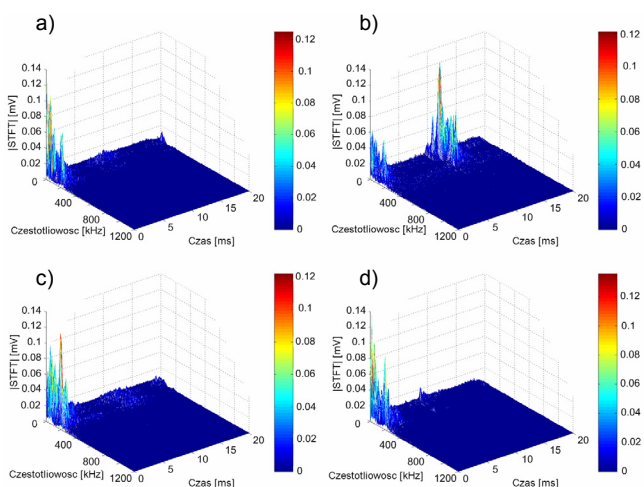
Po drugie, określenie struktury częstotliwościowej z użyciem STFT odbywa się poprzez dekompozycję sygnału na pewną liczbę składowych sinusoidalnych. Natomiast w analizie falkowej wykorzystuje się rozkład sygnału na ciąg dobrze zlokalizowanych funkcji bazowych nazywanych falkami. Stąd wyniki takiej analizy mogą przyczynić się do poszerzenia i uzupełnienia wiedzy o obliczonych strukturach czasowo-częstotliwościowych [5].



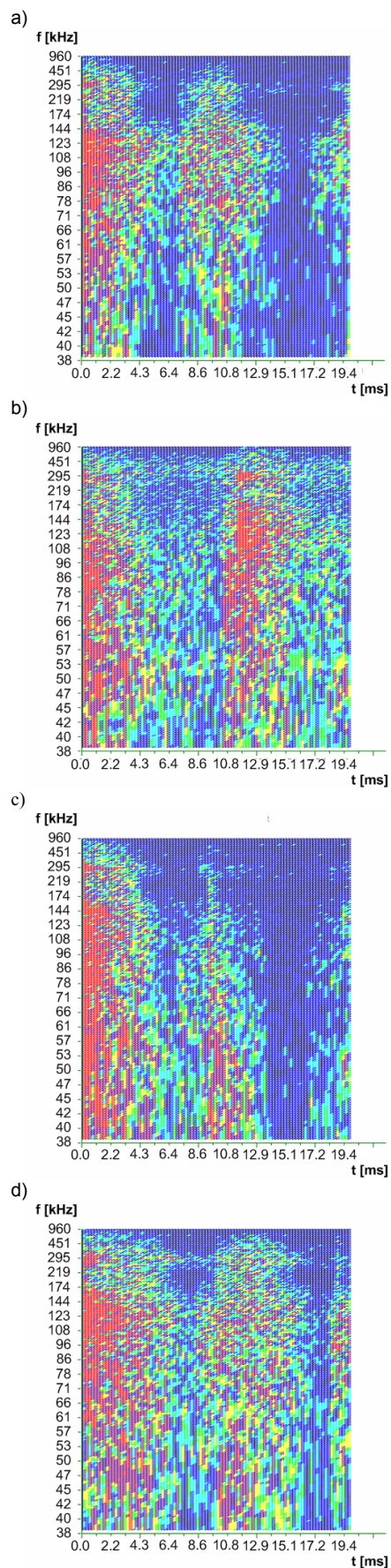
Rys 2. Płaskie obrazy spektrogramów widma gęstości mocy wyznaczone dla sygnałów EA generowanej przez WNZP w olejach o różnych parametrach fizykochemicznych: a) olej nr 1, b) olej nr 2, c) olej nr 3, d) olej nr 4



Rys 3. Trójwymiarowe spektrogramy widmowej gęstości mocy wyznaczone dla sygnałów EA generowanej przez WNZP w olejach o różnych parametrach fizykochemicznych: a) olej nr 1, b) olej nr 2, c) olej nr 3, d) olej nr 4



Rys 4. Trójwymiarowe spektrogramy widma amplitudowego wyznaczone dla sygnałów EA generowanej przez WNZP w olejach o różnych parametrach fizykochemicznych: a) olej nr 1, b) olej nr 2, c) olej nr 3, d) olej nr 4



Rys 5. Skalogramy sygnałów EA generowanej przez WNZP w olejach o różnych parametrach fizykochemicznych obliczone przy zastosowaniu ciągłej transformaty falkowej CWT: a) olej nr 1, b) olej nr 2, c) olej nr 3, d) olej nr 4

Analizę falkową przedstawioną w artykule wykonano w oparciu o program, który powstał dzięki współpracy Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Opolskiej z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie.

Na rysunku 5 zilustrowano skalogramy sygnałów EA generowanej w układzie modelującym WNZP obliczone przy zastosowaniu ciągłej transformaty falkowej CWT, które wyznaczono dla różnych typów olejów izolacyjnych. Przedstawione skalogramy zostały obliczone przy zastosowaniu jako funkcji bazowej falki Morleta, której równanie matematyczne, przebieg czasowy oraz zależność częstotliwość-skala przedstawiono m.in. w pracy [5].

Wyznaczone skalogramy ilustrują występowanie struktur częstotliwościowych w zakresie od około 30 kHz do około 450 kHz, przy czym ich liczba i intensywność jest różna dla badanych olejów izolacyjnych. Największe wartości amplitud zarejestrowanych sygnałów EA występują odpowiednio w następujących przedziałach:

- dla oleju 1 w zakresie (50-145) kHz
- dla oleju 2 w zakresie (50-300) kHz
- dla oleju 3 w zakresie (60-300) kHz
- dla oleju 4 w zakresie (50-300) kHz.

Czas trwania zilustrowanych struktur koherentnych dla wszystkich badanych olejów nie przekracza 6 ms. Najkrótsze czasy trwania generowanych obrazów czasowo-częstotliwościowych występują dla oleju 2 i nie przekraczają 3 ms, natomiast dla pozostałych typów olejów czas relaksacji nie przekracza 4 ms.

W przypadku oleju nr 1 mamy do czynienia z występowaniem wyładowań podtrzymywanych, przy czym amplitudy struktur czasowo-częstotliwościowych występujące między sygnałami emisji akustycznej generowanymi przez WNZP w dodatnim i ujemnym półokresie napięcia mają stosunkowo małą wartość.

Dla wszystkich badanych próbek olejów izolacyjnych wyznaczone obrazy falkowe mają najszersze pasmo i największą amplitudę dla sygnałów emisji akustycznej generowanych w pierwszym przedziale czasowym (0÷6) ms, natomiast struktury występujące w drugim półokresie napięcia mają węższe pasmo częstotliwościowe i mniejszą amplitudę.

## Podsumowanie

Opis sygnałów EA pochodzących od WNZ za pomocą analizy czasowo-częstotliwościowej stanowi istotne uzupełnienie stosowanych dotychczas metod interpretacji wyników pomiarowych. Przekształcenie STFT pozwala na obserwację struktur umożliwiających ocenę mierzonego sygnału pod kątem detekcji WNZ. Analiza falkowa z zastosowaniem CWT poprawia dokładność tej oceny i zwiększa dokładność metody EA.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiana parametrów fizykochemicznych olejów izolacyjnych, w których generowano WNZP nie wpływa w sposób znaczący na interpretację pomiarów metodą EA. Potwierdzają to podobne zakresy dominujących częstotliwości przedstawione na analizowanych spektrogramach i skalogramach.

## LITERATURA

- [1] Gronowski B., Ranachowski J., Skubis J., Zalewski J., Pomiary tłumienia emisji akustycznej od wyładowań elektrycznych w materiałach elektroizolacyjnych, *IPPT PAN*, Warszawa, 1986.
- [2] Boczar T., Obiektywizacja wyników akustycznej metody oceny wyładowań niepełnych przy zastosowaniu do opisu sygnałów analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania, *Oficyna Wyd. Politechniki Opolskiej*, 2003 r.
- [3] Brüel & Kjær „Standard measuring hydrophone type 8103 – instruction and applications”, June 1990.
- [4] Borucki S., Porównanie piezoelektrycznych czujników pomiarowych wykorzystywanych w pomiarach sygnałów emisji akustycznej generowanych przez wyładowania niepełne, *Energetyka, Zeszyt tematyczny nr VI*, str. 104-106, Kwiecień 2005.
- [5] Boczar T., Możliwości zastosowania do opisu sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niepełnych analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania sygnałów, *Oficyna Wyd. Politechniki Opolskiej*, 2003.

## Autorzy:

dr hab. inż. Tomasz Boczar - prof. n. PO, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: [tboczar@po.opole.pl](mailto:tboczar@po.opole.pl); mgr inż. Sebastian Borucki, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, E-mail: [sborucki@po.opole.pl](mailto:sborucki@po.opole.pl); mgr inż. Andrzej Cichoń, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: [cichy@po.opole.pl](mailto:cichy@po.opole.pl); dr inż. Marcin Lorenc, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: [lem@op.home.pl](mailto:lem@op.home.pl)