

**Marek SZMECHTA, Tomasz BOCZAR, Dariusz ZMARZŁY, Paweł AKSAMIT**

POLITECHNIKA OPOLSKA,  
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

## Badanie wpływu własności starzeniowych mineralnego oleju izolacyjnego na zjawisko kawitacji akustycznej

**Dr inż. Marek SZMECHTA**

Absolwent kierunku Informatyka Dwujęzyczna Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. W grudniu 2009 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika na tym samym wydziale. Prowadzi prace badawcze w Instytucie Elektroenergetyki m. in. nad zastosowaniem zjawisk optyczno akustycznych w diagnostyce układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Dorobek naukowy obejmuje 31 publikacji w tym 9 znajdujących się w czasopiśmie z listy filadelfijskiej.

e-mail: [m.szmechta@po.opole.pl](mailto:m.szmechta@po.opole.pl)



**Dr hab. inż. Dariusz ZMARZŁY**

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej (2000). Stopnie doktora nauk technicznych (2002) oraz doktora habilitowanego (2006) uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi elektryzacji strumieniowej. Jest autorem ponad 150 publikacji. Jest stypendystą Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2007, 2008). Uzyskał stypendium Ministra dla Wybitnych Młodych Naukowców (2008-2011).

e-mail: [dariusz@zmarzly.com](mailto:dariusz@zmarzly.com)



**Prof. dr hab. inż. Tomasz BOCZAR**

Prodziekan ds. organizacyjnych Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, Kierownik Zakładu Wysokich Napięć. Autor ponad 220 publikacji głównie z zakresu wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych, badań wibroakustycznych, oceny klimatu akustycznego w środowisku przemysłowym i odnawialnych źródeł energii.

e-mail: [t.boczar@po.opole.pl](mailto:t.boczar@po.opole.pl)



**Dr inż. Paweł AKSAMIT**

Tytuł magistra uzyskał w roku 2007, a stopień doktora nauk technicznych w roku 2009 - oba na Wydziale Automatyki, Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Jego praca naukowa koncentruje się wokół zagadnień związanych z elektryczną inżynierią materiałową, a w szczególności wokół ciekłych dielektryków. Jest autorem lub współautorem ponad 30 publikacji w czasopiśmie oraz materiałach konferencyjnych.

e-mail: [pawel.aksamit@gmail.com](mailto:pawel.aksamit@gmail.com)



### Streszczenie

Tematyka podejmowana w artykule jest wynikiem cyklu prac badawczych dotyczących analizy zjawiska kawitacji ultradźwiękowej w mineralnych olejach izolacyjnych. Zawarta w artykule analiza wpływu własności starzeniowych mineralnych olejów izolacyjnych na sygnał emisji akustycznej generowanej zjawiskiem kawitacji ma na celu opracowanie podstawowych metod analizy i interpretacji danych pomiarowych umożliwiających oszacowanie stopnia zesterzenia oleju izolacyjnego. Postawiona w projekcie badawczym teza mówi o możliwości wyznaczenia stopnia zesterzenia oleju izolacyjnego na podstawie analizy widmowej sygnału emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji. W celu sprawdzenia poprawności postawionej tezy przeprowadzono badania eksperymentalne zależności wskaźnika intensywności kawitacji  $P_{CAV}$  od czasu starzenia próbki oleju izolacyjnego  $t_{st}$  oraz określono charakter zmian wartości wskaźnika dla uzyskanych wyników pomiarów. Dokonano również odwzorowania zmian wskaźnika  $P_{CAV}$  w zależności od parametrów sygnału źródłowego wykorzystywanego do generacji zjawiska kawitacji akustycznej w postaci dwuwymiarowych kolorowych wykresów konturowych.

**Słowa kluczowe:** kawitacja akustyczna, mineralne oleje izolacyjne, emisja akustyczna.

### Investigations of influence of mineral insulating oil aging properties on acoustic cavitation phenomenon

#### Abstract

The subject area of this paper is a result of a cycle of research work concerning the analysis of ultrasonic cavitation phenomenon in mineral insulating oils. The paper includes analysis of the impact of aging properties of mineral insulating oils on an acoustic emission signal generated during cavitation phenomenon. This study aims at developing the basic methods for analysis and interpretation of measurement data to estimate the degree of insulating oil aging. The study focuses on spectral analysis of the acoustic emission signal and changes in spectra of the recorded signals. There was investigated the acoustic emission of cavitation accompanying the forced signal frequencies ranging from 100 kHz to 140 kHz in steps of 200 Hz and rms values from 0 V to 1000 V in steps of 50 V. The sampling frequency of the acoustic emission signal was 1 MHz. The thesis in the research project talks about the possibility of estimating the degree of

insulating oil aging on the basis of spectral analysis of acoustic emission signals accompanying cavitation phenomenon. In order to validate the hypothesis, experimental investigations of the dependency of the cavitation intensity factor  $P_{CAV}$  on the insulating oil sample aging time  $t_{st}$  were performed, as well as the factor changes according to the measurement results were determined. There were also determined the mapping changes of  $P_{CAV}$  factor ratio depending on the parameters of a source signal used for generation of acoustic cavitation in the form of two-dimensional color contour plots. These plots allowed identifying the areas most suitable for the acoustic cavitation phenomena in insulating oils.

**Keywords:** acoustic cavitation, mineral insulating oils, acoustic emission.

### 1. Procesy starzeniowe olejów izolacyjnych

Tematyka podejmowanych prac badawczych w niniejszej pracy dotyczy wykorzystania zjawiska kawitacji akustycznej w mineralnych olejach izolacyjnych [1]. Ogólna idea prowadzonych prac polega na wykorzystaniu charakterystycznego dla zjawiska kawitacji szerokopasmowego szumu zwanego również szumem kawitacyjnym [2, 3].

Oleje mineralne będące jednym z produktów destylacji ropy naftowej znajdują szerokie zastosowanie w elektrotechnice. Izolacyjne oleje mineralne zawierają głównie węglowodory nasycone i należą do ciekłych dielektryków niepolarnych. Nominalna temperatura ich pracy nie przekracza 95 °C. W temperaturze powyżej 140 °C oleje mineralne obficie wydzielają palne gazy oraz ulegają szybkemu procesowi starzenia tracąc właściwości izolacyjne [4].

Dobre właściwości fizykochemiczne i dielektryczne olejów izolacyjnych pozwalają na szerokie ich stosowanie w urządzeniach wysokonapięciowych, w których mogą pełnić następujące funkcje [5]:  
a) elementu izolacyjnego dzięki znacznej wytrzymałości elektrycznej,  
b) czynnika poprawiającego wytrzymałość izolacji stałej poprzez jej nasycenie,  
c) czynnika chroniącego izolację stałą przed dostępem wilgoci i powietrza,  
d) czynnika chłodzącego dzięki niskiej lepkości,  
e) czynnika ułatwiającego gaszenie łuku elektrycznego.

olej przeznaczony do pracy w urządzeniach wysokonapięciowych musi odznaczać się odpowiednimi właściwościami fizykochemicznymi. Do najczęściej spotykanych zastosowań należy olej do transformatorów i aparatury łączeniowej, którego parametry określa norma [6]. W celu wszechstronnego sprawdzenia nowego oleju transformatorowego wykonuje się badania następujących jego właściwości:

- wygląd i zawartość stałych ciał obcych,
- zawartość wody,
- napięcie przebicia,
- rezystywność,
- współczynnik strat dielektrycznych,
- lepkość kinematyczna,
- temperatura zapłonu,
- temperatura płynięcia,
- gęstość w temperaturze 20°C,
- pozostałość po spopieleniu,
- całkowita liczba kwasowa,
- zawartość siarki aktywnej,
- stabilność gazowa w polu elektrycznym,
- odporność na utlenianie.

Podczas eksploatacji właściwości oleju izolacyjnego ulegają nieodwracalnemu pogorszeniu. Zjawisko to nazywa się starzeniem oleju. Prędkość starzenia oleju zależy od takich czynników jak: dostęp tlenu, zawilgocenie, temperatura, natężenie pola elektrycznego, obecność katalizatorów przyspieszających starzenie (ołów, miedź, żelazo). W celu dokonania oceny stopnia zesterzenia oleju oraz wnioskowania o jego przydatności do dalszej pracy przeprowadza się badania techniczne próbek oleju pobranych podczas eksploatacji z takich urządzeń jak transformatory, wyłączniki, przekładniki [4].

## 2. Charakterystyka badanych olejów izolacyjnych

Na potrzeby badań wpływu właściwości starzeniowych olejów izolacyjnych na wyniki analizy częstotliwościowej sygnału emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji przygotowano serię próbek mineralnego oleju izolacyjnego o różnym stopniu zesterzenia. Starzenie próbek oleju przeprowadzano zgodnie z obowiązującą normą [7] w termostacie o temperaturze 110 °C. Czas starzenia 19 próbek wynosił odpowiednio 0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 18, 22, 27, 33, 40, 49, 59, 72, 88 oraz 107 godzin. Czas starzenia równy 0 oznacza olej świeży. Termostat posiadał otwory wentylacyjne umożliwiające swobodny dopływ powietrza. Utlenianie przeprowadzano z dodatkiem katalizatora miedziowego. W tabeli 1 zestawiono wartości typowych wskaźników związanych ze starzeniem, zmierzonych dla oleju świeżego. Wyznaczono również wartości wskaźników dla przygotowanych i zesterzonych próbek oleju izolacyjnego.

Tab. 1. Zestawienie parametrów świeżego oleju mineralnego  
Tab. 1. List of fresh mineral oil parameters

Próbka oleju	1
Czas starzenia oleju [h]	0 – olej świeży
Zawartość wody [ppm]	11,1
Napięcie przebicia $U_p$ [kV]	67,1
Rezystywność przy 50 °C [GΩm]	100,6
Współczynnik stratności dielektrycznej tgδ przy 50 °C, 50 Hz [%]	0,077
Całkowita liczba kwasowa [mgKOH/g]	0,022

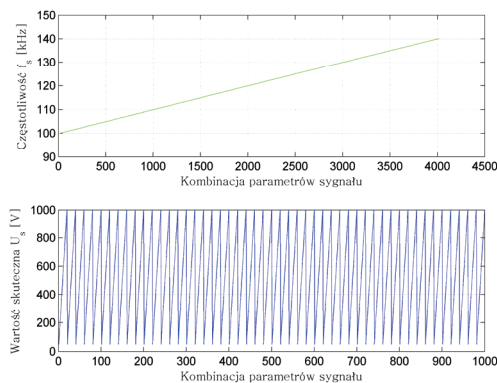
## 3. Metodyka badań wpływu własności starzeniowych olejów

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem systemu pomiarowego składającego się z naczynia kawitacyjnego, układu do generacji kawitacji akustycznej, podrzędnego układu sterowania, ukła-

du pomiarowego emisji akustycznej, oprogramowania nadzorującego proces pomiaru oraz oprogramowania do analizy i wizualizacji danych pomiarowych. Szczegółowy opis systemu pomiarowego zawarto w pracach [1, 8].

Badania wpływu własności starzeniowych oleju izolacyjnego na wyniki analizy widmowej emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji przeprowadzono z wykorzystaniem przygotowanych próbek oleju w następujący sposób:

- Naczynie kawitacyjne o pojemności 100 ml wypełniono olejem zaczynając od oleju świeżego, następnie wykorzystywano coraz starsze próbki.
- Wykonano kolejno 3 powtórzenia pomiaru emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji.
- Ustawiano kolejną częstotliwość  $f_s$  pracy generatora źródłowego z następującego przedziału od 100 kHz do 140 kHz z krokiem 200 Hz.
- Dla każdej wartości częstotliwości  $f_s$  ustawiono kolejne napięcie skuteczne sygnału  $U_s$  z przedziału od 0 V do 1000 V co 50 V (Szczegółowy obraz zmian parametrów sygnału źródłowego w trakcie trwania eksperymentu przedstawia rysunek 1).
- Za pomocą karty pomiarowej w każdym kroku pobierano 1 000 000 próbek sygnału emisji akustycznej z częstotliwością próbkowania 1 MHz.
- Dla każdego wektora danych pomiarowych wyznaczono gęstość widmową mocy oraz wskaźnik intensywności kawitacji akustycznej  $P_{CAV}$  (proponowana wielkość stanowiąca średnią gęstość mocy sygnału emisji akustycznej [1]).
- Zarejestrowano 3 kolejne powtórzenia pomiaru dla wszystkich kombinacji parametrów sygnału źródłowego, składających się z par napięcia skutecznego sygnału  $U_s$  oraz jego częstotliwości  $f_s$ , dokonano uśrednienia uzyskanych wyników.
- Ogółem wykonano 3 serie po 4221 pomiarów (kombinacji) po 1 000 000 próbek każdy.
- Czas trwania eksperymentu dla 1 próbki oleju wynosił około 4 godzin.
- Ze względu na długi czas trwania eksperymentu zapewniono odpowiednie chłodzenie naczynia kawitacyjnego, dzięki czemu badania przeprowadzone zostały przy stałej temperaturze oleju wynoszącej 30 °C.



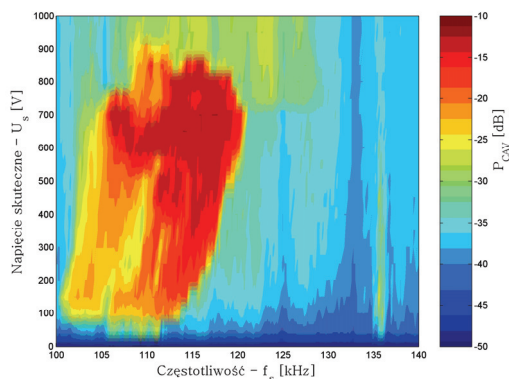
Rys. 1. Zmiany częstotliwości  $f_s$  i wartości skutecznej  $U_s$  sygnału źródłowego podczas eksperymentu.

Fig. 1. Changes of source signal frequency and rms value during the experiment

## 4. Ocena wpływu procesów starzeniowych oleju izolacyjnego na emisję akustyczną towarzyszącą kawitacji

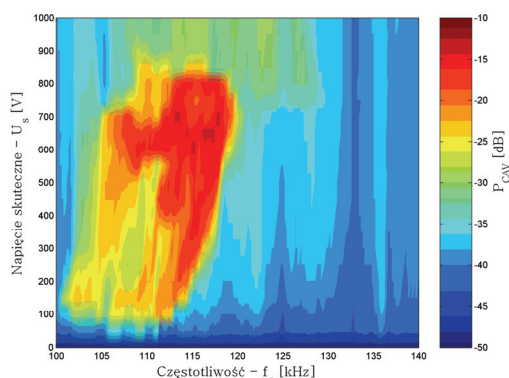
W niniejszym punkcie zawarto wyniki analizy wpływu procesów starzeniowych oleju izolacyjnego na zmiany wskaźnika intensywności kawitacji  $P_{CAV}$ . Na podstawie sporządzonych widm gęstości mocy sygnałów emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji wyznaczono wartości wskaźnika intensywności kawitacji akustycznej dla wszystkich używanych kombinacji parametrów sygnału źródłowego.

Następnie dokonano zestawienia uzyskanych wartości wskaźnika kawitacji dla wszystkich próbek oleju izolacyjnego traktując każdą parę częstotliwości  $f_s$  i wartości skutecznej  $U_s$  sygnału źródłowego z generatora sinusoidalnego jako serię danych zawierającą 19 elementów.



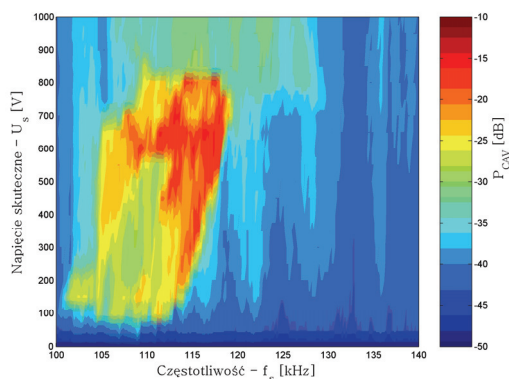
Rys. 2. Wartości maksymalne wskaźnika kawitacji  $P_{CAV}$  spośród serii badanych próbek dla oleju niestarzonego przy zmianie częstotliwości  $f_s$  i wartości skutecznej  $U_s$  sygnału źródłowego

Fig. 2. Maximum values of cavitation intensity factor  $P_{CAV}$  of a series of tested samples in fresh insulating oil during change of source signal frequency  $f_s$  and rms value  $U_s$



Rys. 3. Wartości wskaźnika kawitacji  $P_{CAV}$  dla próbki oleju o czasie starzenia równym 22 godziny przy zmianie częstotliwości  $f_s$  i wartości skutecznej  $U_s$  sygnału źródłowego

Fig. 3. Values of the cavitation intensity factor  $P_{CAV}$  in insulating oil aged for 22 hours during change of source signal frequency  $f_s$  and rms value  $U_s$



Rys. 4. Wartości minimalne wskaźnika kawitacji  $P_{CAV}$  spośród serii badanych próbek dla oleju o czasie starzenia wynoszącym 107 godzin przy zmianie częstotliwości  $f_s$  i wartości skutecznej  $U_s$  sygnału źródłowego

Fig. 4. Minimum values of cavitation intensity factor  $P_{CAV}$  observed in insulating oil aged for 107 hours for change of source signal frequency  $f_s$  and rms value  $U_s$

Aby zobrazować zachodzące zmiany wskaźnika przy zmianie właściwości starzeniowych oleju izolacyjnego dla różnych wartości parametrów sygnału źródłowego wykreślono wykresy konturowe dla oleju świeżego (rysunek 2), dla oleju o czasie starzenia równym 22 godziny (rysunek 3) oraz dla oleju o czasie starzenia wynoszącym 107 godzin (rysunek 4). Porównując wykresy wartości wskaźników kawitacji dla tych przypadków można zauważyć tłumiący wpływ procesu starzenia oleju izolacyjnego na zjawisko kawitacji akustycznej. W dalszych pracach badawczych planuje się wypracowanie metodyki analizy danych empirycznych w celu wyznaczenia modelu zależności wskaźnika intensywności kawitacji akustycznej od czasu starzenia oleju. Syntetyczne przedstawienie proponowanej koncepcji znacznie wykracza poza ramy tej publikacji.

## 5. Wnioski

Na potrzeby przeprowadzonego eksperymentu i oceny wpływu własności starzeniowych oleju izolacyjnego na sygnał emisji akustycznej kawitacji przygotowano serię próbek mineralnego oleju izolacyjnego o zróżnicowanym stopniu zestarzenia. Punktem wyjściowym przeprowadzonego eksperymentu jest analiza zmian wskaźnika intensywności kawitacji  $P_{CAV}$  w funkcji czasu starzenia próbek oleju izolacyjnego. Na podstawie zamieszczonych na rysunkach 2, 3 i 4 wykresów wartości przyjętego wskaźnika dla olejów o różnym czasie starzenia widać wyraźne obniżenie jego wartości dla kolejnych próbek oleju izolacyjnego. Warto tutaj podkreślić, iż widoczne zmiany wskaźnika dotyczą szerokiego zakresu parametrów sygnału wykorzystywanego do generacji zjawiska kawitacji akustycznej.

Generalnym celem przeprowadzonych badań wynikających z realizowanego projektu badawczego nad zjawiskiem kawitacji akustycznej w mineralnych olejach izolacyjnych jest ocena możliwości zastosowania jednego ze skutków tego zjawiska jakim jest emisja akustyczna do diagnostyki własności starzeniowych olejów izolacyjnych. W szerszym aspekcie wyniki tych badań stanowią również bazę dla prac badawczych w kierunku powiązania zjawiska kawitacji akustycznej, generacji wyładowań niezupełnych oraz zmian wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych w wyniku powstających pęcherzyków kawitacyjnych.

Praca finansowana ze środków na naukę jako projekt badawczy nr N N511 351137.

## 6. Literatura

- [1] Szmechta M.: Analiza zjawisk kawitacyjnych w olejach izolacyjnych, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, 12/2009.
- [2] Leighton T.: The Acoustic Bubble. Academic Press, London; 1994.
- [3] Maksimov A., Sosedko E.: Spectrum of acoustic cavitation. 5-th World Congress on Ultrasonics (2003), 7 September, France, s. 593-596.
- [4] Malewski R.: Transformatory w eksploatacji. Wydawnictwo Energo-Complex, Chorzów; 2005.
- [5] Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice; 1996.
- [6] PN-EN 60296:2007, Ciecze stosowane w elektrotechnice. Świeże mineralne oleje elektroizolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej.
- [7] PN-EN 61125:2002, Świeże ciecze izolacyjne na bazie węglowodorów. Metody badań do oceny stabilności utleniania.
- [8] Szmechta M., Boczar T., Zmarzły D., Aksamit P.: Acoustic emission measurements of ultrasound induced cavitation bubbles in aged insulating oils, Konferencja ISEI 2010, San Diego, USA, s.1-4.

otrzymano / received: 15.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany