

Marek SZMECHTA, Tomasz BOCZAR, Dariusz ZMARZŁY, Paweł AKSAMIT
POLITECHNIKA OPOLSKA,
ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

Badanie wpływu temperatury oleju mineralnego 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



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



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.

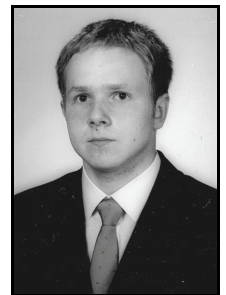
e-mail: t.boczar@po.opole.pl



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



Streszczenie

Tematyka podejmowana w artykule jest wynikiem cyklu prac badawczych dotyczących analizy zjawiska kawitacji ultradźwiękowej w mineralnych olejach izolacyjnych. Temperatura jest czynnikiem, który w znaczący sposób wpływa na większość parametrów charakteryzujących oleje izolacyjne. W pracy wykazano, iż temperatura cieczy izolacyjnej również wpływa na powstawanie i dynamikę zjawisk kawitacyjnych w niej występujących. W pracy skupiono się na analizie widmowej sygnału emisji akustycznej i zmianach w widmach rejestrowanych sygnałów.

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

Investigation of dependency of mineral insulating oil temperature on acoustic cavitation phenomenon

Abstract

The subject area of this paper is a result of research work concerning the analysis of ultrasonic cavitation phenomenon in mineral insulating oils. Temperature is a factor which influences significantly the majority of parameters characterizing insulating oils. This work shows that the insulating liquid temperature also affects formation and dynamics of cavitation phenomena generated in it. The study focuses on spectral analysis of the acoustic emission signal and changes in spectra of the recorded signals. There is also performed the assessment of changes in acoustic cavitation intensity factor as a function of the oil temperature. Before measurements the oil temperature was 85 °C. Then the acoustic emission accompanying cavitation was investigated for the following frequencies (100 kHz, 105 kHz, 110 kHz and 115 kHz) and RMS values (400 V, 600 V, 800 V) of the source signal. The used sampling rate was 1 MHz. During investigations of the temperature influence on the cavitation intensity factor values, characteristic step changes of the intensity factor values were observed. In spite of it, it is possible to observe the diminishing function temperature in the acoustic emission signal spectrum. The changes were observed for different source signal frequencies and RMS values. This effect can be clearly visible in Fig. 5. The most probable reason for it are violent changes of the acoustic emission signal spectrum caused by rapid transition from cavitation phenomenon to pseudocavitation and vice versa.

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

1. Wprowadzenie

Tematyka podejmowanych prac badawczych w niniejszej pracy dotyczy wykorzystania zjawiska kawitacji akustycznej w mineralnych olejach izolacyjnych. Ogólna idea prowadzonych prac polega na wykorzystaniu charakterystycznego dla zjawiska kawitacji szerokopasmowego szumu zwanego również szumem kawitacyjnym. Wytwarzanie zjawiska kawitacji w olejach izolacyjnych jest w literaturze naukowej niezwykle rzadko spotykane. Natomiast analiza samego szumu kawitacyjnego w cieczach wodnych zajmuje istotne miejsce w badaniach naukowych w kraju i za granicą od kilkadziesiąt lat. Powszechnie i stosunkowo dobrze poznane jest również zjawisko kawitacji wywołanej ultradźwiękami o dużym natężeniu [1].

Temperatura jest czynnikiem, który w znaczący sposób wpływa na większość parametrów charakteryzujących oleje izolacyjne. Temperatura wpływa na parametry elektryczne: przewodność, rezystywność, przenikalność elektryczna, współczynnik stratności dielektrycznej, elektryzując oraz parametry fizyko-chemiczne: lepkość, gęstość. Wraz ze wzrostem temperatury zmniejsza się również napięcie powierzchniowe [2, 3, 4, 5, 6].

Dlatego przyjęto, że temperatura powinna również wpływać na powstawanie i dynamikę zjawisk kawitacyjnych w olejach izolacyjnych.

2. Metodyka badań

W celu przeprowadzenia badań użyto systemu pomiarowego składającego się z następujących bloków funkcjonalnych:

- naczynie kawitacyjne,
- układ do generacji kawitacji akustycznej,
- podrzędny układ sterowania,
- układ pomiarowy emisji akustycznej,
- oprogramowanie nadzorujące proces pomiaru,
- oprogramowanie do analizy i wizualizacji danych pomiarowych.

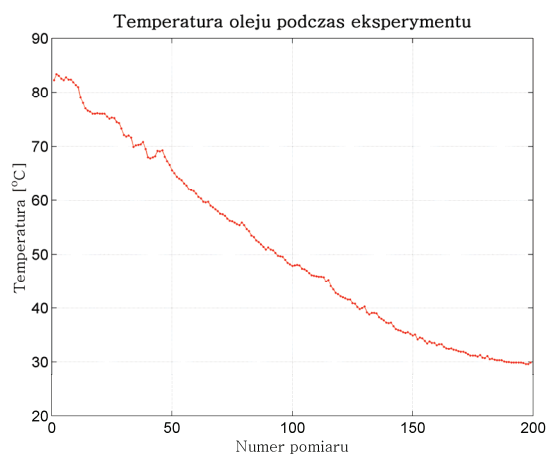
Więcej szczegółów dotyczących systemu pomiarowego zawarto w [7, 8].

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu zmian temperatury na dynamikę zjawisk kawitacyjnych w olejach izolacyjnych. Badania przeprowadzono dla świeżego oleju izolacyjnego. Zbadano wpływ wartości skutecznej napięcia i częstotliwości sygnału źródłowego na przebiegi czasowe sygnału emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji dla różnych temperatur oleju. Wyznaczono podstawowe parametry sygnału w dziedzinie częstotliwości m.in. widmo gęstości mocy oraz przyjęty wskaźnik intensywności kawitacji akustycznej [1].

Dokonano analizy widma sygnału akustycznego powstającego wskutek powstawania pęcherzyków kawitacyjnych. Badania przeprowadzono w następujący sposób:

1. Podgrzewano olej z temperatury 30 °C do 100 °C w czasie 15 min przy użyciu grzałki o mocy 1,5 kW w zewnętrznym naczyniu o pojemności 500 ml.
2. Podgrzany olej izolacyjny przelano do naczynia kawitacyjnego w postaci szklanej kolby okrągłodennej z przyklejonymi przetwornikami piezoelektrycznymi o pojemności 250 ml.
3. W celu wyrównania temperatur oleju i naczynia eksperyment rozpoczęto przy temperaturze wynoszącej 85 °C po okresie 5 min od jego napełnienia.
4. Podczas ostudzenia dokonywano pomiaru temperatury (200 kroków pomiarowych) co 15 sekund za pomocą miernika elektronicznego.
5. Ustawiono kolejne napięcie skuteczne sygnału: 400 V, 600 V, 800 V
6. Ustawiano częstotliwość pracy generatora źródłowego z następującego przedziału: 100 kHz, 105 kHz, 110 kHz i 115 kHz.
7. Za pomocą karty pomiarowej w każdym kroku pobierano 1 000 000 próbek sygnału emisji akustycznej z częstotliwością próbkowania 1 MHz.
8. Dla każdego wektora danych pomiarowych wyznaczono podstawowe parametry częstotliwościowe: gęstość widmową mocy oraz wskaźnik intensywności kawitacji akustycznej w postaci średniej gęstości mocy.
9. Zebranie danych trwało około 12 sekund dla wszystkich wymienionych wyżej kombinacji parametrów sygnału źródłowego, następnie odczekano 3 sekundy do kolejnego pomiaru.
10. Ogółem wykonano 2400 pomiarów po 1 000 000 próbek każdy.
11. Cały eksperyment trwał 50 min.
12. Temperatura końcowa oleju wyniosła 30 °C.

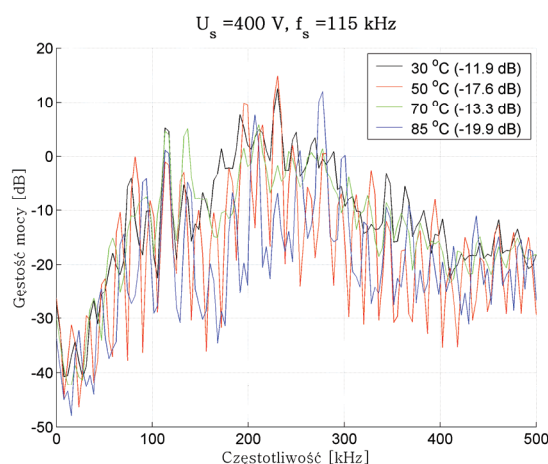
Zmiany temperatury oleju podczas eksperymentu obrazuje rysunek 1.



Rys. 1. Przebieg wartości temperatury oleju podczas eksperymentu
Fig. 1. Changes of oil temperature during the experiment

3. Ocena wpływu temperatury oleju

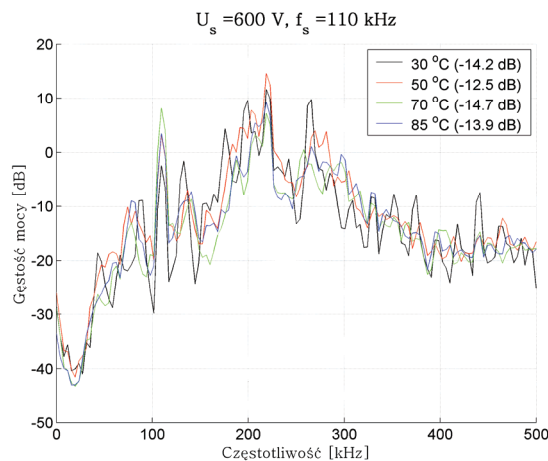
W niniejszym punkcie zaprezentowano wyniki analizy zmian przebiegu widma mocy sygnału emisji akustycznej dla wybranych par wartości parametrów sygnału źródłowego, przy których w temperaturze pokojowej osiągnięto najwyższe wartości wskaźnika intensywności kawitacji akustycznej. Wartości wskaźnika powyżej -20 dB można uznać za objaw silnie rozwiniętego zjawiska kawitacji akustycznej, najbardziej pożądanego z punktu widzenia diagnostyki olejów izolacyjnych. Silnie rozwiniętą kawitację zaobserwowano dla następujących par częstotliwości f_s i napięcia skutecznego U_s sygnału generowanego: 110 kHz i 600 V, 115 kHz i 400 V, 115 kHz i 600 V, 115 kHz i 800 V.



Rys. 2. Widma gęstości mocy sygnału emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji akustycznej dla częstotliwości sygnału źródłowego 115 kHz i wartości skutecznej 400 V

Fig. 2. Power spectrum density of acoustic emission signal of acoustic cavitation for source signal frequency of 115 kHz and rms value of 400 V

Na rysunku 2 przedstawiono widma gęstości mocy sygnału emisji akustycznej dla sygnału źródłowego o napięciu skutecznym $U_s = 400$ V i częstotliwości $f_s = 115$ kHz dla następujących temperatur oleju izolacyjnego: 30 °C, 50 °C, 70 °C, 85 °C. W legendzie pokazano wartości temperatur dla poszczególnych widm oraz wyznaczone na ich podstawie wartości wskaźnika intensywności kawitacji akustycznej podane w dB.

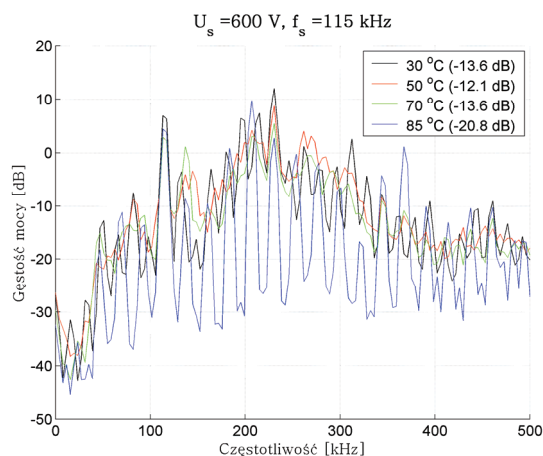


Rys. 3. Widma gęstości mocy sygnału emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji akustycznej dla częstotliwości sygnału źródłowego 110 kHz i wartości skutecznej 600 V

Fig. 3. Power spectrum density of acoustic emission signal of acoustic cavitation for source signal frequency of 110 kHz and rms value of 600 V

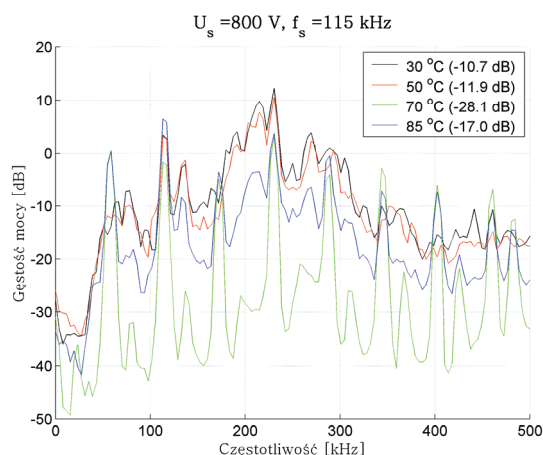
Kształt widma gęstości mocy dla silnie rozwiniętej kawitacji akustycznej przy temperaturze 30 °C ulega znacznym zmianom pod wpływem temperatury. Wyznaczone wartości wskaźnika kawitacji dla wyższych temperatur są wyraźnie mniejsze od uzyskanej dla temperatury 30 °C wartości równej -11,9 dB co sugeruje osłabienie zjawiska kawitacji w olejach izolacyjnych wraz ze wzrostem temperatury.

Interesujący jest rysunek 3 pokazujący przebieg widma akustycznego emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji wywołanej sygnałem o napięciu skutecznym 600 V i częstotliwości 110 kHz. Różnice pomiędzy poszczególnymi widmami są widoczne jednak trudno jednoznacznie określić tendencję ich zmian. Co ciekawe dla temperatury 50 °C osiągnięto wyższą wartość wskaźnika intensywności kawitacji równą -12,5 dB od tej dla temperatury pokojowej. W analizowanym przypadku nie dochodzi do zaniku zjawiska kawitacji akustycznej pod wpływem zmian temperatury.



Rys. 4. Widma gęstości mocy sygnału emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji akustycznej dla częstotliwości sygnału źródłowego 115 kHz i wartości skutecznej 600 V

Fig. 4. Power spectrum density of acoustic emission signal of acoustic cavitation for source signal frequency of 115 kHz and rms value of 600 V



Rys. 5. Widma gęstości mocy sygnału emisji akustycznej towarzyszącej kawitacji akustycznej dla częstotliwości sygnału źródłowego 115 kHz i wartości skutecznej 800 V

Fig. 5. Power spectrum density of acoustic emission signal of acoustic cavitation for source signal frequency of 115 kHz and rms value of 800 V

Na uwagę zasługuje również rysunek 4 pokazujący widma gęstości mocy sygnału emisji akustycznej kawitacji dla sygnału źródłowego o wartości skutecznej 600 V i częstotliwości 115 kHz. W tym przypadku dopiero dla najwyższych temperatur dochodzi do obniżenia wartości wskaźnika intensywności kawitacji poniżej -20,8 dB. Zmiany te zostały wywołane zanikiem szerokopasmowego szumu kawitacyjnego na rzecz licznych interharmonicznych powiązanych z częstotliwością podstawową wynikającą z sygnału wymuszającego o częstotliwości f_s .

Rysunek 5 przedstawia widma gęstości mocy emisji akustycznej generowanej przez zjawisko kawitacji dla najwyższej analizowanej wartości skutecznej napięcia równej 800 V. Wykres pokazuje istotnie zmiany w przebiegu widm dla temperatur powyżej 50 °C. Co ciekawe to dla temperatury 70 °C dochodzi do znacznego osłabienia zjawiska kawitacji akustycznej. Tymczasem dla temperatury 80 °C wartość wskaźnika kawitacji uległa zwiększeniu. Zaobserwować można również ponowne pojawienie się szerokopasmowego szumu kawitacyjnego.

4. Wnioski

Podczas badania wpływu temperatury na wartość wskaźnika intensywności kawitacji akustycznej zaobserwowano charakterystyczne skokowe zmiany wartości wskaźnika. Mimo występowania skokowych zmian w widmie sygnału, można w dalszym ciągu zaobserwować malejącą funkcję temperatury. Obserwacji tych dokonano dla różnych częstotliwości i wartości skutecznych sygnału źródłowego. Efekt ten widać wyraźnie na rysunku 5. Prawdopodobną przyczyną zachodzących zmian jest gwałtowny charakter zmian widma powodowany przejściem ze zjawiska kawitacji właściwej do pseudokawitacji i odwrotnie. W przyszłości warto dokonać oceny powtarzalności uzyskanych wyników i przedstawić uzasadnienie zachodzących zmian w dynamice zjawisk kawitacyjnych przy zmianie temperatury oleju izolacyjnego. Na uwagę zasługuje również ocena wpływu temperatury zastosowanego szerokopasmowego przetwornika pomiarowego na wyniki analizy sygnału towarzyszącego kawitacji akustycznej.

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

5. Literatura

- [1] Szmechta M.: Analiza zjawisk kawitacyjnych w olejach izolacyjnych, Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, 12/2009.
- [2] Adamczewski J.: Jonizacja i przewodnictwo ciekłych dielektryków. PWN, Warszawa; 1965.
- [3] Celiński Z.: Materiałoznawstwo elektrotechniczne. OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa; 2005.
- [4] Hycnar J.: Oleje izolacyjne w eksploatacji. WNT, Warszawa; 1969.
- [5] Kędzia J.: Electrostatic properties of aged transformer oil. IEEE Transaction on Electrical Insulation (1989), Vol. 24 (2), s. 175-178.
- [6] Rouse To: Mineral insulating oil in transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine (1998), Vol. 14 (3), s. 6-16.
- [7] Zmarzły D., Szmechta M., Investigation of acoustic emission generated by cavitation in insulating oils, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 54, Nr 2/2008, s. 64-66.
- [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.