

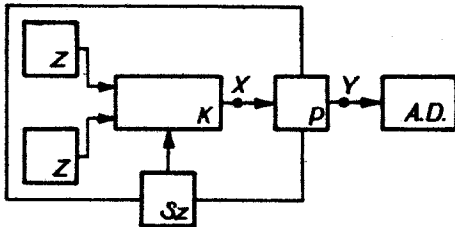
Jerzy Skubis

DOBÓR PRZETWORNIKA DO DETEKCJI WYŁADWAŃ NIEZUPEŁNYCH
W TRANSFORMATORACH METODA AKUSTYCZNA

1. Wprowadzenie

Wyładowaniom niezpełnym w izolacji towarzyszą między innymi efekty akustyczne. Emisja akustyczna generowana przez wyładowania niezpełne może więc być wykorzystana do ich detekcji i pomiaru ich intensywności [1].

Technikę detekcji wyładowań niezpełnych metodą akustyczną można przedstawić w postaci uproszczonego schematu podanego na rysunku 1.



Rys.1. Schemat układu pomiarowego

- Z - źródło zaburzeń generujące sygnał $u(t)$
- k - kanał akustyczny
- Sz - źródło szumów $s(t)$
- P - przetwornik
- A.D. - aparatura diagnostyczna
- X - sygnał $X(t)$ na wejściu przetwornika
- Y - sygnał $Y(t)$ na wyjściu przetwornika

Zaburzenie akustyczne jest wywołane mikroeksplozją gazów z oleju w kanale, plazmowym wyładowania. Powstałe drgania sprężyste ośrodka przynoszą się w postaci fali akustycznej w oleju oraz w innych materiałach konstrukcyjnych. Należy zauważyć, że w pracującym transformatorze istnieją trwałe źródła emisji akustycznej w postaci drgań magnetostrykcyj-

nych rdzenia, drgań elektrodynamicznych uzwojeń i drgań mechanicznych od wentylatorów. Tego typu emisja akustyczna stanowi zakłócenia w akustycznej metodzie detekcji wyładowań. Pomiar sygnałów akustycznych może być przeprowadzony w miejscach dostępnych dla umieszczenia przetwornika. Odbiornikami sygnałów akustycznych mogą być piezoelektryczne przetworniki ciśnienia /hydrofony/, umieszczone wewnątrz transformatora, lub piezoelektryczne przetworniki drgań /akcelerometry/ mocowane na kadzi transformatora. Z rysunku 1 wynika, że przetwornik mierzy wielkość $X(t)$, która jest sumą zniekształconego sygnału $U(t)$ i szumu $S(t)$. Dla poprawnego pomiaru sygnałów akustycznych od wyładowań niezupełnych w izolacji transformatorów zasadnicze znaczenie ma prawidłowy dobór przetwornika pomiarowego. Wybór przetwornika i miejsce pomiaru decydują o czułości metody detekcji wyładowań niezupełnych i o zakresie jej zastosowania [2,4].

2. Charakterystyka sygnałów akustycznych od wyładowań

Dobór odpowiedniego przetwornika przeznaczonego do detekcji wyładowań niezupełnych jest uzależniony od cech sygnału akustycznego w miejscu pomiaru.

Analiza sygnału akustycznego mierzonego wewnątrz kadzi jest najprostszą. Sygnał dobiegający do przetwornika jest sumą pierwotnego impulsu ciśnienia, ciągu impulsów odbitych od powierzchni elementów w kadzi i szumów

$$X(t) = U(t) + \sum U(t) + S(t) \quad (1)$$

Przebieg sygnału $X(t)$ można w przybliżeniu aproksymować ciągiem impulsów o stałej amplitudzie

$$X(t) = \sum_{n=1}^k U_n(t - n \Delta t) \quad (2)$$

Z teorii widm wiadomo, że widmo ciągu impulsów będzie równe sumie widm wchodzących w skład ciągu z tym, że każde kolejne widmo będzie przesunięte o $\exp(-jn \Delta t \omega)$.

Jeżeli $U(\omega)$ jest widmem impulsu $U(t)$, to widmo impulsu przesuniętego

o $n \Delta t$ będzie miało postać

$$U_n(\omega) = U_1 e^{-jn \Delta t \omega}$$

Stąd zespolone widmo ciągu ma postać

$$X(\omega) = U(\omega) \sum_{n=1}^k e^{-jk \Delta t \omega} = U(\omega) \frac{e^{-j \omega k \Delta t} - 1}{e^{-j \omega \Delta t} - 1} \quad (3)$$

Część rzeczywista widma zespolonego wyraża się wzorem

$$|X(\omega)| = U(\omega) \frac{\sin \frac{k \omega \Delta t}{2}}{\sin \frac{\omega \Delta t}{2}} \quad (4)$$

Przyjmując kosinusoidalny kształt impulsu $U(t)$

$$U(t) = \begin{cases} \frac{U_0}{T} \cos \frac{\pi}{T} t & \text{dla } -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{dla } |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (5)$$

równanie 4 wyraża się wzorem

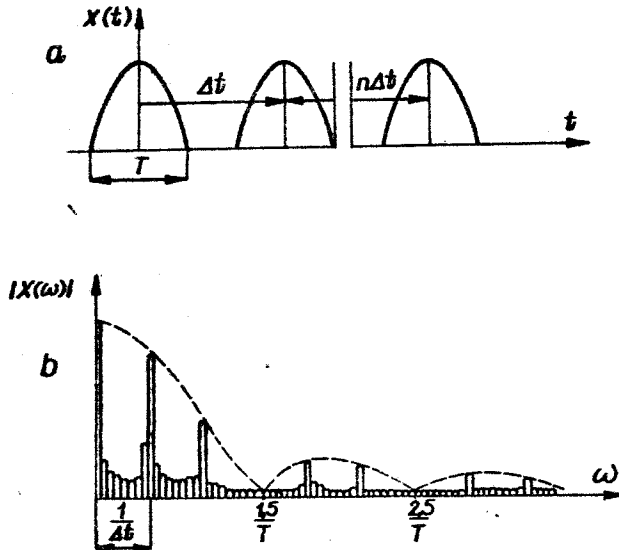
$$|X(\omega)| = 2 s \frac{\cos \frac{\omega T}{2}}{1 - \left(\frac{2}{T} \frac{\omega T}{2}\right)^2} \frac{\sin \left(\frac{k \omega \Delta t}{2}\right)}{\sin \left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right)} \quad (6)$$

Przebieg widma dla ciągu impulsów kosinusoidalnych przedstawiono na rysunku 2.

Obwiednia widma ciągu impulsów jest widmem pojedynczego impulsu. Główne pasmo częstotliwości leży w przedziale $0 < f < \frac{1,5}{T}$ i zawiera prawie 95 % energii impulsu.

Licząc, że czas trwania impulsu akustycznego wynosi około 5 s wi-
dać, że pierwsze przecięcie widma z osią częstotliwości ma miejsce
przy $f_0 = \frac{1,5}{T} = \frac{1,5}{5 \cdot 10^{-6}} = 300 \text{ kHz}$.

Chcąc odebrać całą energię sygnału, przetwornik musiałby mieć stałą charakterystykę częstotliwości pokrywającą pasmo częstotliwości sygnału. Ze względów praktycznych można stosować przetworniki o górnej częstotliwości granicznej rzędu $150 \div 200 \text{ kHz}$. Dla tego pasma częstotliwości przetwornika widmo sygnału mierzonego ma przebieg prawie stały.



Rys.2. Sygnał czasowy w postaci ciągu impulsów a/ i widmo ciągu impulsów dla $k = 8$ b/

Jeśli chodzi o wartość wyładowań niezupełnych w oleju wyrażoną w pC, to wiadomo, że wyładowania o ładunku pozornym $Q_p = 10$ pC są uważane za nieszkodliwe [3]. Natomiast wyładowania niszczące izolację mają wartość powyżej 1000 pC. Wyładowaniu w oleju o ładunku pozornym około 10 pC odpowiada ciśnienie $p = 1$ Pa, a wyładowaniu o ładunku pozornym rzędu 1000 pC ciśnienie $p = 10$ Pa.

Dostępne w kraju hydrofony przy tych wartościach ciśnienia dają odpowiednio: $100 \mu V$ i $1000 \mu V$. Po wzmożeniu wzmacniaczem szerokopasmowym o wzmożeniu 60 dB uzyskuje się 0,1 V lub 1 V, a więc wartości, które są łatwo rejestrowalne.

Znacznie większe trudności przedstawia analiza sygnału akustycznego odbieranego na zewnątrz kadzi. Przy rozpatrywaniu tego sygnału należy dodatkowo rozważyć zjawisko odbicia od ściany kadzi i przenikania fali ciśnienia przez stalową ściankę. Współczynnik odbicia fali ciśnieniowej

w oleju od powierzchni stalowej jest określony jako

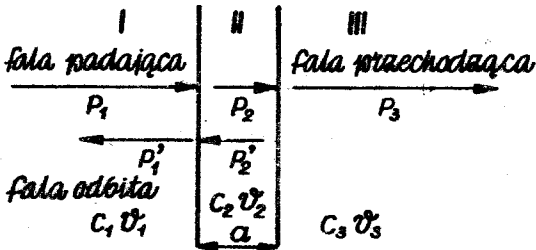
$$\beta_0 = \frac{c_1 v_1 - c_2 v_2}{c_1 v_2 + c_1 v_2}$$

gdzie: c_1 ; c_2 - gęstość właściwa oleju, stali,

v_1 ; v_2 - prędkość fali w oleju, stali,

$c \cdot v$ - impedancja falowa ośrodka.

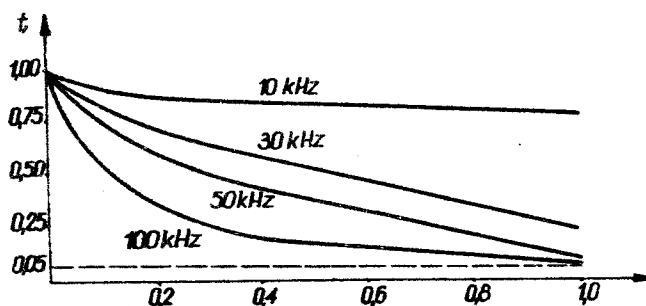
Dla oleju i stali $\beta_0 = 0,89$, z czego widać, że tylko 11 % energii fali przenika do ścianki stalowej i pobudza ją do drgań. Zjawisko przenikania staje się bardziej złożone, jeśli założy się, że ścianka ma określoną grubość, a fala ma możliwość przejścia do ośrodka za ścianką /np. do zbiornika z olejem/. Sytuację przedstawia rysunek 3.



Rys.3. Przenikanie fali ciśnienia przez ściankę kadzi

Współczynnik przenikania wyraża się wzorem $t = \frac{P_3}{P_1}$ i jest funkcją $2\pi a / \lambda$, a więc grubości ścianki i długości fali. Współczynnik przenikania fali powyższego przypadku przedstawiono na rysunku 4, przy założeniu, że obszar I i III stanowi olej, a obszar II stanowi stal.

Z rysunku widać, że dla zakresu częstotliwości 10 ÷ 100 kHz i grubości ścianki powyżej 1 cm wartość współczynnika przenikania może być rzędu 5 %. Zjawisko komplikuje się jeszcze bardziej, gdy fala pada ukośnie do powierzchni stalowej, gdyż wtedy powstają w ściance różne rodzaje fal, rozchodzące się z różnymi prędkościami.



Rys.4. Zmiana współczynnika przenikania fali akustycznej przez ściankę stalową i olej transformatorowy w zależności od grubości ścianki i częstotliwości fali

3. Analiza pracy przetworników i pomiar dostępnych wielkości akustycznych X , X_1 , X_2

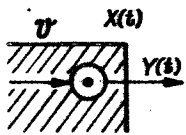
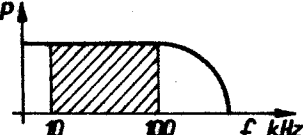
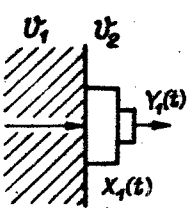

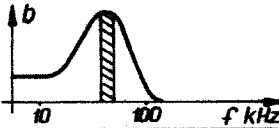
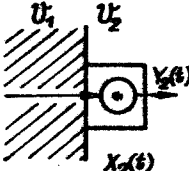
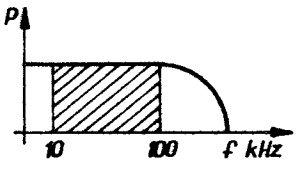
W tabelicy 1 podano zasadnicze sposoby usytuowania przetworników do detekcji wyładowań niezupełnych metodą akustyczną.

Najlepszym przetwornikiem do odbioru sygnałów akustycznych jest przetwornik zanurzeniowy hydrofon, którego charakterystyka częstotliwościowa jest płaska w przedziale częstotliwości $0 \div 150$ kHz. Czułość piezoelektrycznego hydrofonu jest wysoka, np. hydrofon B&K typ 8100 posiada czułość napięciową ok. $60 \mu\text{V}/\text{Pa}$. Tego rodzaju przetwornik umożliwia pomiar wyładowań niezupełnych w oleju rzędu kilku pC z odległości 1 m. Przetwornik tego typu musi być jednak wprowadzony do wnętrza transformatora, co łączy się z dużymi trudnościami, a mianowicie:

- z oddziaływaniem silnego pola magnetycznego, które indukuje się w przewodach doprowadzających siłę elektromotoryczną o częstotliwości 50 Hz, bardzo trudną do eliminowania,
- z obecnością hydrofonu w polu elektrycznym, co stanowi zagrożenie dla personelu i aparatury,
- wprowadzenie hydrofonu do wnętrza transformatora wymaga zmian w konstrukcji kadzi.

Tablica 1

Usytuowanie przetworników piezoelektrycznych oraz ich charakterystyki

Lp.	Sposób pomiaru	Usytuowanie przetwornika	Charakterystyka częstotliwościowa i obszar energii użytecznej	Typ wzmacniacza
1	Pomiar ciśnienia p-hydrofonem			szerokopasmowy
2	Pomiar przyspieszenia b-akcelerometrem mocowanym na ścianie kadzi			szerokopasmowy
				wąskopasmowy
3	Pomiar ciśnienia p-hydrofonem na zewnątrz kadzi			szerokopasmowy

Przetworniki stykowe, akcelerometry, mogą być łatwo mocowane na kadzi transformatora za pomocą magnesów stałych lub woskiem. Ich cechą charakterystyczną jest stosunkowo wąskie pasmo użytecznych częstotliwości $f = 20 \text{ kHz}$. Dla wyeliminowania szumów akustycznych stosuje się w układzie pomiarowym filtr odcinający pasmo do 10 kHz, rejestrowana energia sygnału na wejściu z przetwornika jest więc mała, a stosowanie wzmacniacza szerokopasmowego jest w tym przypadku niecelowe. Daleko lepsze wyniki daje stosowanie wzmacniaczy selektywnych dostrojonych do częstotliwości rezonansowej przetwornika, gdyż uzyskuje się wtedy

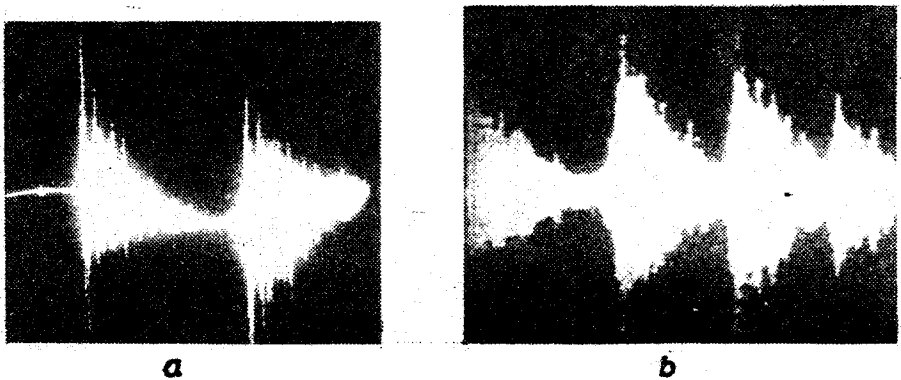
bardzo dużą czułość. Uzyskany sygnał elektryczny nie jest jednak proporcjonalny do sygnału akustycznego, ponieważ charakterystyka przenieszenia zależy w bardzo dużym stopniu od sprzężenia akustycznego przetwornika. Energia rejestrowanego sygnału jest odwzorowana powierzchnią pod charakterystyką przenoszenia, ale cała energia odpowiada powierzchni zawartej pod krzywą rezonansową.

Z tego względu sygnał uzyskany z akcelerometru przy selektywnym wzmocnieniu nie może być miarą intensywności wyładowania. Przetworniki stykowe odznaczają się jednak istotnymi zaletami:

- mogą być łatwo mocowane na zewnątrz transformatora,
- są wyekranowane od pola magnetycznego,
- nie stwarzają zagrożenia dla obsługi i aparatury,
- posiadają wysoką czułość.

4. Przykłady zarejestrowanych sygnałów

Przykładowe oscylogramy wyładowań niezupełnych występujących w transformatorach i przepustach transformatorowych poddanych próbom napięciowym przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. a/ Hydrofon Bc6K typ 8100 $x= 5$ ms/dz, $Y = 1$ V/dz. Wyładowania niezupełne na olejowej części izolatora przepustowego typu PKTnk 123/550/630
 b/ Przetwornik stykowy Bc6K typ 4332, $X = 5$ ms/dz, $Y=1$ V/dz
 Wyładowania w transformatorze mocy 8 MVA, prod. Elty

W trakcie pomiarów przetworniki hydrofonowe zatapiało do oleju na głębokość około 20 cm. Przetworniki stykowe mocowano magnetycznie do kadzi lub klejono woskiem do klosza porcelany. Sygnał z przetwornika poprzez wzmacniacz i filtr środkowo-przepustowy o paśmie przepuszczania $10 \div 100$ kHz rejestrowano na oscyloskopie z pamięcią. Zastosowanie filtru o takim paśmie przepuszczania powoduje eliminowanie zakłóceń typu magnetostrykcyjnego, zakłóceń mechanicznych i hałasów otoczenia [5,6].

5. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy i wykonanych badań wynikają następujące wnioski:

a/ do laboratoryjnych badań nadają się przetworniki zanurzeniowe, ze względu na pasmo przenoszenia stałe w szerokim zakresie częstotliwości,

b/ do detekcji i lokalizacji wylądowań niezupełnych nadają się przetworniki stykowe, akcelerometry,

c/ do ilościowych badań wylądowań niezupełnych występujących w transformatorach pracujących w eksploatacji należy skonstruować specjalny przetwornik, możliwy do zamocowania na zewnętrznej ścianie kadzi transformatora i posiadający elektryczne parametry hydrofonów.

LITERATURA

1. Anderson J.G.: Ultrasonic Detection and Location of Electric Discharges in Insulating Structures. Trans.Amer.Inst.Elect.Engrs. PT III: Power Apparatus System, December, 1956.
2. Broch J.T.: Mechanical Vibration and shock Measurements. The Application of the Brüel - Kjaer Measuring Systems. Neavum, Brüel Kjaer, Denmark 1973.

3. Skubis J.: Badanie wyładowań niezupełnych na modelu transformatora metodą akustyczną. Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, Elektryka nr 5 /w druku/.
4. Szuta J.: Analiza struktury sygnałów akustycznych od wyładowań niezupełnych w izolacji transformatorów mocy. Pr.Inst.El i Ster.Ukł. Pol.Sl. Gliwice 1977.
5. Szuta J., Skubis J.: Detekcja i lokalizacja wyładowań niezupełnych w izolacji transformatorów, kabli i przekładników wysokiego napięcia. Etap II. Prace ZPBE Energopomiar, Gliwice 1977.
6. Szuta J., Skubis J.: Detekcja i lokalizacja wyładowań niezupełnych w izolacji transformatorów, kabli i przekładników wysokiego napięcia. Etap III. Prace ZPBE Energopomiar, Gliwice 1978.

Summary

TRANSDUCER CHOICE FOR THE DETECTION OF PARTIAL DISCHARGES IN TRANSFORMERS BY MEANS OF THE ACOUSTIC METHOD

The paper presents features of acoustic signals generated by partial discharges occurring in the transformer insulation. Considered is the measurement of accessible acoustic quantities by means of piezoelectric transducers placed inside of the transformer or on the transformer tank. Presented are also measurement results. The suitability of the pressure and acceleration transducers for the detection and measurement of partial discharges in transformers has been analyzed.