

2.22 — akustyczne metody badania materiałów  
i układów mechanicznych

B. Gronowski, J. Ranachowski  
J. Skubis, J. Zalewski

POMIARY TLUMIENIA  
EMISJI AKUSTYCZNEJ  
OD WYLADOWAŃ ELEKTRYCZNYCH  
W MATERIAŁACH ELEKTROIZOLACYJNYCH

39/1986

P. 269

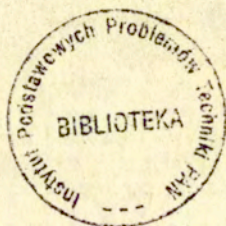


WARSZAWA 1986

<http://rcin.org.pl>

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 15 października 1986 r.



56850



Na prawach rękopisu

---

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Nakład 180 egz. Ark.wyd. 1,23 Ark.druk. 2,25  
Oddano do drukarni w listopadzie 1986 r.  
Nr zamówienia 617/86

---

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,  
ul. Śniadeckich 8



Bogusław Gronowski  
Instytut Elektrotechniki WSI w Opolu

Jerzy Ranschowski  
IPPT - PAN w Warszawie

Jerzy Skubis  
Instytut Elektrotechniki WSI w Opolu

Jan Zalewski  
ZWAR Z-1 w Warszawie

POMIARY TŁUMIENIA EMISJI AKUSTYCZNEJ OD WYŁADOWAŃ  
ELEKTRYCZNYCH W MATERIAŁACH ELEKTROIZOLACYJNYCH

Streszczenie

W pracy omówiono zagadnienia tłumienia sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych. Przedstawiono i przedyskutowano wyniki uzyskane przez innych autorów w różnych ośrodkach na świecie. Podkreślono niejednoznaczność i niespójność tych wyników. Zdefiniowano za pomocą schematu blokowego pojęcie tłumienia i odniesiono je do pojęcia osłabienia. Podano schematy trzech układów pomiarowych zaprojektowanych i wykorzystywanych przez autorów do pomiarów tłumienia. Pokazano ewolucję konstrukcji tych układów idącą w kierunku otrzymywania uniwersalnych wyników. Omówiono ograniczenia tych układów. Przedstawiono wyniki pomiarów uzyskane przez autorów. Podano średnie wartości amplitudowych współczynników tłumienia  $\alpha$  dla kilku materiałów stosowanych w konstrukcjach urządzeń elektroenergetycznych. Zbadano wpływ tych materiałów na zmianę amplitudy sygnałów emisji akustycznej oraz na wartości współczynników tłumienia  $\alpha$  w zależności od wartości napięcia generacji wyładowań niezupełnych.

## 1. WSTĘP

Dotychczasowy rozwój metody emisji akustycznej (EA) detekcji, pomiarów i lokalizacji wyładowań niezupełnych (wnz) zmierzał w kierunku budowy i rozwoju układów pomiarowych, opracowania metodyki pomiarów i sposobów interpretacji otrzymanych wyników [19]. Do nierozwiązanych zagadnień metody EA należy problem propagacji i tłumienia sygnałów EA wewnątrz mierzonego obiektu. Poznanie tych mechanizmów ma podstawowe znaczenie dla określenia korelacji między akustycznymi parametrami sygnałów w miejscu generacji i w miejscu odbioru. Niezbędna jest również do prawidłowej lokalizacji obszaru występowania wnz [11, 13, 19].

Podczas wyładowania niezupełnego część jego energii przekazywana jest w postaci sprężystej deformacji ośrodka czyli sygnału EA. Przemiana energii z jednej postaci w drugą zależy od typu wyładowania, jego wielkości i od ośrodka w którym występują [18]. Zależnie od tych czynników generowany sygnał EA ma różne parametry. Zależność opisująca tę przemianę nie jest znana. Przyjmuje się, że zależność ta jest liniowa, a więc powstający sygnał EA jest proporcjonalny do energii wnz [6].

Powstający od wyładowania sygnał EA rozprzestrzenia się wewnątrz urządzenia we wszystkich możliwych kierunkach. W obiektach elektroenergetycznych (np. w transformatorach, przekładnikach, kondensatorach, izolatorach itp.) nie występują ośrodki jednorodne. Z reguły bowiem w dielektryku ciekłym wypełniającym urządzenie znajdują się uzwojenia, obwody magnetyczne, połączenia, ekrany oraz inne elementy. Rozchodzące się w takich warunkach sygnały EA przenikają przez różne ośrodki. Rozprzestrzeniając się wewnątrz urządzenia podlegają prawom rozchodzenia się fal: pochłaniania, odbicia, załamania, ugięcia, rozbieżności, rozproszenia. Zjawiska te powodują rozmycie impulsu, tj. zmniejszenie stromości jego obwiedni i ewentualne przedłużenie czasu trwania impulsu przy równoczesnym zmniejszeniu jego amplitudy. W przypadku sygnału o widmie częstotliwościowym bardzo rozciągniętym, odbierany przez przetwornik sygnał składa się z sumy różnych elementarnych sygnałów, przy uwzględnieniu ich własnych



transmitancji.

Matematyczne ujęcie tych procesów jest możliwe jedynie na gruncie metod probabilistycznych. Dla zilustrowania ich złożoności można przedstawić matematyczny model procesu propagacji. Jego osnową może być wielowymiarowy układ w relacji wejścia (źródła sygnału EA) → wyjścia (przetworniki odbiorcze) schematycznie przedstawiony na rys. 1. Zależność pomiędzy sygnałem w miejscu generacji, w miejscu odbioru i odpowiedzią przetwornika, zgodnie z oznaczeniami jak na rys. 1, ujmują równania 1-4.

$$P(s) = A(s) \cdot P(s) \quad (1)$$

$$U(s) = T(s) \cdot P^*(s) \quad (2)$$

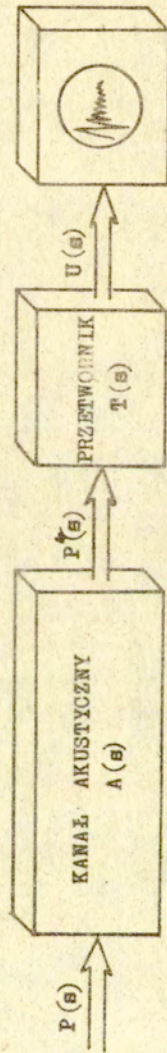
$$U(s) = T(s) \cdot A(s) \cdot P^*(s) \quad (3)$$

$$G(s) = T(s) \cdot A(s) \quad (4)$$

Związek między sygnałem na wyjściu przetwornika, a sygnałem w miejscu generacji ujmuje macierz transmitancji układu wielowymiarowego, która dla r źródeł i m przetworników ma postać:

$$G(s) = \begin{bmatrix} [G_{11}(s)] & [G_{12}(s)] & \dots & [G_{1r}(s)] \\ [G_{21}(s)] & [G_{22}(s)] & \dots & [G_{2r}(s)] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ [G_{m1}(s)] & [G_{m2}(s)] & \dots & [G_{mr}(s)] \end{bmatrix} \quad (5)$$

Przy znanej transmitancji przetwornika, problem sprowadza się do wyznaczenia macierzy transmitancji kanału akustycznego A(s). Ale nawet w najprostszym przypadku jednego źródła r=1 i jednego przetwornika m=1, zawiężającego problem do wyznaczenia macierzy [A<sub>11</sub>(s)] nie jest możliwe ściśle jej wyznaczenie. Staje się to możliwe jedynie przy szczególnych założeniach ograniczających, uwzględniających w procesie propagacji tylko sygnał główny (podstawowy) docierający ze źródła do przetwornika po najkrótszej drodze. Należy jednocześnie zaznaczyć, że najkrótsza droga sygnału może nie oznaczać wcale drogi po której sygnał dotrze najszybciej i z jak najmniejszymi stratami. Przy tak



Rys. 1. Wielowymiarowy model propagacji sygnałów EA w relacji wejścia (źródła sygnałów EA)  $\rightarrow$  wyjścia (przetworniki).



uproszczonym zagadnieniu dla określenia relacji między sygnałami w miejscu odbioru i generacji, jak również w metodach lokalizacji wnz, gdzie takie założenia czyni się powszechnie, nieodzowną staje się znajomość tłumienia sygnałów przez materiały, które sygnały spotykają na swej drodze od źródła do przetwornika.

Dla określenia zjawisk związanych z tłumieniem sygnałów EA od wnz przez pojedyncze materiały autorzy opracowali odpowiednie układy pomiarowe i wykonali badania.

Niniejsze opracowanie zamyka pierwszy etap badań autorów nad zagadnieniem tłumienia. Badania te będą kontynuowane.

## 2. DEFINICJE

Energia sygnału EA przechodzącego przez ośrodek zmniejsza się, a przez to maleje również jego ciśnienie akustyczne, zależnie od właściwości ośrodka. Mówimy że sygnał jest tłumiony.

W cienkiej warstwie ośrodka o grubości  $dl$ , w odległości  $l$  od początku przy stałym osłabieniu  $\alpha$  na jednostkę długości występuje względny spadek ciśnienia akustycznego zgodnie z równaniem

$$\frac{dP}{P} = -\alpha dl \quad (6)$$

Całkując to równanie, otrzymamy wyrażenie określające spadek ciśnienia akustycznego sygnału EA na drodze  $x$

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x} \quad (7)$$

$$\text{dla} \quad x \in \langle 0, 1 \rangle \quad (8)$$

gdzie:

$e$  - podstawa logarytmów naturalnych,

$P_0$  - początkowe ciśnienie akustyczne [Pa],

$\alpha$  - amplitudowy (ciśnieniowy) współczynnik tłumienia  
[Np. m<sup>-1</sup>],

l - całkowita droga sygnału EA [m].

Za miarę tłumienia przyjęć można także energetyczny współczynnik tłumienia  $\gamma$ , który opisuje względną zmianę natężenia sygnału EA, przypadającą na jednostkę długości. Wówczas natężenie sygnału w funkcji odległości możemy jednowymiarowo wyrazić za pomocą równania

$$I(x) = I_0 e^{-\gamma x} \quad (9)$$

(oznaczenia analogicznie jak dla równania (7)).

Tak określone współczynniki tłumienia związane są ze sobą zależnością

$$\gamma = 2\alpha \quad (10)$$

Tłumieniem sygnałów będziemy określać sumę zjawisk pochłaniania i rozpraszania. Pochłanianie jest wynikiem przemiany kinetycznej i potencjalnej energii ruchu drgającego na inne rodzaje energii (np. na ciepło). Rozpraszanie natomiast jest wynikiem kierowania energii sygnału w kierunkach innych, niż pierwotny kierunek rozchodzenia się sygnału, na skutek odbić, załamania i ugięć na nieciągłościach wewnętrznej struktury materiału (np. od granic ziaren). Potocznie tłumieniem nazywa się również wypadkowe osłabienie sygnałów spowodowane rozbieżnością i właściwym tłumieniem.

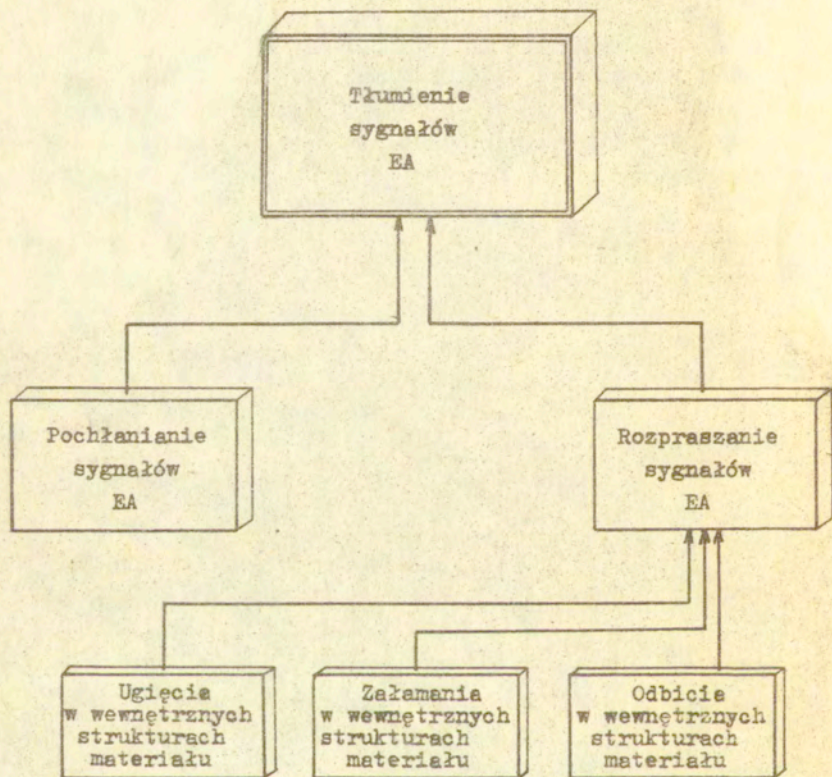
W dalszym ciągu osłabieniem natężenia sygnału spowodowanego fizyczną strukturą materiału będziemy nazywać sumę zjawisk tłumienia i rozbieżności.

Na natężenie sygnałów EA wpływa, poza ośrodkiem, w którym te sygnały się rozchodzą, czynnik "geometryczny" - rozbieżność wiązki sygnału. Czynnik ten należy wyeliminować z wyników pomiarów bądź przez pomiar w zakresie nierozbieżności wiązki sygnału, ale najczęściej przez odpowiednie pomiary różnicowe, bądź przez obliczenie wpływu rozbieżności.



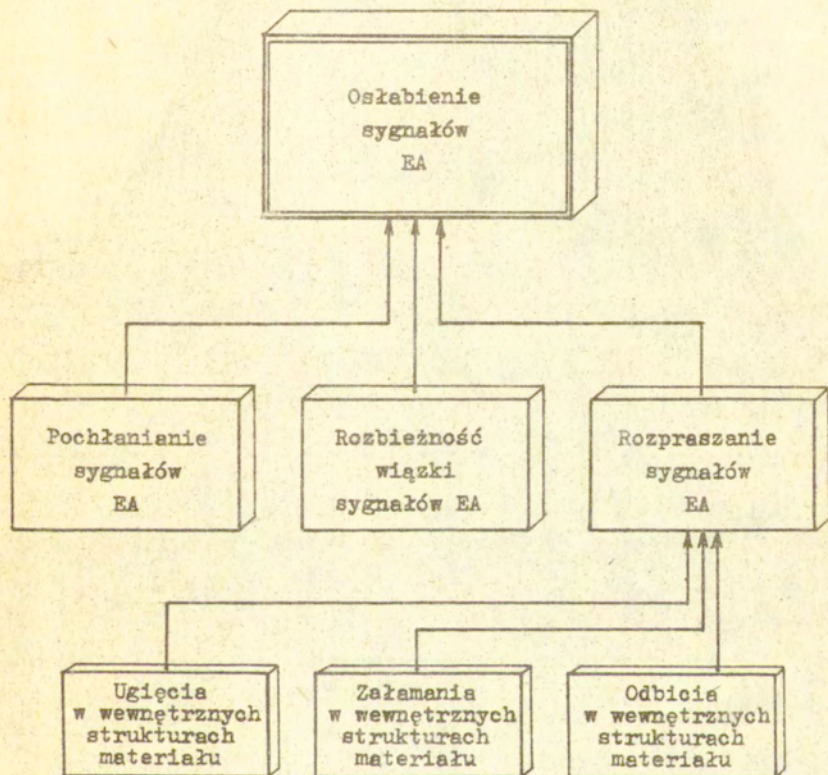
Dla zwizualizowania tak określonych pojęć tłumienia i osłabienia, a jednocześnie dla uchwycenia wzajemnej relacji między nimi najprostszym sposobem będzie podanie tych definicji w postaci schematów blokowych. Przedstawiono je na rysunkach 2 i 3.

Określenie wzajemnej relacji między tymi pojęciami jest szczególnie ważne. W literaturze dotyczącej tłumienia sygnałów EA od wnz terminy te są często stosowane zamiennie, co prowadzi do nieporozumień i wpływa na niejednoznaczność prezentowanych wyników pomiarów.



Rys. 2. Zjawiska fizyczne wpływające na tłumienie sygnałów EA od wnz w ośrodkach tłumiących.





Rys. 3. Zjawiska fizyczne wpływające na osłabienie sygnałów EA od wnz w ośrodkach tłumiących.

pojedynczych warstw badanych materiałów, a także złożonych ich układów np. zwiłek kondensatorowych.

Zasadniczą częścią układu pomiarowego jest poziomo ułożona, dźwiękochłonna rura (1) z podłużną szczeliną w górnej jej części. Rura posiada oba końce otwarte. Wewnątrz rury w jej osi, w pobliżu końców umieszczone są hydrofony (2) i (3). W osi rury w połowie jej długości znajduje się środek symetrii umieszczonego w tym miejscu iskiernika (5). W pobliżu hydrofonu (2), pomiędzy nim, a iskiernikiem (5) umieszczona jest poprzecznie przegroda (4) do zamocowywania w niej próbki badanego materiału. Wymaga się aby przekrój poprzeczny próbki materiału był większy od przekroju poprzecznego rury. Całość zatopiona jest w oleju (6) znajdującym się w wytłumionym akustycznie zbiorniku (7).

Do inicjowania w iskierniku (5) wyładowań elektrycznych korzystne jest zastosowanie układu elektrycznego składającego się z generatora udarów, iskiernika odcinającego i sterowanego iskiernika trójelektrodowego. Układ taki umożliwia wytwarzanie bardzo krótkich udarów (rzędu 1  $\mu$ s). Odpowiedź przetworników na takie wyładowanie ma kształt wykładniczo tłumionej sinusoidy i jest łatwa do interpretacji i analizy. Stwierdzić należy, że układ taki sprawiać może duże kłopoty pomiarowe poprzez zakłócenia pracy aparatury pomiarowej.

Dla zapewnienia warunku symetrii układu pomiarowego wymagane jest, aby droga kanału iskrowego przebiegała w osi symetrii iskiernika. W przypadku użycia iskiernika ostrze-płyta ostrze powinno być dodatnie.

Pomiar w układzie z rys. 6 polega na porównaniu maksymalnych amplitud i ewentualnie energii oraz rozkładów amplitudowo-częstotliwościowych sygnałów EA mierzonych przez hydrofon (2) po przejściu przez badany materiał z analogicznymi parametrami sygnałów przechodzących tylko przez olej a mierzonych hydrofonem (3). W związku z praktycznymi trudnościami w doborze hydrofonów o identycznych parametrach technicznych, wartości tych parametrów należy uwzględniać przy interpretacji i opracowaniu wyników pomiarów. Można to zrobić, albo na drodze obliczeń lub też stosując technikę pomiarów polegającą na



zamianie miejscami hydrofonów w czasie pomiarów dla określonej próbki materiału i uśrednienie wyników.

Układ ten posiada szereg zalet i jest pozbawiony wad układu z rys. 5. Zalety te są następujące:

1. Poziome ułożenie rury, szczelina w górnej jej części i umieszczenie całości w dodatkowym zbiorniku eliminuje pęcherze gazowe z jej wnętrza, także z bezpośredniego sąsiedztwa próbki materiału.

2. Symetryczne rozmieszczenie hydrofonów względem iskiernika zapewnia zbliżone warunki propagacji sygnału EA w obie strony. Pozwala to na nieuwzględnianie zjawiska rozbieżności przy wyznaczaniu współczynników tłumienia.

3. W układzie możliwy jest pomiar współczynników odbicia dzięki umieszczeniu przegrody w pobliżu hydrofonu (2). Powoduje to wydłużenie drogi sygnału odbitego od próbki i powracającego do hydrofonu (3). Łatwo można rozróżnić sygnał bezpośrednio docierający po wyładowaniu do tego hydrofonu i sygnał odbity.

4. Umieszczenie dźwiękochłonnej otwartej na końcach rury w akustycznie wytłumionym zbiorniku poniżej poziomu oleju pozwala na dokładniejsze odwzorowanie modelu jednokierunkowego pola akustycznego dzięki eliminacji pasożytniczych fal odbitych zarówno na granicy olej-powietrze jak też olej-elementy konstrukcyjne.

rozchodzenia się sygnałów EA, wzrost ten występuje już w niższych temperaturach. Przykładowo dla żył kabli elektroenergetycznych wzrost tłumienia w granicach od 50 do 80% jest zauważalny przy zmianie temperatury od 15 do 55° C [11]. Dla metali charakteryzujących się bardzo dużymi prędkościami rozchodzenia się sygnałów EA wzrost tłumienia jest zauważalny w wyższych temperaturach, praktycznie dopiero powyżej 200° C [9].

### 3.2. Tłumienie w cieczach

W cieczach tłumienie zależy głównie od strat  $\alpha_V$  wywołanych lepkością (tarcie wewnętrzne), a w mniejszym stopniu od strat  $\alpha_T$  powstających w wyniku przewodności cieplnej cieczy. Wyrazić to można wzorem

$$\alpha = \alpha_V + \alpha_T \quad (12)$$

Praktycznie dla cieczy, a szczególnie dla cieczy lepkich, straty  $\alpha_T$  powstające w wyniku przewodności cieplnej można zaniedbać w porównaniu ze stratami  $\alpha_V$  spowodowanymi lepkością.

$$\alpha_V \gg \alpha_T \quad (13)$$

Straty  $\alpha_V$  w cieczach są proporcjonalne do kwadratu częstotliwości  $f$  sygnału

$$\alpha_V = \Delta E_V f^2 \quad (14)$$

a współczynnik proporcjonalności  $\Delta E_V$  wynosi

$$\Delta E_V = \frac{8\pi^2 \eta}{3\rho c^3} \quad (15)$$



gdzie:

$\eta$  - współczynnik lepkości dynamicznej [Pa s],  
 $c$  - prędkość propagacji sygnału [m s<sup>-1</sup>],  
 $\zeta$  - gęstość cieczy [kg m<sup>-3</sup>].

Na podstawie zależności (12) do (15) otrzymujemy wyrażenie na obliczenie wartości współczynnika tłumienia

$$\alpha = \frac{8\pi^2\eta}{3\zeta c^3} f^2 \quad (16)$$

(oznaczenia według wzoru (15)).

### 3.3. Tłumienie w gazach

W gazach tłumienie również zależy od strat  $\alpha_v$  wywołanych tarciami wewnętrznymi oraz od strat  $\alpha_T$  powstających w wyniku przewodności cieplnej gazu. Współczynnik tłumienia  $\alpha$  wyrazić można zatem przy pomocy zależności (12). W gazach wartości obu składowych tłumienia są tego samego rzędu, tak więc

$$\alpha_v \approx \alpha_T \quad (17)$$

Współczynnik tłumienia  $\alpha$  dla gazów można wyrazić wzorem

$$\alpha = [\Delta E_v + \Delta E_T] f^2 = \frac{2\pi^2}{\zeta c^3} \left[ \frac{4}{3}\eta + \lambda_T \left( \frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] f^2 \quad (18)$$

gdzie:

$\Delta E_T$  - straty energii wywołane przewodnością cieplną,  
 $\lambda_T$  - współczynnik przewodności cieplnej [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>],  
 $c_v$  - ciepło właściwe przy stałej objętości [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>],  
 $c_p$  - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>],

(pozostałe oznaczenia według wzoru (15)).

Należy zaznaczyć, że wartości współczynnika  $\alpha$  uzyskiwane z pomiarów są większe niż obliczone na podstawie zależności (18) [9]. Tłumaczy się to stratami relaksacyjnymi, które powodują dla gazów odchylenie kwadratowej zależności tłumienia od częstotliwości.

#### 4. WYNIKI BADAŃ INNYCH AUTORÓW

W początkowym okresie rozwoju metody EA jako wartości tłumienia sygnałów EA przez materiały konstrukcyjne urządzeń elektroenergetycznych przyjmowano wartości wyznaczone dla ultradźwiękowych fal sinusoidalnych [8]. W następnym etapie wykonywano badania tłumienia rzeczywistych sygnałów EA od wnz przez ekrany z badanych materiałów wstawiane między źródłem sygnałów a przetwornikiem [8, 12].

W pracy [8] określono tłumienie sygnałów EA od wnz przez różne materiały stosowane w konstrukcjach transformatorów. Wartości tego tłumienia odniesione do tłumienia EA w oleju wynoszą:

- blacha stalowa	13,0 dB/cm
- miedź	9,0 dB/cm
- tektura falista	4,1 dB/cm
- tektura pełna	4,6 dB/cm
- papier nasycony olejem	0,6 dB/cm

Niestety autorzy tej pracy nie zdefiniowali bliżej pojęcia tłumienia, jak również nie opisali układu pomiarowego i sposobu pomiarów, co uniemożliwia ilościowe porównanie przytoczonych wyników z wynikami osiągniętymi przez innych autorów.

W pracy [5] przedstawiono wyniki pomiarów osłabienia EA na skutek odbić sygnałów EA między różnymi materiałami elektrotechnicznymi. Wyniki te wraz z parametrami akustycznymi badanych materiałów ujęte w formie tablicy tablica II zostały tu przytoczone dla porównania wyników uzyskanych przez autorów.

W oparciu o wyniki przedstawione w tablicy II można teoretycznie określić wielkość tłumienia sygnałów EA po przejściu



Tablica II

Współczynniki odbicia między różnymi materiałami elektrotechnicznymi [5]

Materiał	Prędkość propagacji fal $\times 10^3$ m/s	Gęstość materiału $g/cm^3$	Rezystancja akustyczna	Procent odbitej energii											
				Powietrze	Olej tr.	Woda	Ebonit	Bakelit	Polistyren	Szkło org.	Szkło	Brąz	Guma	Stal	
Aluminium	6,35	2,69	0,71	100	74	72	52	42	51	45	0,7	16	16	20	0
Stal	5,83	7,7	4,53	100	89	88	78	73	78	74	27	0,5	0,5	0	0
Guma	4,40	8,93	3,93	100	88	87	75	69	75	71	21	0	0	0	0
Brąz	4,64	8,54	3,96	100	88	87	76	69	75	71	22	0	0	0	0
Szkło	5,57	2,6	1,45	100	70	67	46	36	45	39	0	0	0	0	0
Szkło org.	2,82	1,18	0,333	100	20	16	0,9	0,2	0,7	0	0	0	0	0	0
Polistyren	2,67	1,06	0,283	100	14	11	0,22	2	0	0	0	0	0	0	0
Bakelit	2,59	1,4	0,363	100	23	19	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Ebonit	2,30	1,2	0,276	100	13	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Woda	1,43	1,0	0,143	100	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olej trans.	1,39	0,92	0,128	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Powietrze	0,331	0,0012	0,00004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

przez przegrody wykonane z różnych materiałów. Określone w ten sposób wartości mają jedynie charakter szacunkowy gdyż nie uwzględniają geometrii przegród. W związku z tym na podstawie tych wyników nie można dokładnie określić wytłumienia sygnałów EA przez złożone układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych.

Przy analizie uzyskanych wyników wielkości tłumienia sygnałów EA od wnz należy także odnotować ciekawe, a nawet zaskakujące wyniki przedstawione w innych pracach.

Według autorów pracy [7] przegrody izolacyjne niezależnie od materiału z którego są wykonane tylko w bardzo nieznacznym stopniu powodują tłumienie odbitych sygnałów. W świetle później uzyskanych rezultatów i analizy fizyki zjawisk [2, 3, 17] pogląd ten można uznać za niesłuszny. W pracy [4] podaje się że w pobliżu źródła (do 30 cm), tłumienie w oleju jest proporcjonalne do odległości, a w dalszych odległościach do kwadratu tej odległości. W pracy [3] ten sam autor podaje rozszerzone wyniki dotychczasowych badań. Według niego w oleju z pęcherzykami gazowymi tłumienie jest proporcjonalne do odległości, a w oleju bez pęcherzyków do pierwiastka czwartego stopnia z wartości odległości. Z pracy [10] wynika, że tłumienie jest proporcjonalne do odległości nie tylko w oleju, ale również w innych materiałach konstrukcyjnych transformatorów. Natomiast z pracy [16] wynika, że tłumienie jest proporcjonalne do odległości i nie zależy od rodzaju źródła, przy czym badania te obejmowały wyładowania z ostrza, wyładowania ślizgowe i wyładowania w pęcherzykach powietrza w odległościach do 60 cm.



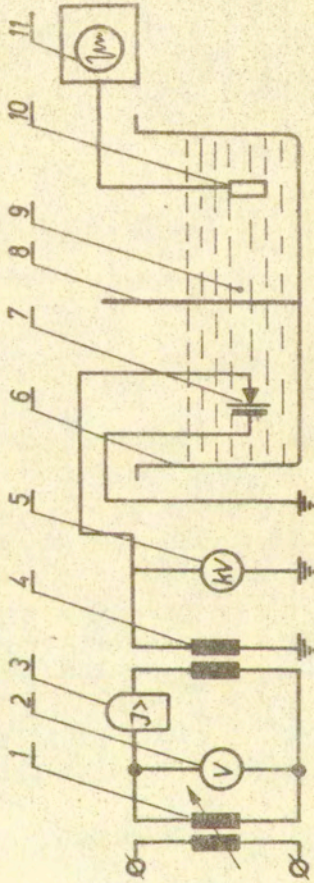
## 5. UKŁADY POMIAROWE DO WYZNACZANIA TŁUMIENIA EMISJI AKUSTYCZNEJ OD WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

W celu określenia parametrów tłumienia EA od wnz zaprojektowano i wykonano trzy różne układy pomiarowe. Schemat pierwszego układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4.

Z autotransformatora (1), poprzez układ zabezpieczający (3) zasilano transformator wysokiego napięcia (4). Napięcie na transformatorze wysokiego napięcia mierzono woltomierzem elektrostatycznym (5). Z transformatora (4) zasilano iskiernik ostrze-płyta (7), ze szklaną płytką między elektrodami. Po doprowadzeniu wysokiego napięcia do iskiernika (7), na szkle występowały wyładowania niezupełne typu ślizgowego. Model obiektu stanowiła kadź (6), wypełniona olejem (9). W jednym końcu kadzi zatapiano w oleju iskiernik (7), a na drugim końcu umieszczano przetwornik pomiarowy (10). Między iskiernikiem (7) i przetwornikiem pomiarowym (10), na drodze sygnału od miejsca generacji do punktu odbioru, umieszczano przegrody poprzeczne (8), wykonane z materiałów, dla których wyznaczano współczynniki tłumienia. Sygnały odbierane przez przetwornik rejestrowano bezpośrednio na oscyloskopie z pamięcią (11).

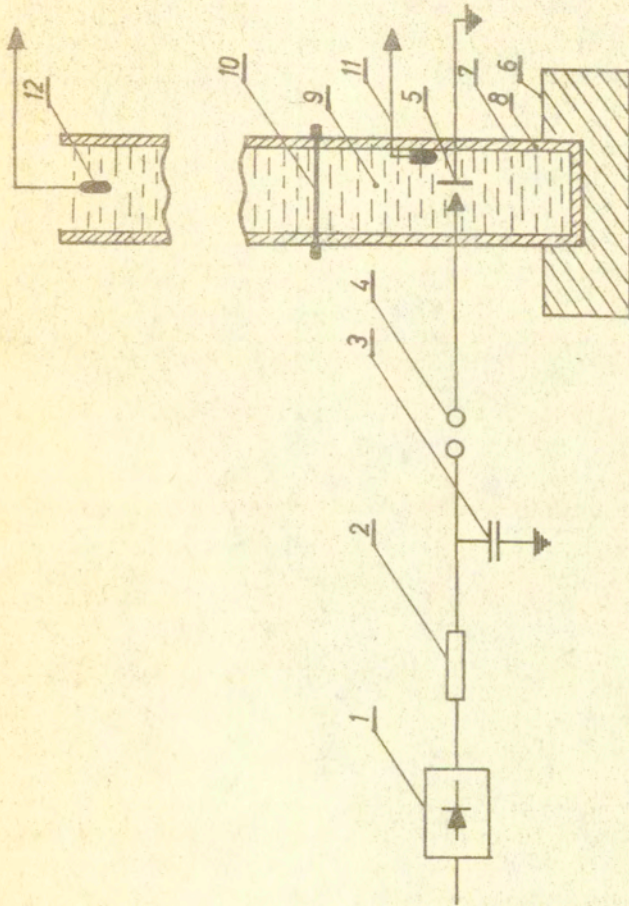
Podstawowa wada układu przedstawionego na rys. 4. polega na tym, że wartości współczynników tłumienia zależą od wzajemnego położenia iskiernika symulującego wnz (7) i przetwornika pomiarowego (10). Celem wyeliminowania tego ograniczenia skonstruowano ulepszony układ, w którym warunki propagacji EA od wnz są niezmiennie [14]. Jego schemat przedstawiono na rys. 5.

Z układu prostowniczego (1), poprzez rezystancję (2), ładowany jest kondensator (3). Po naładowaniu kondensatora odłącza się źródło napięcia stałego i zwierając iskiernik kulowy (4), kondensator rozładowuje się. Po zwarceniu iskiernika kulowego (4), na iskierniku ostrze-płyta (5) występuje wyładowanie zupełne. Wyładowaniu towarzyszy emisja fali akustycznej o stosunkowo dużej energii. Fala ta rozchodzi się w modelu jednokierunkowego pola akustycznego, który stanowi rura (7),



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego do określenia współczynników tłumienia różnych materiałów. Opis budowy i działania układu w tekście.





Rys. 5. Schemat układu rurowego do wyznaczenia współczynników tłumienia EA od wzn. Opis budowy i działania układu w tekście

ze ściankami wyłożonymi materiałem dźwiękochłonnym (8). Dla skutecznego przenoszenia fali ciśnieniowej, cały układ wypełniony jest olejem (9). W połowie wysokości rury (7), wmontowana jest przegroda z materiału (10), dla którego wyznaczano współczynniki tłumienia. Amplitudę sygnału w miejscu generacji mierzy się hydrofonem (11), natomiast amplitudę sygnału przenikającego przez przegrode (10) - hydrofonem (12).

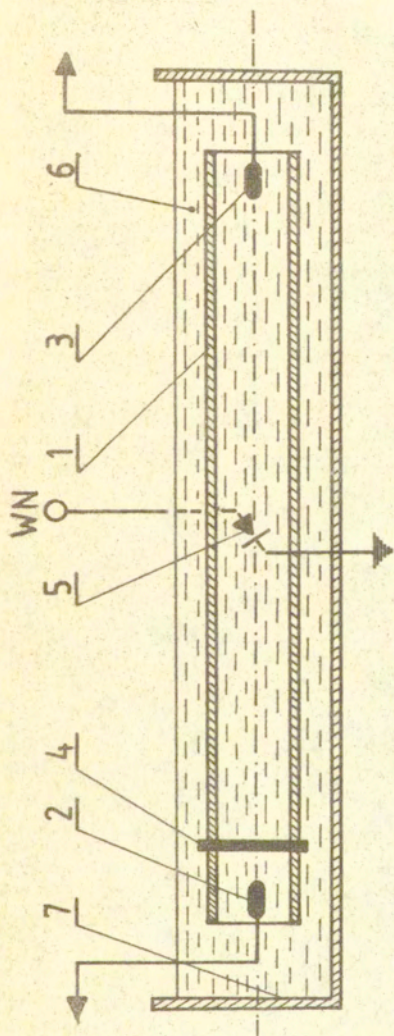
W przedstawionym na rys. 5 układzie do przetwornika (12) docierają jedynie sygnały EA rozprzestrzeniające się w rurze równoległe do jej osi wzdłużnej a więc przechodzące przez badaną próbkę prostopadle do jej powierzchni. Fale o kierunkach nierównoległych zostają pochłonięte przez materiał dźwiękochłonny (8) którym wyłożone są od wewnątrz ścianki modelu.

Mimo zapewnienia niezmiennych warunków propagacji także i ten układ posiada pewne wady. Pierwsza z nich dotyczy umieszczenia w pobliżu iskiernika (5) hydrofonu (12). Dla zmierzenia wartości sygnału EA w miejscu generacji należy hydrofon ten umieścić jak najbliżej źródła wyładowań, a najlepiej naprzeciwko geometrycznego środka iskiernika. Powoduje to jednak zmianę warunków propagacji i zniekształcenie wyników. Wadę układu stanowi także możliwość powstawania poduszek gazowych, zbierających się pod powierzchnią badanego materiału zarówno podczas napełniania rury olejem każdorazowo przy zmianie próbki, jak również powstających podczas wykonywania pomiarów na wskutek wyładowań iskrowych w oleju.

Przy wyznaczaniu współczynników tłumienia w tym układzie należy uwzględnić wytłumienie sygnału EA w warstwie oleju pomiędzy hydrofonami. Można tego uniknąć eliminując z pomiarów przetwornik (11), a pomiarów dokonywać tylko przetwornikiem (12), przy czym porównuje się wówczas jego wskazanie dla przypadków przechodzenia sygnału EA przez badaną próbkę i bez niej lub też przy przechodzeniu sygnału EA przez różnej grubości próbki tego samego materiału.

W pracy [1] zaproponowano istotne modyfikacje układu rurowego z rys. 5. Schemat układu przedstawiono na rys. 6. Układ ten pozwala na prosty bezpośredni pomiar współczynników tłumienia i odbicia. Umożliwia określenie współczynników tłumienia





Rys. 6. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania współczynników tłumienia i odbicia dla pojedynczych materiałów i złożonych układów. Opis układu w tekście.

### 3. MECHANIZMY TŁUMIENIA SYGNAŁÓW EMISJI AKUSTYCZNEJ OD WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH

Zasadniczo różny charakter mechanizmów tłumienia sygnałów EA od wnz dla różnych stanów skupienia materii sprawia, że zjawiska te zostaną omówione oddzielnie dla ciał stałych, ciekłych i gazowych.

#### 3.1. Tłumienie w ciałach stałych

W ciałach stałych tłumienie jest wywołane zarówno pochłanianiem i rozpraszaniem, a współczynnik tłumienia  $\alpha$  opisany jest za pomocą sumy współczynników: pochłaniania  $\alpha_p$  i rozpraszania  $\alpha_r$  [9]

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_r \quad (11)$$

Pochłanianie energii sygnałów EA w ciałach stałych zachodzi jako wynik tarcia wewnętrznego, strat hysteretycznych, płynięcia plastycznego oraz zjawisk relaksacyjnych. Dla większości ciał stałych tłumienie wywołane pochłanianiem jest proporcjonalne do częstotliwości fal. Pochłanianie dla fal podłużnych jest większe niż dla poprzecznych, ze względu na adiabaticzne zmiany objętości tych pierwszych.

W materiałach niejednorodnych, a zwłaszcza polikrystalicznych, jakimi są metale, przeważający wpływ na wartość współczynnika tłumienia mają straty rozproszeniowe, przy czym ten rodzaj strat zależy od stosunku długości fali  $\lambda$  do średniego rozmiaru ziarna  $d_{sr}$  struktury polikrystalicznej. Przybliżone wartości współczynnika tłumienia  $\alpha$  dla ciał polikrystalicznych w zależności od wartości stosunku średniego rozmiaru ziarna do długości fali przedstawiono w tabelicy I.

Tłumienie zależy także od temperatury. Wynika to z tego, że odpowiednie wielkości fizyczne z tabelicy I są funkcjami temperatury. Tłumienie zwiększa się w wyższych temperaturach, przy czym wóśrodkach o mniejszych wartościach prędkości



Tabela I

Szacunkowe zależności na współczynnik tłumienia  $\alpha$  dla ciał stałych polikrystalicznych przy różnych wartościach stosunku średniego rozmiaru ziarna do długości fali [9]

Ip	Przedział stosunku $d_{\text{gr}}/\lambda$	Wzór na współczynnik tłumienia $\alpha$ $\alpha = \alpha_p + \alpha_r$	Nazwa typu rozpraszania	Uwagi
1	$\ll 1$ (0,016 ; 0,16)	$\Delta E_p f + \Delta E_r f^4$	Rayleigha	$\Delta E_r \approx d_{\text{gr}}^3$ przy czym dla małych $f$ $\Delta E_r \ll \Delta E_p$
2	$\leq 1$ (0,16 ; 1,0)	$\Delta E_p f + \Delta E_r f^2$	probablistyczne	$\Delta E_r \approx d_{\text{gr}}$
3	$> 1$ (1,0 ; 10)	$\Delta E_p f + \Delta E_r f^2$	dyfuzyjne	$\Delta E_r \approx d_{\text{gr}}^{-1}$
4	$\gg 1$ ( $> 10$ )	$\Delta E_p f + \Delta E_r f^2 + R_{\text{gr}} d_{\text{gr}}^{-1}$	-	$\Delta E_r \approx d_{\text{gr}}^{-1}$

Objasnienia :  $\Delta E_p$  - straty energii wywołane pochłoniem ;  $\Delta E_r$  - straty energii wywołane rozpraszaniem ;  $d_{\text{gr}}$  - średni rozmiar ziarna polikrystalicznego ;  $R_{\text{gr}}$  - średni współczynnik odbicia od granicy ziaren ; pozostałe objaśnienia w tekście.

## 6. OGRANICZENIA UKŁADÓW RUROWYCH

Rury stanowią element akustyczny o stałych rozłożonych. Stanowią więc akustyczny odpowiednik elektrycznych linii długich, a zachodzące w nich zjawiska akustyczne mają charakter falowy, podobnie jak w otwartej przestrzeni. Ścianki rury wyłożone od wewnątrz materiałem dźwiękochłonnym zmieniają warunki propagacji fal. W takim przypadku w równaniu fali przesunięcia cząstki należy uwzględnić wpływ tarcia, poprzez wprowadzenie współczynnika lepkości  $\eta$ . Równanie to ma postać [20]

$$\left[ 1 + r^{-1} (2\eta)^{\frac{1}{2}} (\omega \rho_0)^{-\frac{1}{2}} \right] \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \left[ r^{-1} (2\omega \eta)^{\frac{1}{2}} \rho_0^{-\frac{1}{2}} \right] \frac{\partial \xi}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (19)$$

przy czym:

$r$	- promień rury	[ m ],
$\rho_0$	- gęstość środowiska	[ kg/m <sup>3</sup> ],
$c$	- prędkość fali	[ m/s ],
$\omega$	= $2\pi f$ - częstotliwość kątowna	[ s <sup>-1</sup> ],
$\eta$	- współczynnik lepkości dynamicznej	[ Pa s ]

Równanie to nie uwzględnia dodatkowych strat od wymiany ciepła między miejscami zgęszczonego i rozrzedzonego środowiska występujących szczególnie dla rur o dużym przekroju.

W związku z tym o ile układ taki spełnia wymagania dotyczące jednokierunkowości pola akustycznego dzięki wytkumieniu w warstwie dźwiękochłonnej fal EA rozprzestrzeniających się w kierunkach nierównoległych do osi wzdłużnej rury to jednak nie zapewnia warunku jego bezdyspersyjności. Wynika to z tego że rozpatrujemy wiązkę fal podłużnych podlegającą ograniczeniom przez ściany rury, a nie wiązkę w ośrodku nieograniczonym. Ściany rury wpływają na prędkość propagacji fal i zakres przenoszonych częstotliwości. Rurę wyłożoną od wewnątrz materiałem dźwiękochłonnym należy traktować jako model z boczną powierzchnią swobodną, w którym mogą się rozchodzić tylko dyspersyjne postacie fal podłużnych ograniczone od strony nis-



kich częstotliwości częstotliwościami odcięcia. Przybliżoną wartość częstotliwości odcięcia dla określonej średnicy rury obliczyć można z następującej zależności [15]

$$f \approx 0,77 \frac{c_{\infty}}{d} \quad (20)$$

gdzie:

- $c_{\infty}$  - prędkość grupowa sygnału w ośrodku nieograniczonym
- $d$  - wewnętrzna średnica rury

Przykładowo dla rury o średnicy wewnętrznej 14 cm wypełnionej olejem transformatorowym dla którego  $c_{\infty} \approx 1400 \frac{m}{s}$  na podstawie zależności (20) otrzymujemy wartość częstotliwości odcięcia wynoszącą w przybliżeniu 7700 Hz. Takie ograniczenie od strony dolnej częstotliwości nie powinno mieć praktycznie większego znaczenia, gdyż w pomiarach EA od wnz w urządzeniach elektroenergetycznych będących w eksploatacji użyteczne pasmo częstotliwości ogranicza się od strony niskich częstotliwości zazwyczaj do wartości 20 kHz, ze względu na eliminację zewnętrznych zakłóceń akustycznych.

Natomiast dla danej częstotliwości odcięcia  $f$  średnica rury powyżej której możliwa jest propagacja fal określona jest wzorem

$$d \approx 0,77 \frac{c_{\infty}}{f} \quad (21)$$

Dla rury wypełnionej olejem transformatorowym i częstotliwości  $f = 20$  kHz z zależności (21) otrzymujemy wynik  $d \approx 5,4$  cm. Jest to zarazem najmniejsza średnica rury która nie ogranicza od dołu pasma przenoszenia wykorzystywanego w praktyce.

## 7. WYNIKI POMIARÓW

W układzie przedstawionym na rys. 4 wykonano pomiary współczynników tłumienia dla przegród z następujących materiałów:

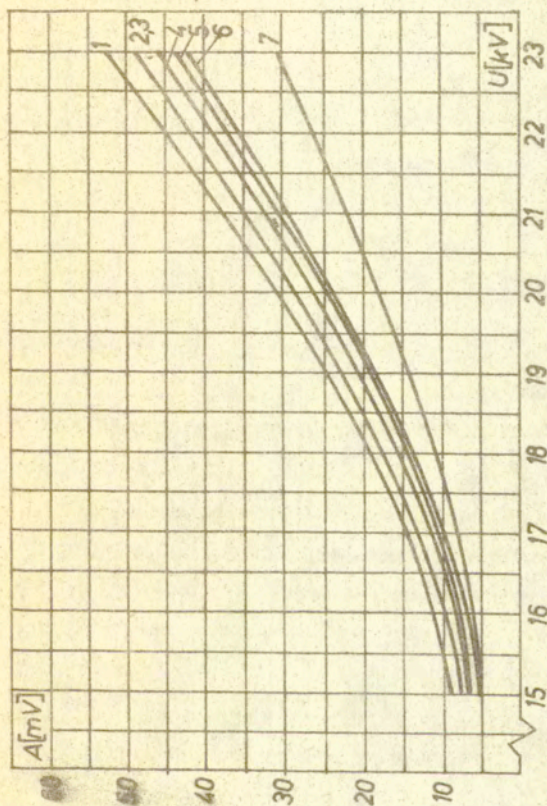
- stali /d = 1,5 mm/,
- ceratki izolacyjne /d = 0,2 mm/,
- szkła / d = 2 mm/,
- preszpanu /d = 0,5 mm i d = 3 mm/,
- bakelitu /d = 2,5 mm/.

Pomiary wykonano w ustalonej temperaturze otoczenia 20°C. Celem wyeliminowania możliwości dojścia fali akustycznej do przetwornika z ominięciem przegród, wykonano je w ten sposób, aby ściśle przylegały do ścian modelu. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rys. 7 i 8 oraz w tablicy III [12]. Rozrzut wyników pomiarowych przedstawionych w tablicy III obliczono metodą t-Studenta, z prawdopodobieństwem P = 95 %.

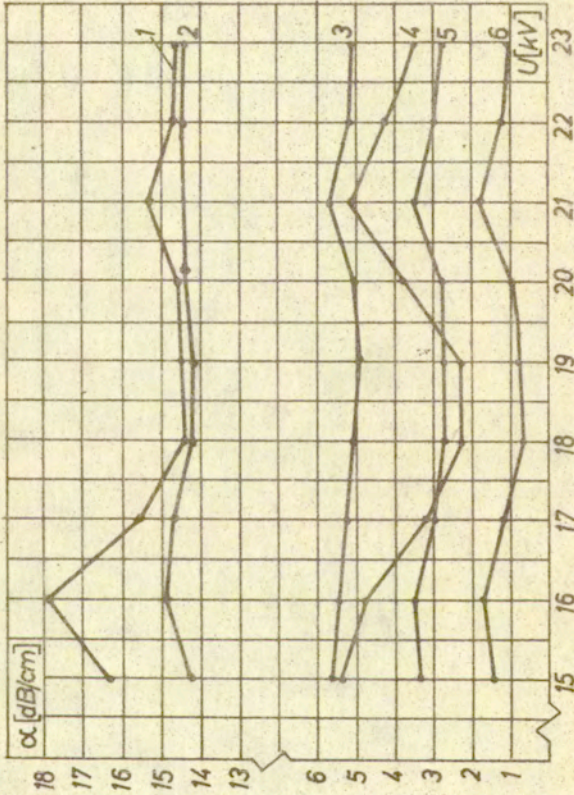
Zależność amplitudy tłumionego sygnału akustycznego w funkcji napięcia generacji wnz jest krzywą zbliżoną do wykładniczej. Kształt krzywej zależy w niewielkim stopniu od rodzaju i grubości materiału, z którego jest wykonana przegroda.

Wyniki pomiarów tłumienia uzyskane w układach przedstawionych na rys. 5 i 6 są aktualnie opracowywane i zostaną przedstawione w najbliższym czasie.





Rys. 7. Zmiany amplitud sygnałów akustycznych mierzone w ukłedzie z przegrodami wykonanymi z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji wyładowań [12]. 1 - bez przegrody, 2 - przegroda stalowa, 3 - przegroda z ceratki izolacyjnej, 4 - przegroda szklana, 5 - przegroda z preszpanu o grubości 0,5 mm, 6 - przegroda z bakelitu, 7 - przegroda z preszpanu o grubości 3 mm.



Rys. 8. Wartości współczynnika tłumienia  $\alpha$  dla przegród wykonanych z różnych materiałów, w funkcji napięcia generacji wyładowan [12].  
1 - przegroda z preszpanu o grubości 0,5 mm, 2 - przegroda z preszpanu o grubości 3 mm, 3 - przegroda z bakelitu, 4 - przegroda z ceratki izolacyjnej, 5 - przegroda szklana, 6 - przegroda stalowa.



Tabela III

Średnie wartości współczynników tłumienia  $\alpha$ , dla przegród wykonanych z różnych materiałów. [12].

Lp.	Rodzaj badanego materiału	Średnia wartość współczynnika $\alpha$ , dB/cm	Różnica między wartością maks. i minimalną	Rożrzut wyniku
1.	Stal	1,16	1,12	1,16 - 0,286
2.	Szkoło	3,06	0,85	3,06 - 0,224
3.	Ceratka izolacyjna	4,17	4,29	4,17 - 1,11
4.	Bakelit	5,24	0,84	5,24 - 0,217
5.	Preszpan 3 mm	14,43	0,77	14,43 - 0,199
6.	Preszpan 0,5 mm	15,20	3,00	15,20 - 0,776

### 8. PODSUMOWANIE

Przedstawione układy (rys. 4, 5, 6) umożliwiają określenie tłumienia sygnałów EA w dielektrykach i materiałach konstrukcyjnych stosowanych w budowie urządzeń wysokiego napięcia. Układ przedstawiony na rys. 4 jest najprostsz, ale pomiary tłumienia wykonywane w tym układzie mogą dawać wyniki niejednoznaczne. W układzie rurowym (rys. 5) warunki propagacji sygnałów EA od wnz są konstrukcyjnie zdeterminowane. Geometria układu i akustyczne wyciszenie rury powodują, że do przetworników pomiarowych dociera jedynie główny sygnał akustyczny generowany przez wyładowanie. Sygnał ma kształt wykładniczo tłumionej sinusoidy (fot. 1). Wadę tego układu (rys. 5) stanowi możliwość wnikania do oleju pęcherzyków powietrza, które mogą znacznie zawyżyć wartości współczynników tłumienia. Drugie ograniczenie stanowi możliwość badania tylko cienkich przegród. Wad tych pozbawiony jest układ przedstawiony na rys. 6 głównie poprzez poziome ułożenie rury w dodatkowym zbiorniku olejowym. Symetria układu pozwoliła na znaczne uproszczenie pomiarów i zmniejszenie błędów pomiarowych, dzięki możliwości wykonywania tzw. pomiarów różnicowych. Układ ten umożliwia również pomiar współczynników odbicia. Stwarza również możliwości pomiarów dla pojedynczych przegród o dowolnej grubości, a także bardziej złożonych układów konstrukcyjnych.

Wartości współczynników tłumienia  $\alpha$ , określone w układach przedstawionych na rys. 4, 5 i 6 wyraźnie zależą od rodzaju badanego materiału. Materiały o niskim współczynniku sprężystości (prespan, papier bakelizowany) mają współczynniki tłumienia o około 1 rząd wyższe od współczynników tłumienia materiałów o wysokim współczynniku sprężystości (stal). Rozrzut wartości współczynników tłumienia  $\alpha$ , w funkcji napięcia generacji wnz wynosi 8 % dla przegród grubych i do 26 % dla przegród cienkich. Amplitudy sygnałów akustycznych przenikających przez przegrody wykonane z materiałów najbardziej niekorzystnych dla propagacji fal, są około 40 % mniejsze niż amplitudy sygnałów nietłumionych.



Przedstawione wyniki umożliwiają przybliżoną ocenę zjawisk związanych z tłumieniem sygnałów EA od wnz. Dla dokładniejszego rozeznania tych zjawisk należy kontynuować pomiary zarówno w przedstawionych układach jak również sposobami klasycznymi. Z punktu widzenia metody EA trudno jest obecnie zdecydowanie stwierdzić, czy dla lokalizacji wnz bardziej przydatne są współczynniki tłumienia wyznaczone klasycznymi metodami stosowanymi w technice ultradźwiękowej, czy wyznaczone w pomiarach dla sygnałów rzeczywistych. Te ostatnie, mierzone w dotychczas stosowanych układach pomiarowych charakteryzują się bowiem stosunkowo dużym rozrzutem wyników. Nadzieje na poprawę tej sytuacji należy wiązać ze stosowaniem w pomiarach układów rurowych. Wydaje się jednak, że najbardziej wartościowe rezultaty mogą dać pomiary dla rzeczywistych układów izolacyjno-konstrukcyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Ponadto ocenę współczynników tłumienia należy prowadzić w oparciu o analizę widma częstotliwościowego.

Uzyskane wyniki współczynników tłumienia pomagają w rezultacie zlokalizować obszar występowania wnz i ocenić przybliżoną wartość amplitudy sygnału EA w miejscu generacji. Umożliwia to szacunkową ocenę wnz pod kątem skutku tego wyłączenia na degradację dielektryka.

LITERATURA

- [ 1 ] Gronowski B.: Sposób i układ do wyznaczania współczynników tłumienia i odbicia sygnałów emisji akustycznej od wyładowań elektrycznych zwłaszcza dla materiałów elektroizolacyjnych. Zgłoszenie patentowe PRL nr P-251353.
- [ 2 ] Harrold R.T., Dakin T.W., Marcier G.E.: Ultrasonic sensing of partial discharges within microfarad value AC capacitors. IEEE Trans. PAS, vol. - 98, nr 2, 1979.
- [ 3 ] Harrold R.T.: The relationship between ultrasonic and electrical measurements of under - oil corona sources. IEEE Trans. El. Ins., vol. - 11, 1976, str. 8-11.
- [ 4 ] Harrold R.E.: Ultrasonic spectrum signatures of under-oil corona sources. IEEE Trans El. Ins., vol. EI 10, nr 4, 1975.
- [ 5 ] Kewaguchi Y., Yanabu S., Honda M., Ikeda M.: Some considerations and locating methods for coronas in transformers. El.En.Jap., vol. - 91, nr 3, 1971, str. 29-37.
- [ 6 ] Kreuger F.H.: Discharge detection in high voltage equipment. Heywood Book, London, 1964.
- [ 7 ] Morel J.F., Wind G.: Detection et localisation des décharges partielles par ultrasons. RGE, vol. - 79, nr 1, 1970, str. 52-57.
- [ 8 ] Moro P., Poittevin J.: Localisation des decharges partielles dans les transformateurs par detection des ondes ultrasonores emises. RGE-26, vol. - 87, nr 1, 1978.
- [ 9 ] Obraz J.: Ultradźwięki w technice pomiarowej. WNT, Warszawa, 1983.
- [10] Ogihara H.: Detection and location of coronas in oil - immersed transformer with corona detector. El.Eng.Jap., vol. - 84, nr 9, 1964, str. 12-21.



- [11] Roskosz R.: Propagacja fal akustycznych w żyłach w zastosowaniu do lokalizacji uszkodzeń kabli energetycznych. Sesja nauk. Pol. Gdańskiej, cz. I, Gdańsk, 1985, str. 168-179.
- [12] Skubis J.: Attenuation measurements of partial discharge acoustic signals. Conf. Emiscon '83, CSSR, 1983, str. 77-80.
- [13] Skubis J.: Ocena wyładowań niezupełnych w izolacji urządzeń elektroenergetycznych metodą emisji akustycznej. Zeszyty Naukowe WSI w Opolu, nr 107, z. 24 Elektryka, Opole, monografia, 1986.
- [14] Skubis J.: Układ do wyznaczania parametrów sygnałów akustycznych od wyładowań elektrycznych w urządzeniach z izolacją papierowo - olejową. Patent PRL nr 235470.
- [15] Wehr J.: Pomiar prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych. WNT, Warszawa, 1972.
- [16] Wrocławski J.: Ultradźwiękowa lokalizacja źródeł wyładowań w transformatorach olejowych. Konferencja: Insulation Problems in Power Transformers. Łódź, 1984, t. - 1, str. 297-308.
- [17] Yakov S., Honey C.C., Madin A.S., Keil C.: Corona in power transformers. Report CIGRE, nr 12-06, Paryż, 1968.
- [18] Zalewski J., Skubis J.: Comparative measurement of partial discharges in power capacitors by an acoustic and by an electric method. Report CIGRE, nr 15-05/84-35, Paryż, 1984.
- [19] Zalewski J., Skubis J., Gronowski B.: Measurement of attenuation of electric discharge acoustic emission. Report CIGRE, nr 15-05/85-27, Berlin Zach., 1985.
- [20] Żyszkowski Z.: Podstawy elektroakustyki. WNT, Warszawa, 1984.