

Wincenty Pajewski  
**CHARAKTERYSTYKA  
SKUTECZNOŚCI MIKROFONU  
PIEZOELEKTRYCZNEGO  
KULISTEGO**

24/1967

**WARSZAWA**



Na prawach rękopisu  
Do użytku wewnętrznego

---

Zakład Badania Drgań IPPT PAN Nakład 150 egz.  
Arkuszy wyd. 0,9. Arkuszy druk. 1,73. Oddano do druki  
karni w listopadzie 1967 r. Wydrukowano w styczniu  
1968 r. Nr Zam. 1021/o/67

---

W.D.N. Warszawa, ul. Śniadeckich 8

**CHARAKTERYSTYKA SKUTECZNOŚCI MIKROFONU  
PIEZOELEKTRYCZNEGO KULISTEGO**

**1. Wstęp**

Pomiar natężenia pola ultradźwiękowego nie przedstawia większych trudności, o ile mamy do dyspozycji mikrofon odpowiedniej jakości o znanej charakterystyce skuteczności i kierunkowości.

Dokładne określenie tych charakterystyk mikrofonu jest zagadnieniem podstawowym i trudnym.

Istniejące metody cechowania mikrofonów są bardzo precyzyjne i mogą być stosowane tylko w ograniczonych zakresach częstotliwości.

Najbardziej uniwersalną metodą, która pozwala na cechowanie w zakresie częstotliwości większych od 100 kHz, jest metoda rury uderzeniowej, jednakże dla uzyskania zadowalającej dokładności pomiaru muszą być spełnione określone warunki odnoszące się do kształtu i stromości czoła fali uderzeniowej.

Aby wybrać właściwą metodę cechowania mikrofonu dobrze jest wiedzieć z góry na podstawie rozważań teoretycznych, jaka jest w ogólnych zarysach charakterystyka skuteczności mikrofonu i od jakich parametrów jest ona zależna. Ułatwi to też racjonalne wstępne zaprojektowanie mikrofonu na określony zakres częstotliwości.

W dziedzinie pomiarów pól ultradźwiękowych o dużym natężeniu, coraz szersze zastosowanie znajdują mikrofony piezoelektryczne, których głównymi zaletami są: znaczna wytrzymałość mechaniczna, niewrażliwość na wilgoć i zanieczyszczenia ośrodka, w którym wykonujemy pomiary, pyłami, substancjami żrącymi i t.p.

Pomiar natężenia pola ultradźwiękowego takim mikrofonem sprowadza się do określenia napięcia na jego końcówkach za pomocą dokładnego miernika elektrycznego.

Tego rodzaju sposób pomiaru ze względu na swoją prostotę ma duże znaczenie praktyczne przy badaniach i zastosowaniu ultradźwięków, zarówno w laboratoriach jak i zakładach przemysłowych.

Mikrofon piezoelektryczny ponadto pozwala na ciągłą rejestrację natężenia pola ultradźwiękowego oraz automatyzację kontroli procesów technologicznych wykorzystujących ultradźwięki.

Właściwości mikrofonów piezoelektrycznych a w szczególności ich charakterystyki skuteczności, nie są dostatecznie znane wśród użytkowników, szczególnie że w literaturze przedmiotu istnieją pewne sprzeczności w ocenie zakresu częstotliwości w jakim może być stosowany dany mikrofon piezoelektryczny.

Przyjmuje się, że ograniczenia co do zakresu częstotliwości wynikają głównie z rezonansów mikrofonu i że charakterystyki

styka skuteczności mikrofonu jest płaska aż do częstotliwości najniższego rezonansu, którym jest rezonans radialny, w przypadku mikrofonu kulistego. 3

Można też spotkać się z twierdzeniem, że przesuając rezonans radialny w kierunku wyższych częstotliwości, na przykład przez wprowadzenie rdzenia z metalu do kuli lub cylindra piezoelektrycznego, automatycznie rozszerza się zakres częstotliwości mikrofonu.

Podjęte w I.P.P.T. badania pozwoliły na bardziej precyzyjne wyjaśnienie tych zależności i stwierdzenie, że główną przyczyną ograniczającą zakres częstotliwości charakterystyki skuteczności są rozmiary mikrofonu.

Korekcje charakterystyki skuteczności przez odpowiednie ustawienie rezonansów własnych mikrofonu jakkolwiek możliwe, jest rzeczą trudną i wymaga dokładnej znajomości stałych materiałowych mikrofonu i zależnych od nich częstotliwości rezonansowych.

## 2. Czynniki wpływające na skuteczność i charakterystykę skuteczności mikrofonów piezoelektrycznych

Przedmiotem rozważań będzie mikrofon piezoelektryczny kulisty, który ze względu na swój kształt posiada charakterystykę wszechkierunkową w przypadku, gdy średnica kuli jest mniejsza od długości fali w ośrodku.

W praktyce często obserwuje się, w przypadku mikrofonów piezoelektrycznych kulistych, zniekształcenie charakterystyki kierunkowości wywołane niejednorodnym materiałem, z którego wykonana jest kula, asymetrią konstrukcji i t.p.

Zniekształceń tych nie będziemy omawiali, wychodząc z założenia, że są one spowodowane niedoskonałą technologią, wykonywaniem kuli ceramicznej, a która jest ciągle ulepszana.

O ile chodzi o charakterystykę skuteczności takich mikrofonów to ograniczymy się tylko do przypadku fali płaskiej swobodnej ze względu na trudności rachunkowe jakie wiążą się z rozważeniem bardziej skomplikowanego kształtu fali.

Przypadek fali płaskiej ma też duże znaczenie praktyczne odpowiadając bowiem pomiarom w zbiornikach otwartych lub bezodbiciowych.

Fala płaska przychodzi do różnych punktów mikrofonu z różnicą faz i amplitudy, powoduje to nierównomierny rozkład ciśnienia na jego powierzchni, zależny od długości fali padającej, co ma wpływ na charakterystykę skuteczności mikrofonu.

Z drugiej strony fala ta wywołuje zaburzenie w elemencie piezoelektrycznym, które rozchodzi się w sposób skomplikowany zależny od kształtu i rozmiarów elementu, jego elastycznej oporności właściwej, rezonansów własnych i t.p. Czynniki te kształtują charakterystykę skuteczności, ich wpływ jest różny i będzie stanowił między innymi przedmiot badań.

Przechodząc do bezwzględnej wartości skuteczności mikrofonu musimy stwierdzić, że w zastosowaniach praktycznych jest ona ważnym elementem, wpływającym na dokładność pomiaru ultradźwięku mikrofonem.

Duża skuteczność mikrofonu pozwala na pomiary słabych pól ultradźwiękowych, oraz pól w ośrodkach o akustycznej oporności właściwej niedopasowanej do oporności akustycznej mikrofonu, na przykład w gazach.

Skuteczność mikrofonu piezoelektrycznego kulistego zależy od własności użytego materiału piezoelektrycznego i jest proporcjonalna do średnicy kuli a odwrotnie proporcjonalna do grubości ścianki kuli. [1]

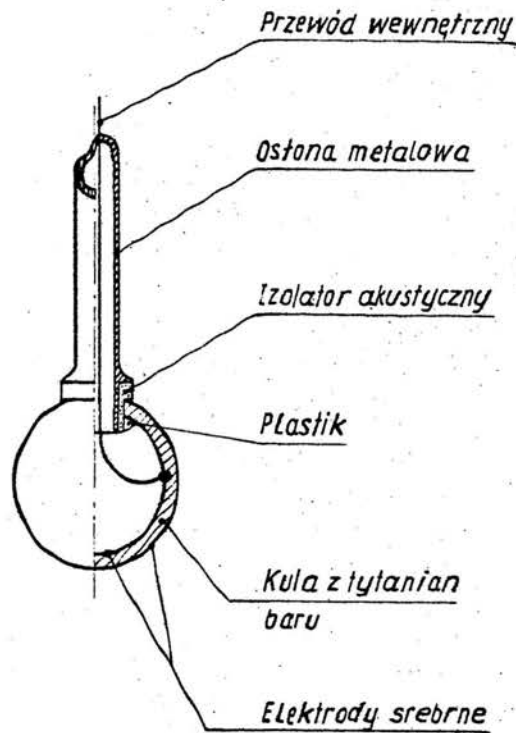
Z drugiej strony zwiększenie rozmiarów kuli i zmniejszanie grubości ścianki wpływa niekorzystnie na charakterystykę skuteczności mikrofonu.

Określenie optymalnych rozmiarów kuli w celu uzyskania maksymalnej skuteczności przy niezniekształconej charakterystyce skuteczności jest rzeczą dużej wagi.

Mikrofon piezoelektryczny kulisty jest źródłem napięcia elektrycznego proporcjonalnego do ciśnienia akustycznego. Kwadratowa zależność natężenia pola ultradźwiękowego od ciśnienia akustycznego sprawia to, że błąd pomiaru ciśnienia akustycznego podwaja się przy obliczeniu natężenia pola ultradźwiękowego. Skuteczność zatem mikrofonu dla danej częstotliwości musi być określana z najwyższą możliwą dokładnością z uwzględnieniem wpływu zmian temperatury, ciśnienia statycznego oraz starzenia się ceramiki.

W przypadku ceramiki z cyrkonio tytanu ołowiu wpływ tych czynników jest nieznaczny, należy jednak uwzględnić go w przypadku mikrofonu z tytanu beru.

### 3. Charakterystyka skuteczności mikrofonu kulistego w polu fali płaskiej



Rys.1 - Przekrój mikrofonu piezoelektrycznego kulistego

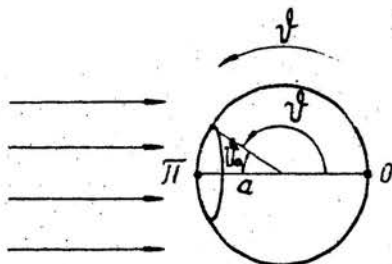
Na rysunku 1 pokazano przekrój mikrofonu piezoelektrycznego kulistego. Fale padające na mikrofon powoduje odkształce-



nie kuli, co prowadzi do wytworzenia ładunku elektrycznego na elektrodach pokrywających kulę. Napięcie, powstające na elektrodach mikrofonu, jest proporcjonalne do całkowitego ładunku wytworzonego na kuli, ten zaś jest sumą ładunków wytworzonych na elementach powierzchni kuli poddanych działaniu ciśnienia o rozkładzie zależnym od stosunku średnicy kuli do długości fali.

Można przyjąć w rezultacie, że napięcie wyjściowe mikrofonu jest proporcjonalne do średniego ciśnienia  $p_s$ , działającego na kulę.

Ciśnienie  $p_s$  dla fali płaskiej możemy obliczyć, całkując na powierzchni kuli ciśnienie  $p_a$  działające na poszczególne elementy kuli i dzieląc wynik całkowanie przez powierzchnię kuli.



Rys.2 - Oznaczenie współrzędnych dla kuli umieszczonej w polu fali płaskiej

Ciśnienie  $p_a$  panujące w dowolnym punkcie kuli o współrzędnej katowej sferycznej  $\psi$  rys.2, określa wzór podany przez Morse'a. [6]

$$p_a = p_0 e^{j\omega t} \frac{1}{k^2 a^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2m+1}{D_m} p_m(\cos \nu) e^{j(\delta_m + \frac{1}{2}\pi m)} \quad /1/$$

gdzie  $a$  - promień kuli

$\lambda$  - długość fali akustycznej w ośrodku

$p_0$  - ciśnienie akustyczne w polu fali swobodnej

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  liczba falowa

$D_m$  - funkcje ko rozkładu amplitudy \*

$\delta_m$  - funkcje ko rozkładu fazy \*

$P_m$  - funkcje Legendre'a m-tego rzędu

$\omega = 2\pi f$  ,  $f$  częstotliwość fali podającej

Średnie ciśnienie  $p_{sr}$  panujące na wycinku kuli o kącie bryłowym  $\nu_0$

można obliczyć według wzoru:

$$p_{sr} = \frac{1}{2\pi a^2 (1 - \cos \nu_0)} \int_{\pi - \nu_0}^{\pi} 2\pi a^2 p_a \sin \nu \, d\nu \quad /2/$$

gdzie  $2\pi a^2 (1 - \cos \nu_0)$   $\int_{\pi - \nu_0}^{\pi}$  - powierzchnie czeszy kulistej o kącie bryłowym  $\nu_0$

$2\pi a^2 \sin \nu \, d\nu$  - element powierzchni kuli, na którym panuje ciśnienie  $p_a$ .

Po podstawieniu do wzoru /2/ wartości  $p_a$  ze wzoru /1/ i przeprowadzeniu obliczeń otrzymujemy:

$$p_{sr} = p_0 e^{j\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{p_{m+1}(\cos \nu_0) - p_{m+1}(\cos \nu_0)}{p_{-1}(\cos \nu_0) - p_1(\cos \nu_0)} \cdot \frac{-j m e^{j\delta_m}}{k^2 a^2 D_m} \quad /3/$$

\* Uwaga: wartość funkcji  $D_m$ ,  $\delta_m$ ,  $P_m$  podane są w zależności od  $k$  w książce Morse /2/.

Wzór /3/ po podstawieniu na  $v_0$  wartości  $\Pi$  pozwala obliczyć średnie ciśnienie panujące na całej powierzchni kuli:

$$p_{sr} = p_0 e^{j\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{-j^m e^{j\delta m}}{k^2 a^2 D_m} \quad /4/$$

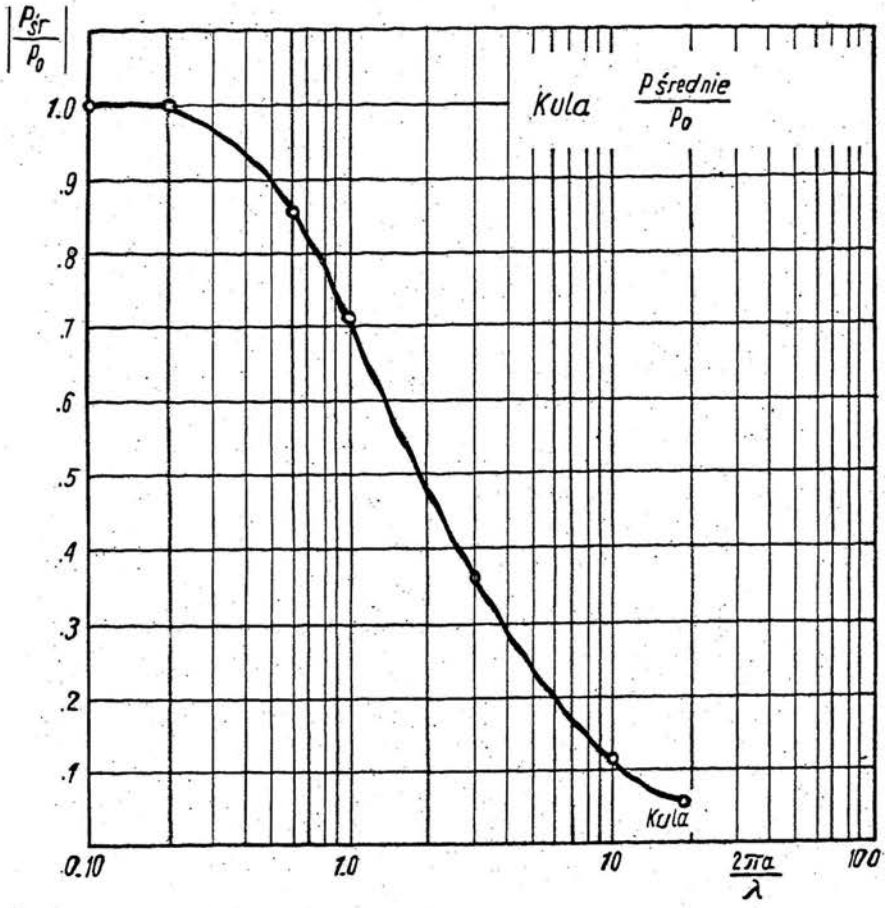
Interesujące są względne zmiany średniego ciśnienia  $\frac{p_{sr}}{p_0}$

$$\frac{p_{sr}}{p_0} = e^{j(\omega t + \delta m)} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{-j^m}{k^2 a^2 D_m} \quad /5/$$

Na rysunku 3 poślednio obliczony według wzoru /5/ moduł średniego ciśnienia względnego na powierzchni w funkcji  $ka$ , /przy obliczeniu uwzględniono 5 wyrazów szeregu /5/ ponieważ jest to szereg szybkozbieżny i dalsze wyrazy można pominąć/.

Wykres ten jest zarazem wykresem teoretycznej względnej skuteczności mikrofonu w funkcji częstotliwości lub parametru  $ka$ , ponieważ  $p_{sr}$  jest proporcjonalne do napięcia powstającego na mikrofonie.

Charakterystyczną cechą tego wykresu jest szybki spadek skuteczności z wzrostem  $ka$ . Już dla wartości  $ka = 2$ , zmniejszenie skuteczności wynosi - 8 dB.



Rys.3 - Obliczone charakterystyki skuteczności mikrofonu kulistego

Ten spadek skuteczności dla  $ka > 2$  nie zawsze jest uwzględniany, przy pomiarach mikrofonem kulistym. Często błędnie przyjmuje się, jak już wspomniano, że charakterystyka skuteczności mikrofonu jest płaska aż do pierwszej częstotliwości rezonansowej kuli.

#### 4. Wpływ rezonansów własnych mikrofonu na jego charakterystykę skuteczności

Innymi czynnikami wpływającymi na charakterystykę skuteczności mikrofonu kulistego są rezonanse własne kuli.

Zagadnienie rezonansów kuli wydrążonej jest zagadnieniem skomplikowanym i nie rozwiązaniem dla przypadku drgań giętych i kuli grubościennych.

Zwyczajowo jako pierwszy rezonans o najniższej częstotliwości, przyjmuje się w przypadku kuli wydrążonej cienkościennych rezonans radialny, którego częstotliwość możemy obliczyć ze wzoru podanego przez Love'a /5/

$$f_r = \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{Y}{2(1-\sigma)\rho}} \quad /6/$$

gdzie  $Y$  - moduł Younga

$\sigma$  - liczba Poissona

$\rho$  - gęstość materiału kuli

$a$  - promień kuli

Dla kuli platynowej, dla której  $v = 3960$  m/sek, częstotliwość rezonansowa wyraża się wzorem:

$$f_r = \frac{162000}{s} \text{ Hz} \quad /12/$$

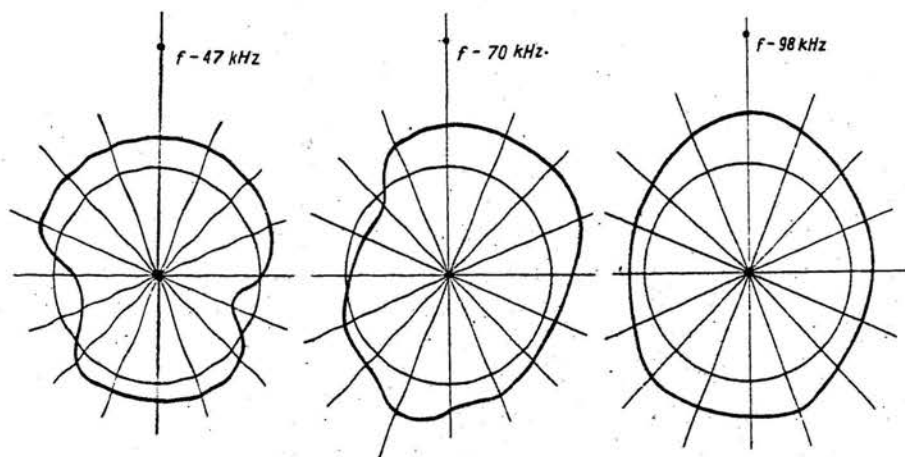
Jak widać ze wzorów /7/ i /12/ wypełnienie wnętrza kuli mikrofonu, na przykład platyną, powoduje wzrost częstotliwości rezonansu radialnego kuli.

Na rysunku 4 przedstawiono rezonanse własne cienkościennych kuli z tytanu baru o średnicy 27 mm i grubości ścianki 1 mm złożonej z dwóch połówki. Rezonans radialny tej kuli odpowiada częstotliwości 85 kHz.

Jak widać z rysunku występuje w tym przypadku duża ilość rezonansów o częstotliwości mniejszej od częstotliwości drgań radialnych.

Rysunki przedstawiają przybliżony rozkład amplitudy drgań rezonansowych na równiku kuli, pobudzonej do drgań napięciem elektrycznym o odpowiedniej częstotliwości.

Pomiar amplitudy drgań wykonano za pomocą sondy piezoelektrycznej stosowanej do pomiarów amplitudy drgań przetworników płaskich. W przypadku kuli pomiar ten jest mało dokładny a błąd w określeniu amplitudy znaczny, tak że trudno na podstawie wyników tych pomiarów wyciągnąć wnioski co do symetrii drgań kuli, natomiast możemy na jego podstawie określić dokładnie częstotliwości drgań rezonansowych i z pewnym przybliżeniem rodzaj drgań.



Rys. 5 - Rozkład amplitudy drgań rezonansowych kuli o średnicy 30 mm i grubości ścianki 5 mm

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów dla kuli grubościennnej średnicy 30 mm i grubości ścianki 5 mm, ilość rezonansów kuli uległa znacznej redukcji, jednakże i w tym przypadku obserwujemy istnienie rezonansów o częstotliwości niższej od częstotliwości rezonansu radialnego /98 kHz/.

Analizując bliżej rys.4 i 5 dochodzimy do wniosku, że większość drgań kuli cienkościennnej to drżenia giętne, wywołane asymetrią ciśnienia działającego na kulę oraz niejednorodnością materiału, z którego wykonano półkule.

Wniosek ten potwierdza znaczna redukcja ilości rezonansów w przypadku kuli grubościennnej /rys.5/.

Pogrubienie ścianki kuli powoduje przesunięcie się tych rezonansów w zakres wyższych częstotliwości, lub całkowity ich zanik.

## 5. Wyniki pomiarów charakterystyk skuteczności mikrofonów kulistych

Pomiary skuteczności mikrofonów piezoelektrycznych wykonano metodą porównania z mikrofonem wzorcowym pojemnościowym, oraz metodą rury uderzeniowej.

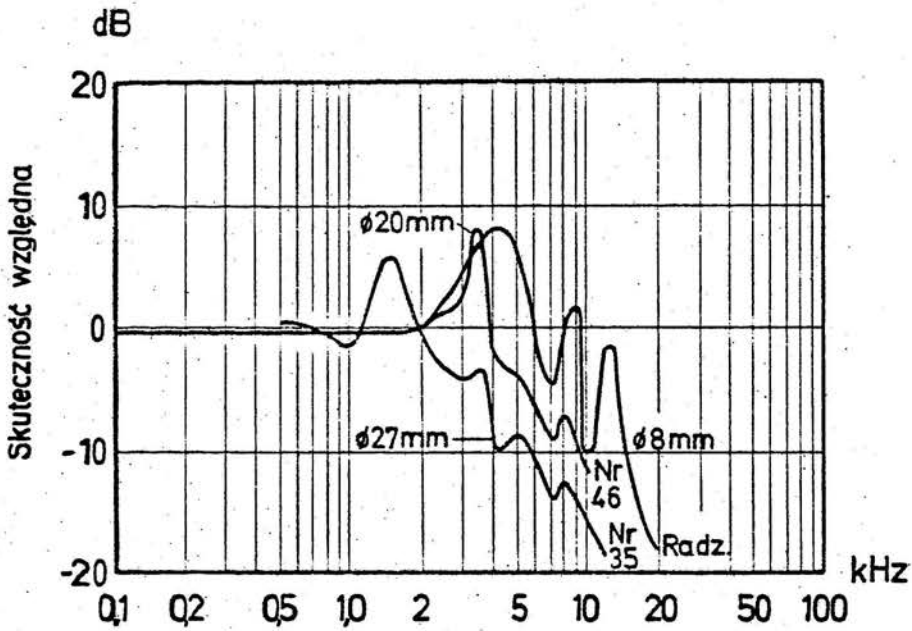
Wyniki pomiarów wskazują, że przebieg obliczonej charakterystyki skuteczności /rys.3/ dla  $ka < 5$  zgadza się na ogół z przebiegiem charakterystyk pomierzonych, wpływ rezonansu radialnego kuli na charakterystykę skuteczności ujawnia się dopiero w zakresie częstotliwości wyższych,  $ka = 10 - 20$ , /rys.7/, przy których skuteczność mikrofonu jest niewielka. Rezonans ten w przypadku mikrofonu kulistego, nie posiada zatem istotnego znaczenia, tym bardziej, że w zakresie tym mikrofon ze względu na swe duże w stosunku do długości fali rozmiary silnie zakłóca pole.

Natomiast inne rezonanse występują przy drganiach kuli, o których mówiono w punkcie 4, zniekształcają przebieg charakterystyki skuteczności.

Rys.6 przedstawia charakterystyki skuteczności trzech mikrofonów o średnicach 8, 20 i 30 mm i grubości ścianki od 0,5 do 1 mm.

Rezonanse własne mikrofonów występują tutaj w zakresie  $ka$  wykorzystywanym do pomiarów / $ka < 2$ /.

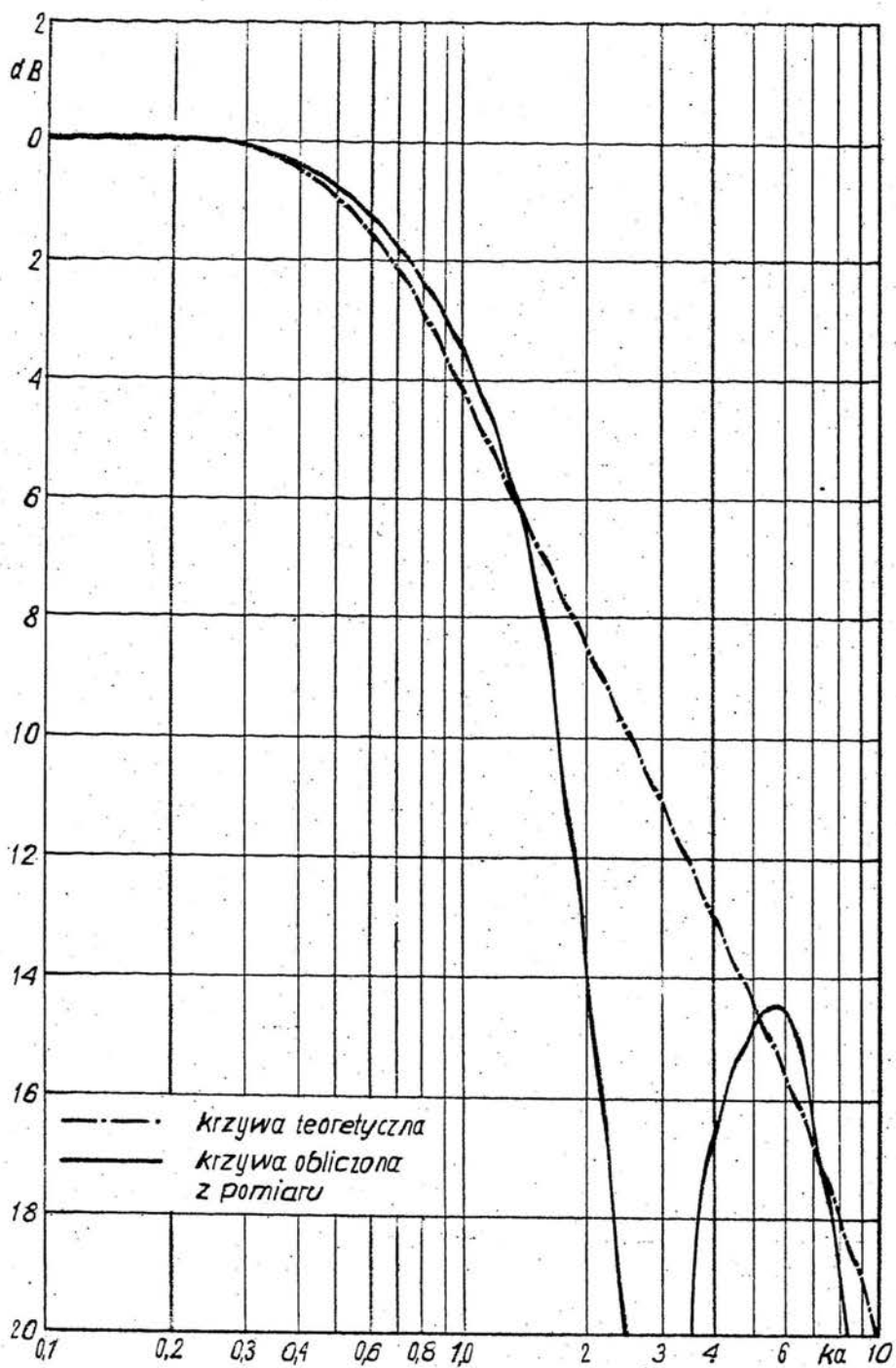




Rys.6 - Charakterystyki skuteczności mikrofonów kulistych piezoelektrycznych o średn.8 mm, 20 mm i 30 mm i grub.ścianki od 0,5 - 1 mm

Należy zauważyć, że krzywe średniej skuteczności obliczone dla każdego mikrofonu z rys.6, ma przebieg zbliżony do charakterystyki skuteczności z rys.3.

Charakterystyki z rys.6 otrzymano z porównania skuteczności mikrofonów piezoelektrycznych ze skutecznością mikrofonu wzorcowego pojemnościowego firmy Bruel Kjeur.



Źys.7 - Charakterystyka skuteczności mikrofonu wykonanego z kuli o średnicy 30 mm i grubości ścianki 5 mm

Rys.7 przedstawia charakterystykę skuteczności mikrofonu o średnicy kuli 30 mm i grubości ścianki 5 mm, której drganie pokazano na rys.5.

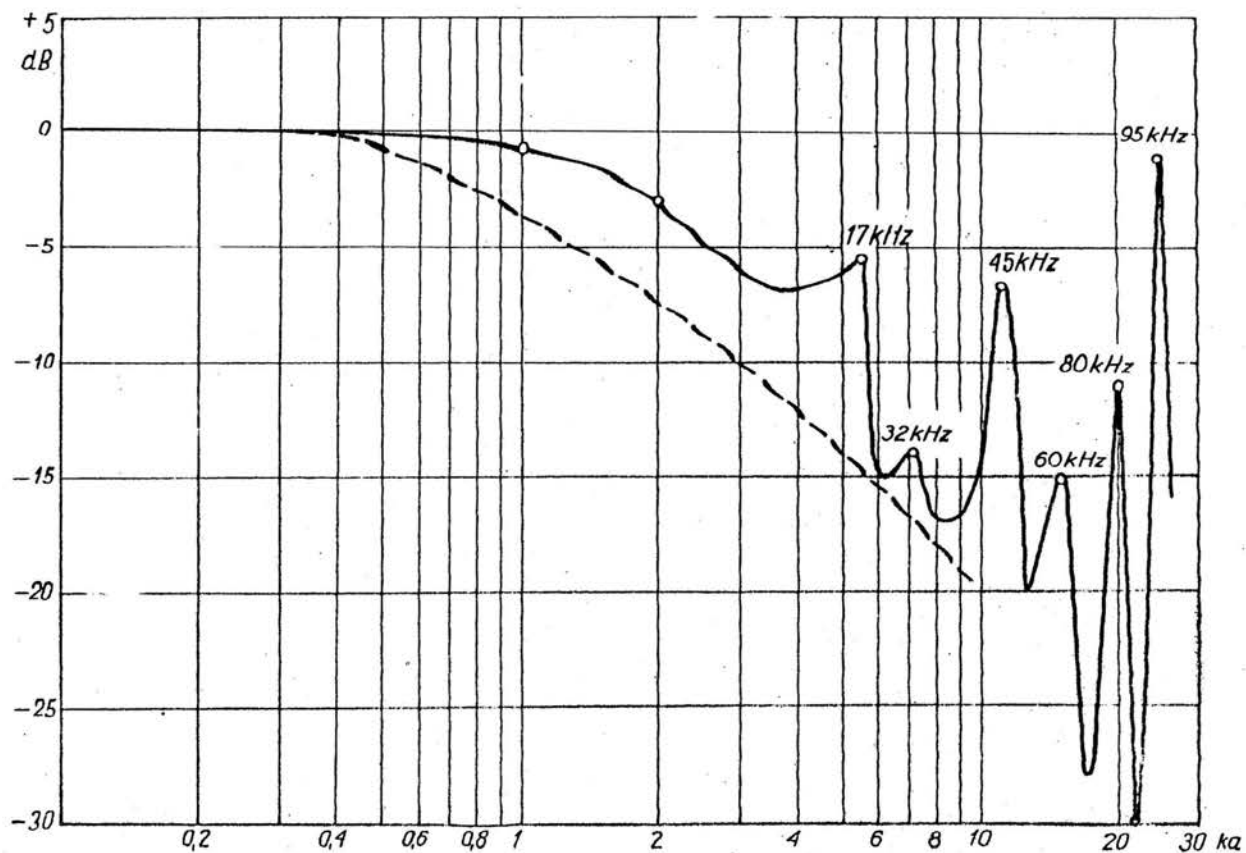
W zakresie  $ka < 1$  charakterystyki obliczone i zmierzone metodą rury uderowej w powietrzu różnią się nieznacznie, natomiast dla  $ka = 2$  różnica ta wynosi już  $-6$  dB.

Rys.8 przedstawia charakterystykę skuteczności mikrofonu o średnicy 27 mm i grubości ścianki 2 mm pomierzonej przy pomocy rury uderzeniowej.

W tym przypadku widzieć korzystny wpływ rezonansów kuli na przebieg charakterystyki skuteczności. Rezonans radialny odpowiada tutaj częstotliwości 95 kHz, dla  $ka \cong 2$  zmiana skuteczności wynosi zaledwie  $-3$  dB w stosunku do skuteczności dla  $ka = 0$ .

Na charakterystykach skuteczności mikrofonów kulistych dla pewnych częstotliwości obserwujemy gwałtowny spadek skuteczności rys.7  $ka = 3$ . Przebieg tych zmian skuteczności świadczy o rezonansowym pochodzeniu zjawiska. Jak się zdejże przyczyną jego powstania jest szczególny przypadek rozkładu ciśnienia na powierzchni kuli, zbiegający się z fazą i amplitudą drgań własnych kuli.

Wśród drgań rezonansowych kuli z materiału piezoelektrycznego istnieją drgania, które można wzbudzić tylko przez działanie sił mechanicznych odpowiednio do niej przyłożonych.

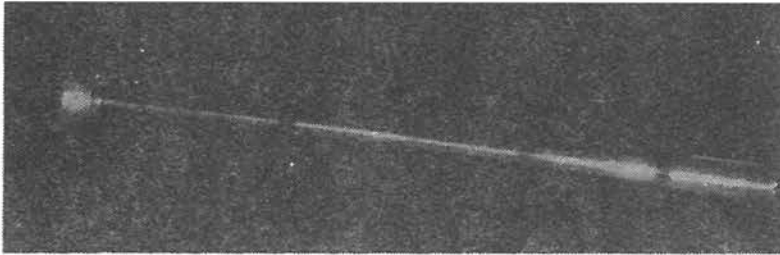


Rys.8 - Charakterystyka skuteczności mikrofonu kulistego piezoelektrycznego wykonanego z kuli o średnicy 27 mm i grubości ścianki 2 mm

Zmierzone metodą rury

W przypadku tego rodzaju drgań odkształcenia kuli wywołują na jej powierzchni powstanie ładunków elektrycznych o różnych znakach, które kompensują się wzajemnie i napięcie na mikrofonie jest w przybliżeniu równe zero. Jest to między innymi przyczyną tego, że drgań tych nie możemy wzbudzić tylko przez przyłożenie napięcia elektrycznego o odpowiedniej częstotliwości.

Ten szczególny przypadek drgań własnych wyjaśnia nam selektywne zeniki skuteczności mikrofonu.



Rys.9 - Mikrofon kulisty wykonany w I.P.P.T.

## 6. Wnioski

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że podstawową charakterystyką skuteczności mikrofonu kulistego w polu fali płaskiej, jest charakterystyka obliczona według wzoru /5/. Wynika ona z rozkładu ciśnienia na powierzchni mikrofonu zależnego od stosunku długości fali do rozmiarów mikrofonu.

Rezonanse własne kuli mają zasadniczy wpływ na tę charakterystykę, jednakże wykorzystanie ich do korekcji charakterystyki skuteczności jest trudne, gdyż nie znamy w dostatecznym stopniu wzorów do obliczenia częstotliwości rezonansowej drgań giętych kuli wyrażonej.

Znane i łatwe do obliczenia częstotliwości rezonansów radialnych leżą w zakresie małej skuteczności mikrofonu, niewykorzystywanym do pomiarów.

W praktyce należy tak konstruować mikrofony, aby większość niepożądanych rezonansów stłumić lub wyeliminować. Jest to możliwe przez zastosowanie: 1/ materiału piezoelektrycznego o dużych stratach mechanicznych /mała dobroć mechaniczna  $Q_m$ /, 2/ kul grubościennych, które są mało podatne na drgania gięte, 3/ kul wypełnionych ciężkim stałym.

Ten ostatni sposób jak wiadomo z literatury [2] zwiększa bezwzględną wartość skuteczności mikrofonu, ponadto metalowy rdzeń mikrofonu ma korzystny wpływ na jednorodność kuli, gdyż

cienka warstwa ceramiki piezoelektrycznej stanowi niewielki procent masy drgającej.

Wadą takiego rozwiązania mikrofonu jest wzrost jego oporności akustycznej właściwej.

Mikrofon kulisty używany do pomiarów ultradźwiękowych musi mieć małe rozmiary, aby był spełniony warunek  $ka < 1$ , /płaskiej charakterystyki skuteczności/.

Biorąc pod uwagę realne możliwości konstrukcyjne i technologiczne wykonanie kuli z ceramiki piezoelektrycznej należy przyjąć jako górną granicę częstotliwości dla mikrofonu kulistego, częstotliwość 5 MHz.

Należy jeszcze zauważyć, że charakterystyki kierunkowości mikrofonów kulistych w praktycznym wykonaniu odbiegają od charakterystyki wszechkierunkowej, co jest spowodowane niejednorodnością i esymetrią kuli wykonanej z ceramiki piezoelektrycznej.

Różnice te jak wykazały dodatkowe pomiary charakterystyk skuteczności dla różnych położzeń mikrofonu kulistego w stosunku do czoła fali padającej, są nieznaczne dla  $ka > 1$ , natomiast większe dla  $ka < 1$ . Staranny dobór i obróbka kul pozwolą usunąć te defekty.

Spis literatury

1. Ananiewa A.A. - Nienaprawialennyj keramicheskie zwukopriomniki  
Ak.Żurnal t 2 nr 1 1956
2. Berger J.E. - Solide Core probe hydrophone J.A.S.A. 1965
3. Dranetz A.I.  
Cullin H.I. - Spherical transducer  
U.S.A. patent 2.939970 June 7 1960
4. Hunter T.H.  
Bolt R.H. - Sonics. London: Chapman 1955
5. Love A.E.H. - Treatise on mathematical theory of elasticity  
New York 1927
6. Morse P.M. - Vibration and Sound New York 1948



# CHARAKTERYSTYKA SKUTECZNOŚCI MIKROFONU PIEZOELEKTRYCZNEGO KULISTEGO

## Streszczenie

W artykule przeprowadzono analizę charakterystyki skuteczności mikrofonu kulistego, obliczonej na podstawie rozkładu ciśnienia na powierzchni kuli umieszczonej w polu fali płaskiej.

Napięcie wyjściowe na elektrodach pokrywających kulę z materiału piezoelektrycznego jest proporcjonalne do średniego ciśnienia na powierzchni kuli obliczonego w zależności od ciśnienia akustycznego i częstotliwości fali. Opierając się na tej zależności obliczono charakterystykę względnej skuteczności mikrofonu kulistego.

Obliczone charakterystyki skuteczności porównano z charakterystykami doświadczalnymi uzyskanymi, przez cechowanie mikrofonów piezoelektrycznych wzorcowym mikrofonem pojemnościowym, oraz pomierzone metodą rury uderowej. Przebiegi obliczonych krzywych zgadzają się dobrze z przebiegami zdjętymi doświadczalnie.

Przedstawiono także wpływ rezonansów własnych kuli na przebieg charakterystyki skuteczności mikrofonu piezoelektrycznego. Stwierdzono, że obecność rezonansu radialnego kuli nie poprawia charakterystyki skuteczności mikrofonu, ponieważ

jego częstotliwość rezonansowa leży w zakresie częstotliwości, dla których skuteczność mikrofonu spada niemal do zera.

Natomiast częstotliwości rezonansów, odpowiadających drganiom giętnym są bliżej nieokreślone ze względu na brak teorii drgań giętnych kuli i przez to nie mogą być wykorzystane do korekcji charakterystyki skuteczności mikrofonu.