



PRZETWORNIKI ULTRADŹWIĘKOWE DO PRACY W OŚRODKU GAZOWYM

Ultrasonics Transducers for Operation in a Gas Medium

Tadeusz Gudra

Institut Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej
tadeusz.gudra@pwr.wroc.pl

STRESZCZENIE

Praca dotyczy zagadnienia generacji fal ultradźwiękowych w ośrodkach gazowych za pomocą przetworników elektromechanicznych. Omówiono podstawowe parametry ośrodka gazowego mające wpływ na transmisję fal ultradźwiękowych. Przedstawiono aeroakustyczne równanie zasięgu oraz komputerowy model łącza ultradźwiękowego w stacjonarnym i niestacjonarnym ośrodku gazowym. Przedyskutowano problem dopasowania dużej impedancji akustycznej przetworników ultradźwiękowych do małej impedancji akustycznej ośrodków gazowych, którego rozwiązanie stanowi podstawę do budowy przetworników. Przedstawiono szereg opracowanych w Pracowni Techniki Ultradźwiękowej Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej rozwiązań przetworników ultradźwiękowych pracujących w ośrodkach gazowych w pasmach częstotliwości 20 kHz – 100 kHz i 100kHz – 2 MHz oraz omówiono ich właściwości. Wskazano na potencjalne możliwości ich zastosowań w różnych gałęziach nauki i techniki oraz przedstawiono przykłady zastosowań w opracowanej aparaturze kontrolno – pomiarowej.

1. WPROWADZENIE

Źródłem fal ultradźwiękowych w ośrodku gazowym są zazwyczaj elementy lub układy drgające, pobudzane bezpośrednio do drgań za pomocą zmiennego pola elektrycznego lub magnetycznego lub za pomocą przetworników wykonanych z materiałów elektromechanicznie aktywnych. Rzadziej wykorzystywane są tzw. źródła przepływowe, których wspólną cechą jest ciągły przepływ gazu wypełniającego nadźwiękawianą przestrzeń; w przetwornikach tego typu dokonuje się zamiana energii mechanicznej na akustyczną bez udziału energii elektrycznej lub magnetycznej. Przetworniki takie są przetwornikami nieodwracalnymi – mogą pracować jedynie jako generatory lub nadajniki fal ultradźwiękowych (np. piszczałka Galtona, generator Hartmanna, syreny ultradźwiękowe). Pozwalają one na uzyskiwanie stosunkowo dużych natężeń ultradźwięków, jednak ze względu na ich niewielkie znaczenie w technice – nie będą tu szerzej omawiane.

2. KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA OŚRODKA GAZOWEGO

Do podstawowych parametrów fizycznych gazów należą: gęstość, lepkość, ciepło właściwe, współczynnik κ i współczynnik dyfuzji. Wszystkie te parametry można przedstawić w funkcji ciśnienia i temperatury, a w przypadku mieszanin dodatkowo w funkcji mas molowych poszczególnych składników gazu. Parametry te pozwalają na wyznaczenie dwóch najważniejszych z punktu widzenia propagacji fal ultradźwiękowych wielkości: prędkości propagacji fali i tłumienia fali.

W gazach i parach o niezbyt dużej gęstości, w zakresie częstotliwości poniżej dyspersji, prędkość dźwięku można wyznaczyć z zależności:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa(T) \cdot p_o \cdot T}{\rho_o \cdot T_o}} \quad (1)$$

gdzie: $\kappa(T) = c_p / c_v$ (dla danej temperatury T), p_o - ciśnienie gazu w warunkach normalnych, $T_o = 273$ K, ρ_o - gęstość gazu w warunkach normalnych. Za pomocą wzoru (1) można stosunkowo dokładnie obliczyć wartości prędkości dźwięku w dowolnych gazach i mieszaninach przy niewielkich zmianach ciśnienia rzędu 1 atm w stosunku do ciśnienia atmosferycznego, jeśli dysponuje się dokładnymi wartościami ρ_o i $\kappa(T)$.

Powodem osłabienia fali sprężystej w ośrodku gazowym są zjawiska absorpcji i rozpraszania. Przyczyną absorpcji jest lepkość, przewodnictwo i promieniowanie ciepła (czynniki klasyczne) oraz procesy molekularne (relaksacja), natomiast rozpraszanie zachodzi na niejednorodnościach ośrodka. Klasyczne tłumienie ultradźwięków w gazach uwarunkowane jest lepkością dynamiczną oraz przewodnictwem cieplnym. Wypadkowy współczynnik tłumienia α_{kl} (tłumienie klasyczne) pochodzący od lepkości i od przewodnictwa cieplnego określony jest wzorem Stokesa-Kirchoffa:

$$\alpha_{kl} = \alpha_\eta + \alpha_\sigma = \frac{\omega^2}{2\rho c^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \sigma \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right], \quad (2)$$

gdzie: ω - częstość kołowa, ρ - gęstość ośrodka, c - prędkość fali ultradźwiękowej w ośrodku, η - współczynnik lepkości dynamicznej, σ - współczynnik przewodności cieplnej, c_v - ciepło właściwe przy stałej objętości, c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu.

Zasadniczy wpływ na obciążenie przetworników ultradźwiękowych ma akustyczna rezystancja właściwa ośrodka, do którego promieniowana jest energia ultradźwiękowa. Dla ośrodków gazowych rezystancja akustyczna zmienia się w stosunkowo szerokim zakresie i jest kilka rzędów mniejsza od rezystancji akustycznej ciał stałych.

3. AEROAKUSTYCZNE RÓWNANIE ZASIĘGU

Analizując skład chemiczny gazu, jego temperaturę, ciśnienie, wilgotność oraz rozważając wpływ akustycznych procesów molekularnych zachodzących w gazach, a także parametry fizyczne gazów (gęstość, lepkość, ciepło właściwe, współczynnik przewodnictwa cieplnego, współczynnik κ , współczynnik dyfuzji) można wyznaczyć zależności dla dwóch najistotniejszych parametrów akustycznych środowiska gazowego: prędkości i tłumienia fali ultradźwiękowej, a tym samym określić ich wpływ na zasięg urządzeń pracujących w ośrodkach gazowych. W oparciu o te rozważania sformułowano równanie zasięgu łącza aeroakustycznego (rozumianego jako układ przetworników ultradźwiękowych umieszczonych wspólnie)

w pewnej odległości od siebie w powietrzu, z których jeden jest nadajnikiem a drugi odbiornikiem), będące modyfikacją równania zasięgu dla łącza hydroakustycznego [14]:

$$\frac{P_T}{P_R} = \frac{4\pi d^2 e^{2\alpha d}}{\Omega \cdot S_R}, \quad (3)$$

gdzie: P_T - moc promieniowana przez przetwornik nadawczy, P_R - moc odbierana przez przetwornik odbiorczy, d - odległość między przetwornikami w łączy aeroakustycznym, α - amplitudowy współczynnik tłumienia w powietrzu, S_R - powierzchnia przetwornika odbiorczego, Ω - współczynnik kierunkowości przetwornika nadawczego, (dla $\pi f D_T / c \gg 1$, $\Omega = \pi^2 f^2 D_T^2 / 2c^2$, gdzie f - częstotliwość fali ultradźwiękowej, D_T - średnica przetwornika nadawczego).

Stosując pewne uproszczenia, można ujawnić stosunek mocy P_T/P_R w równaniu (3) na dwa sposoby:

$$\frac{P_T}{P_{Rmin}} = \left(\frac{S_n S_o \tilde{U}_T k_u D_T}{\tilde{U}_{sz} 10^{\frac{L_T}{20}} D_R} \right)^2, \quad (4)$$

gdzie P_{Rmin} jest mocą sygnału progowego, określoną przez wymaganą różnicę poziomów sygnał-szum L_T , \tilde{U}_{sz} jest napięciem całkowitych szumów po stronie elektrycznej, \tilde{U}_T jest napięciem zasilającym przetwornik nadawczy, k_u - iloczyn wzmocnień w układzie odbiorczym, S_o - czułość przetwornika odbiorczego, S_n - skuteczność przetwornika nadawczego przy założeniu bezstratności ośrodka,

$$\frac{P_T}{P_{Rmin}} = \frac{\tilde{U}_T^2}{|Z_T|} \frac{R_p R_o}{(R_v + R_p)(R_o + R_v + R_p)} \frac{4\rho c S_o^2 k_u^2}{\pi D_R^2 \tilde{U}_{sz}^2 10^{\frac{L_T}{10}}}, \quad (5)$$

gdzie: R_o - rezystancja strat elektrycznych przetwornika nadawczego, R_v - rezystancja strat mechanicznych przetwornika nadawczego, R_p - rezystancja promieniowania przetwornika nadawczego, Z_T - impedancja przetwornika nadawczego w rezonansie.

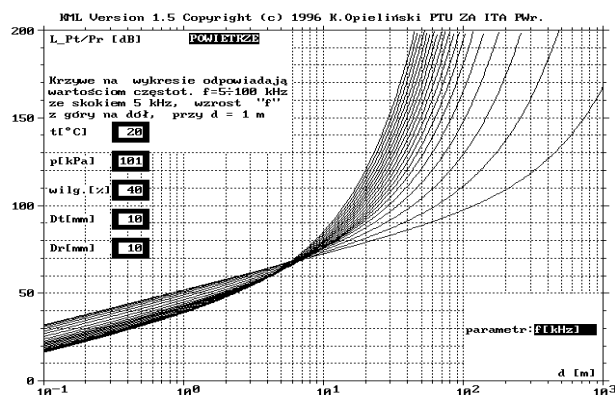
Takie przyjęcie stosunku mocy powoduje, że odległość d w równaniu (3) staje się zasięgiem łącza d_{max} . Równanie (3) pozwala na zaprojektowanie łącza aeroakustycznego [8] poprzez zadanie określonego zasięgu i obliczenie wymaganego stosunku mocy P_T/P_R uwzględniając wszystkie czynniki wpływające na prędkość i tłumienie ultradźwięków w powietrzu, a następnie dobranie wartości tego stosunku poprzez dobór parametrów przetworników ultradźwiękowych według równania (4) lub (5) [2].

4. KOMPUTEROWY MODEL ŁĄCZA

Komputerowy model łącza ultradźwiękowego w warunkach statycznych w wersji podstawowej w postaci programu o nazwie KML (pracującego na komputerach typu IBM PC z twardym dyskiem i kartą VGA) przedstawiono po raz pierwszy w pracy [8]. Program ten poszerzono następnie o dodatkowe opcje umożliwiające obliczanie rozkładu ciśnienia akustycznego na powierzchni przetwornika odbiorczego oraz czasu przejścia fali akustycznej przez łącze, jak również rozbudowano menu i grafikę programu, czyniąc go łatwym i wygodnym w obsłudze dla przeciętnego użytkownika. Szeroki zakres graficznego ustawienia wartości parametrów takich jak: temperatura ($-50^\circ\text{C} \div +400^\circ\text{C}$), wilgotność

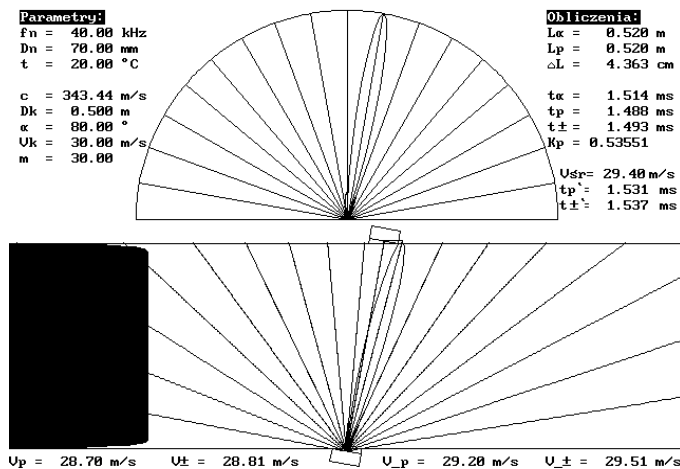
(0÷100 %), ciśnienie (80 kPa ÷120 kPa), częstotliwość promieniowanej fali akustycznej (10 Hz÷10 MHz), długość łącza (0.1m÷1000m), poziom ciśnienia akustycznego w odległości 1m, umożliwia wyznaczanie różnorodnych wielkości akustycznych przydatnych przy projektowaniu tego typu łącz w ośrodkach gazowych.

Szczegółowy opis programu KML, jego możliwości obliczeniowych oraz użytych w nim zależności i algorytmów zawarto w instrukcji użytkowej. Program KML 1.0 został przetestowany i przygotowany do sprzedaży. (Licencję na używanie tego programu zakupiła m.in. Wojskowa Akademia Techniczna oraz Pol. Warszawska). Na rys.2 przedstawiono przykładowy wydruk z programu KML dla $L_{PT/PR}(d)$; parametrem zmiennym jest tu częstotliwość.



Rys.1. Wydruk z programu KML: $L_{PT/PR}(d)$ z parametrem częstotliwość.

Komputerowy model łącza z uwzględnieniem przepływu ośrodka umożliwia określenie przesunięcia wiązki ultradźwiękowej dla laminarnego i turbulentnego przepływu gazu w kanale. Przykładowy wydruk z programu KML dla prędkości przepływu gazu $v = 30$ m/s i usytuowaniu przetwornika pod kątem $\alpha = 80^\circ$ w stosunku do osi kanału przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Wydruk z programu KML dla $v = 30$ m/s i $\alpha = 80^\circ$.

5. DOPASOWANIE IMPEDANCJI AKUSTYCZNEJ ŹRÓDEŁ ULTRADŹWIĘKOWYCH DO IMPEDANCJI AKUSTYCZNEJ OŚRODKÓW GAZOWYCH

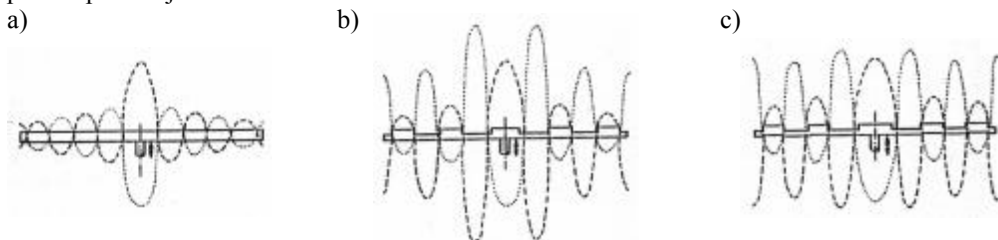
Zasadniczym problemem występującym przy promieniowaniu energii ultradźwiękowej do ośrodka gazowego jest silne niedopasowanie impedancji akustycznych przetworników i ośrodka gazowego. Poprawę dopasowania można uzyskać poprzez:

- zwiększenie powierzchni promieniującej przetwornika,
- zastosowanie warstw dopasowujących między przetwornikiem a ośrodkiem gazowym.

Obie metody mają pewne ograniczenia wynikające z zakresu stosowanych częstotliwości. Zwiększenie powierzchni promieniującej realizowane zwykle przez zaopatrzenie przetwornika w odpowiednio pobudzaną do drgań płytę promieniującą można stosować do przetworników pracujących w zakresie niższych częstotliwości ultradźwiękowych (praktycznie do 100 kHz) natomiast stosowanie warstw dopasowujących dotyczy przede wszystkim przetworników pracujących w zakresie częstotliwości powyżej 100 kHz.

Ze względu na sposób mocowania i pobudzenia do drgań najkorzystniejsze jest stosowanie płyty osiowo – symetrycznej pobudzanej w osi do drgań giętnych, które charakteryzują się stosunkowo niską częstotliwością rezonansową.

Rozkład drgań wzdłuż promienia płyty reprezentowany przez krzywą dynamiczną drgań giętnych $W_n(r)$ odbiega od modelu teoretycznego tłoka drgającego w nieskończonej odgradzie, gdzie przyjmuje się założenie, że wszystkie punkty na powierzchni tłoka drgają z taką samą amplitudą i fazą. Przybliżenie rzeczywistych drgań płyty do modelu teoretycznego można uzyskać stosując płytę profilowaną w taki sposób, aby fazy drgań poszczególnych punktów na powierzchni płyty miały taki sam znak [1, 4]. Na rys. 3 przedstawiono rozkład przemieszczeń na powierzchni płyty osiowo-symetrycznej o różnym profilu przekroju.



Rys.3. Rozkład przemieszczeń dla płyty osiowosymetrycznej: a) płyta płaska, b) płyta o jednostronnie stopniowanej grubości, c) płyta o dwustronnie stopniowanej grubości.

Do promieniowania energii ultradźwiękowej do ośrodków gazowych można również stosować płytę prostokątną. Ze względu jednak na złożoność drgań takiej płyty (i związane z tym problemy z odpowiednim pobudzeniem do drgań) praktyczne znaczenie ma tylko drganie płyty w tzw. modzie pasemkowym drgań. Mod pasemkowy jest szczególnym rodzajem wyższych modów drgań giętnych płyty; w modzie tym występują stosunkowo małe straty energii oraz możliwe jest uzyskanie drgań o częstotliwościach ultradźwiękowych leżących w paśmie 20 kHz – 100 kHz.

Jeśli źródłem drgań ultradźwiękowych w ośrodku gazowym jest bryła wykonana z materiału elektromechanicznie aktywnego, wówczas istnieje problem skutecznej zamiany energii elektrycznej na energię akustyczną. Ze względu na niekorzystny stosunek impedancji akustycznej ciała stałego do impedancji akustycznej ośrodka gazowego zamiana energii elektrycznej na akustyczną odbywa się z dużymi stratami. Straty te mogą zostać

zmniejszone, jeśli między źródłem drgań a ośrodkiem gazowym umieszczony zostanie element pośredniczący poprawiający dopasowanie wspomnianych wyżej impedancji akustycznych. Element taki będzie spełniał rolę transformatora impedancji.

Warstwa dopasowująca może być rezonansowa lub nierzonansowa [17]. Najprostszym sposobem dopasowania przetwornika do obciążenia jest zastosowanie warstwy ćwierćfalowej. Stosowanie większej ilości warstw wymaga spełnienia kilku warunków związanych z wyborem określonego kryterium dopasowania pozwalającego na wybór wymaganego kształtu funkcji przenoszenia [3,19]. Zastosowanie niejednorodnej warstwy, której impedancja akustyczna zmienia się w sposób ciągły wzdłuż grubości warstwy (teoretycznie najkorzystniejsze jest zastosowanie warstwy o wykładniczym profilu impedancji od wartości równej impedancji charakterystycznej przetwornika do wartości równej charakterystycznej impedancji ośrodka gazowego [18]) pozwala na uzyskanie przetworników szerokopasmowych o najlepszych parametrach, jednak wykonanie takiej warstwy jest bardzo trudne ze względów technologicznych.

W Pracowni Techniki Ultradźwiękowej ITA opracowano materiał wieloskładnikowy o nazwie ITAKOM [11], którego niektóre parametry przewyższają parametry znane z literatury. Jego zaletą jest również to, że poprzez dobór odpowiednich składników i odpowiedniej ich proporcji możliwe jest uzyskanie wartości impedancji w stosunkowo szerokim zakresie. Materiał ten wykorzystano do budowy szeregu przetworników ultradźwiękowych przeznaczonych do pracy w ośrodkach gazowych (m.in. [6,9,7,10]), co pozwoliło na aplikację tych przetworników w różnych urządzeniach pomiarowych.

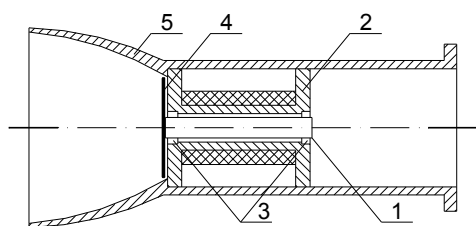
6. PRZETWORNIKI ULTRADŹWIĘKOWE PRACUJĄCE W PAŚMIE CZĘSTOTLIWOŚCI 20 kHz – 100 kHz

Do generacji i odbioru fal ultradźwiękowych w ośrodku gazowym w zakresie dolnych częstotliwości ultradźwiękowych najczęściej wykorzystywane są układy drgające, składające się z przetwornika ultradźwiękowego i płyty drgającej (lub innego elementu drgającego) o stosunkowo dużej powierzchni co pozwala na polepszenie dopasowania impedancji przetwornika do impedancji ośrodka gazowego, a tym samym zwiększenie skuteczności przekazywania energii akustycznej. Istnieje szereg rozwiązań przetworników zbudowanych w oparciu o takie układy drgające, opisanych m.in. w pracach [1,4]. Często stosowanym rozwiązaniem są przetworniki typu "sandwich", w których wykonana z metalu masa promieniująca ma zwiększoną aperturę promieniującą w stosunku do średnicy korpusu pakietu warstwowego; masa promieniująca może być ponadto pokryta ćwierćfalową warstwą materiału porowatego. Innym znanym rozwiązaniem przetworników pracujących w tym zakresie częstotliwości są konstrukcje, w których wykorzystuje się drgania rezonansowe pierścienia piezoceramicznego o skończonej szerokości i grubości, wewnątrz którego znajduje się masa plastyczna. Drgający pierścień zmienia swój promień i swoją grubość; odkształcenia grubościowe można wykorzystać jako źródło fal ultradźwiękowych. Umieszczenie wewnątrz pierścienia masy plastycznej (np. żywicy epoksydowej) pozwala na uzyskanie zwiększonej amplitudy drgań [16]. Oddzielną grupę źródeł i odbiorników ultradźwiękowych pracujących w powietrzu falą ciągłą stanowią przetworniki wykorzystujące układy bimorficzne [15] i układy pobudzane do drgań giętnych za pomocą ceramiki piezoelektrycznej przyklejonej do metalowej płytki drgającej w modzie giętym. Ciągłe poszukuje się nowych rozwiązań przetworników, które powinny spełniać często bardzo ostre wymagania w stosunku do tej grupy źródeł stawiane w odniesieniu do ich parametrów, warunków pracy lub zastosowań specjalnych.

W Pracowni Techniki Ultradźwiękowej ITA PWr opracowano szereg oryginalnych rozwiązań przetworników przeznaczonych do pracy w ośrodku gazowym w paśmie częstotliwości 20 kHz – 100 kHz; większość z nich znalazła zastosowanie praktyczne. Poniżej przedstawiono niektóre rozwiązania takich przetworników.

6.1 Przetwornik piezomagnetyczny z osiowo – symetryczną płytą promieniującą

Jednym z pierwszych przetworników ultradźwiękowych przeznaczonych do pracy w powietrzu, opracowanych w latach 70-tych w zespole badawczym zajmującym się techniką ultradźwiękową w ówczesnym Zakładzie Elektroakustyki kierowanym przez prof. Z. Żyszkowskiego był opracowany przez dr inż. E. Talarczyka przetwornik piezomagnetyczny przedstawiony na rys. 4. [20].



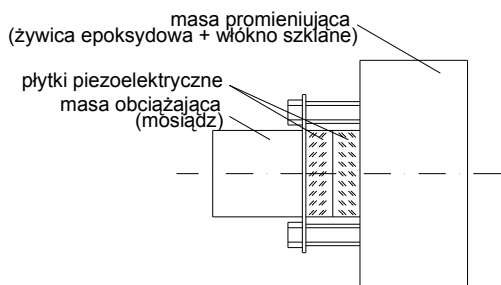
Rys. 4 Budowa przetwornika piezomagnetycznego: 1- rdzeń, 2 – korpus z uzwojeniem, 3 – pierścienie elastyczne, 4 – membrana, 5 – tuba paraboliczna.

Zasadniczym elementem przetwornika jest rdzeń w kształcie rurki wykonanej ze zwiniętej cienkiej blachy magnestostrykcyjnej, na której końcu przymocowana jest sztywna membrana promieniująca falę ultradźwiękową. Zastosowana tuba paraboliczna poprawia dopasowanie akustyczne oraz zapewnia wymaganą kierunkowość. Parametry przetwornika: częstotliwość : $f = 30$ kHz, ciśnienie w odl. 1 m: $p = 34,5$ N/m², czułość $S_o = 5$ mV · m²/N.

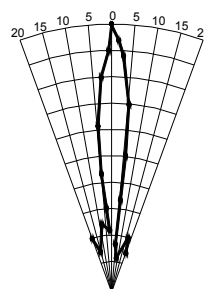
6.2 Przetwornik piezoelektryczny typu „sandwich” z masą promieniującą o małej impedancji akustycznej

Opracowany i opisany w 1927 roku przez Langevine’a przetwornik piezoelektryczny typu „sandwich” jest dzisiaj jednym z najczęściej stosowanych przetworników piezoelektrycznych pracujących w zakresie częstotliwości 20 kHz – 100 kHz. Na rys. 5 przedstawiono budowę przetwornika z masą promieniującą wykonaną z włókna szklanego i żywicy epoksydowej oraz charakterystykę kierunkowości dla tego przetwornika.

a)



b)

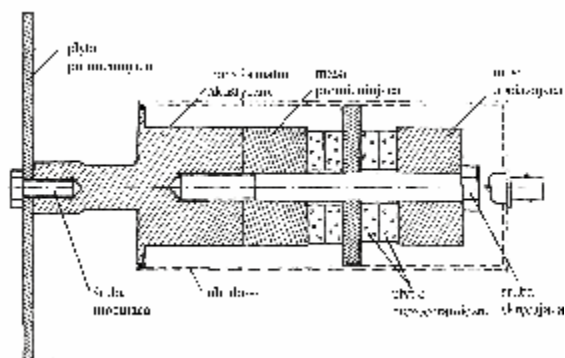


Rys. 5. Przetwornik piezoelektryczny typu „sandwich” z masą promieniującą o małej impedancji akustycznej: a) budowa przetwornika, b) charakterystyka kierunkowości.

Podstawowe dane techniczne przetwornika: częstotliwość $f = 40 \text{ kHz}$, dobroć mechaniczna $Q = 60$, skuteczność w odl. 1m $S = 75 \text{ dB/V}$. Przetwornik ten ma wiele zalet: posiada zwartą konstrukcję, dużą wytrzymałość mechaniczną, dużą skuteczność i stosunkowo małą dobroć, co czyni go szczególnie przydatnym do pracy impulsowej. Przetwornik nadaje się do pracy w trudnych warunkach przemysłowych, gdzie występuje duży poziom hałasu i wibracji mechanicznych, duże zapylenie oraz duża zmienność temperatur.

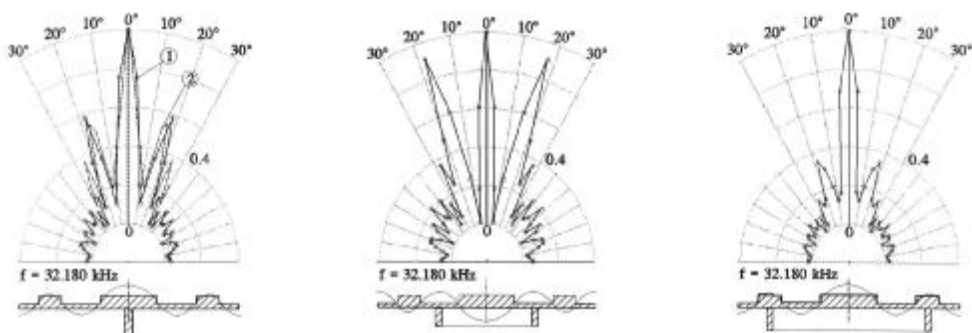
6.3 Przetwornik piezoelektryczny typu „sandwich” z osiowo-symetryczną płytą drgającą

Na rys. 6 przedstawiono budowę przetwornika typu „sandwich” z osiowo-symetryczną płytą drgającą.



Rys. 6. Konstrukcja przetwornika.

Odpowiednie ukształtowanie profilu płyty pozwala na przybliżenie drgań płyty do drgań tłoka oraz zwężenie charakterystyki kierunkowości. Interesującym zagadnieniem jest badanie zachowania się płyty przy różnych sposobach pobudzenia jej do drgań. Na rys. 7 przedstawiono przykłady charakterystyk kierunkowości płyty profilowanej pobudzonej w osi symetrii i na okręgach odpowiadających maksimum wychylenia.



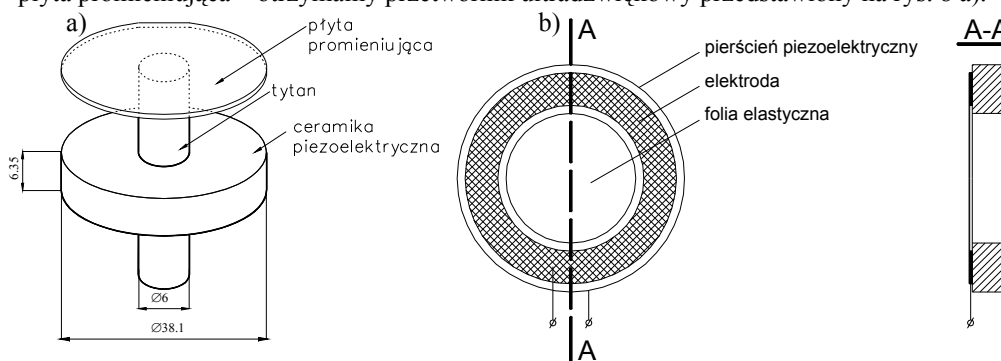
Rys. 7. Charakterystyka kierunkowości płyty profilowanej pobudzonej w osi i na okręgach odpowiadających maksimum wychylenia: 1 – wg obliczeń, 2 – wg pomiarów.

Profilowanie dwustronne płyty promieniującej pozwala nie tylko na dalszą korektę amplitudy drgań wzdłuż promienia płyty i zmniejszenie szerokości wiązki, ale może również zostać wykorzystane do ogniskowania wiązki w zadanym punkcie wzdłuż osi płyty.

Przetworniki typu „sandwich” z osiowo-symetryczną płytą drgającą pozwalają na uzyskiwanie poziomów ciśnienia akustycznego o wartości powyżej 170 dB.

6.4 Przetwornik z osiowo-symetrycznym elementem piezoelektrycznym drgającym radialnie

Do generacji fal ultradźwiękowych w zakresie częstotliwości 20 kHz – 100 kHz alternatywą dla przetwornika piezoelektrycznego typu „sandwich” jest przetwornik piezoelektryczny w kształcie dysku lub pierścienia o stałej lub zmiennej grubości, w którym wykorzystane zostaną drgania radialne. Przetwornik w kształcie dysku, dzięki sprzężeniu pomiędzy odkształceniem radialnym i odkształceniem wzdłuż osi płytki może być wykorzystany jako źródło fali płaskiej lub cylindrycznej generowanej do ośrodka gazowego, pod warunkiem wyposażenia jego powierzchni promieniującej w odpowiednią warstwę dopasowującą. Drgania radialne dysku piezoelektrycznego pozwalają na uzyskanie charakterystyki promieniowania o zredukowanym polu bliskim i zredukowanych listkach bocznych. Jeśli rozkład amplitudy na powierzchni promieniującej jest zbliżony do funkcji Gaussa (a taki rozkład uzyskuje się w przypadku drgań radialnych; maksymalne odkształcenie występuje tu w osi dysku i zanika w kierunku krawędzi dysku), wówczas pole bliskie jest ograniczone do niewielkich rozmiarów i listki boczne praktycznie nie występują. Drgania radialne pierścienia mogą zostać zamienione na drgania podłużne pręta umieszczonego wewnątrz pierścienia; utworzony w ten sposób układ drgający stanowi rezonator z konwersją kierunku drgań typu R-L. Przekazywanie energii z jednego elementu rezonansowego do drugiego zachodzi dzięki efektowi Poissona w wspólnej części tych elementów (w węzłach drgań). Taki układ ma dwie częstotliwości rezonansowe odpowiadające modowi współfazowemu i modowi przeciwfazowemu drgań (które zależą od fazy drgań pręta i pierścienia). Jeśli do rezonatora prętowego zostanie zamocowana kołowa płyta promieniująca – otrzymamy przetwornik ultradźwiękowy przedstawiony na rys. 8 a).



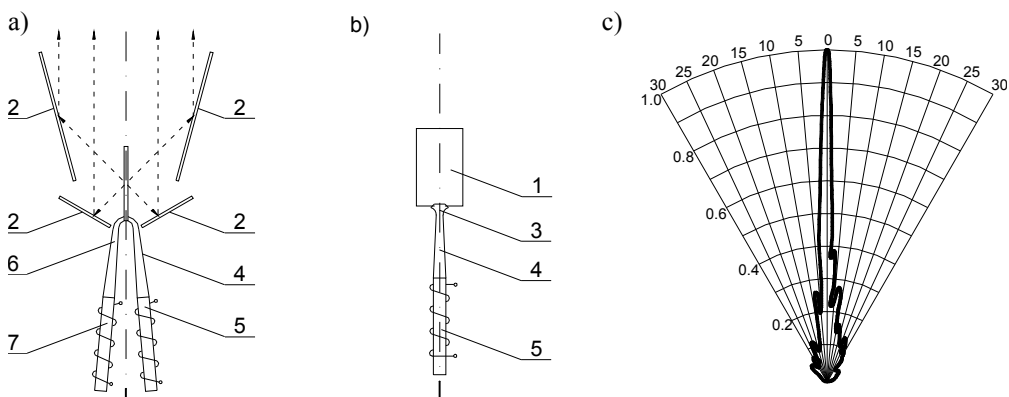
Rys.8. Przetwornik pierścieniowy: a) z konwersją kierunku drgań typu R-L z płytą promieniującą, b) z folią elastyczną

Inny sposób wykorzystania drgań radialnych pierścienia piezoelektrycznego przedstawia rozwiązanie przetwornika pokazanego na rys. 8 b). Drgania promieniowe wywołują naprężenia w membranie, która wykonuje drgania prostopadłe do jej powierzchni i tym samym promieniuje falę ultradźwiękową o częstotliwości drgań radialnych pierścienia. Ponadto w odróżnieniu od powszechnie znanej wady przetworników elektrostatycznych jaką jest ich mała skuteczność jako nadajników przetwornik ten charakteryzuje się skutecznością

co najmniej o rząd wielkości większą co pozwala na wykorzystanie go zarówno jako nadajnika jak i odbiornika fal ultradźwiękowych.

6.5 Przetwornik z prostokątną płytą promieniującą drgającą w modzie pasemkowym

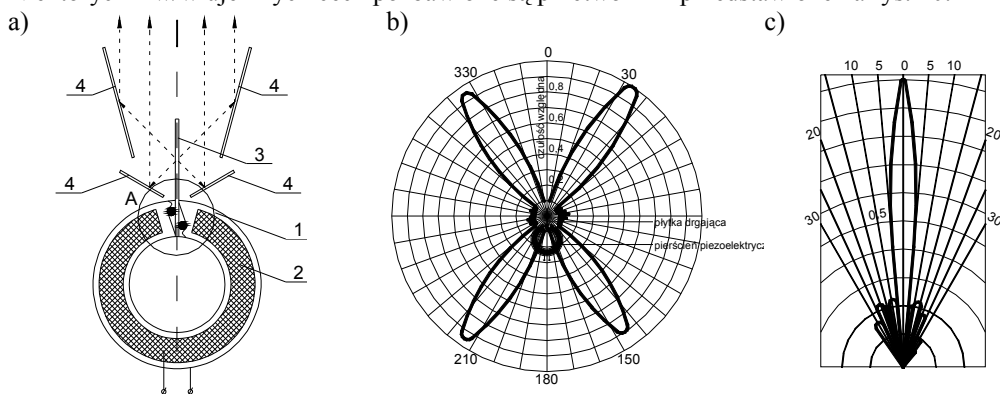
Element promieniujący w kształcie płyty prostokątnej drgającej w szczególnej postaci drgań giętnych, w tzw. modzie pasemkowym jest szczególnie interesujący m.in. ze względu na kształt wiązki promieniowanej oraz na możliwości pobudzenia takiej płyty do drgań za pomocą różnego rodzaju „pobudników” ultradźwiękowych. Na rys. 9 przedstawiono jeden z pierwszych przetworników ultradźwiękowych przeznaczonych do pracy w ośrodku gazowym, w którym zastosowano dwa przetworniki piezomagnetyczne [12]. Pod wpływem drgań w przeciwfazie obu przetworników w miejscu mocowania płytki do łącznika powstaje w płycie prostokątnej moment gnący, który pobudza ją do drgań giętnych. W wyniku tych drgań płytka wypromieniowuje cztery wiązki fal ultradźwiękowych, które są odbijane przez cztery reflektory w taki sposób, że na wyjściu przetwornika powstaje wiązka fal równoległych o czterokrotnie większej mocy w stosunku do pojedynczej wiązki. Wymiary wszystkich elementów rezonansowych (przetworników, falowodów i płytki) są dobrane w taki sposób, aby układ pracował na jednej częstotliwości rezonansowej. Np. dla prostokątnej płytki o wymiarach 85 x 31 x 1 mm wykonanej z aluminium pobudzonej do drgań na częstotliwości 30 kHz uzyskuje się 8 linii węzłowych a kąt promieniowania 4 wiązek ultradźwiękowych (tj. kąt przesunięcia wiązek względem siebie) wynosi ok. 45°. Na rys. 9 b) przedstawiono charakterystykę kierunkowości omawianego przetwornika zmierzoną w odległości 1 m przy odpowiednim ustawieniu czterech reflektorów.



Rys.9. Przetwornik piezomagnetyczny z prostokątną płytą drgającą: a) widok z przodu, b) widok z boku (bez reflektorów), c) Charakterystyka kierunkowości; 1 - płytka prostokątna, 2 - reflektor, 3 - łącznik dwuramienny, 4, 6 - falowód, 5 - przetwornik piezomagnetyczny o dodatniej fazie drgań, 7 - przetwornik piezomagnetyczny o ujemnej fazie drgań.

Poziom ciśnienia zmierzony w odległości 1 m od przetwornika wynosi 135 dB przy zasilaniu mocą elektryczną równą 1 W. Prawidłowe ustawienie reflektorów pozwala na uzyskanie wzrostu poziomu ciśnienia akustycznego o około 12 dB. Skuteczność przetwornika pracującego jako odbiornik wynosi 2 mV/ μ bar. Dobroć przetwornika jest stosunkowo duża i wynosi ok. $Q \cong 150$, co ogranicza w niewielkim stopniu jego zastosowanie do pracy impulsowej na małych odległościach. W porównaniu z przetwornikiem przedstawionym na rys. 4, w którym okrągła płytka promieniuje falę

w przybliżeniu tłokowo, ten rodzaj przetwornika wykazuje wiele zalet. Poziom ciśnienia akustycznego wytwarzany przez przetwornik przy tych samych warunkach zasilania jest wyższy o ok. 20 dB, a skuteczność podczas pracy jako odbiornik jest około czterokrotnie wyższa. Ujemną cechą tego typu przetworników jest stosunkowo złożony układ mechaniczny, duże rozmiary wynikające ze stosowania przetworników piezomagnetycznych wraz z falowodami oraz konieczność niezwykle starannego ustawienia reflektorów. Niektórych z w/w ujemnych cech pozbawione są przetworniki przedstawione na rys. 10.



Rys. 10. Przetwornik pierścieniowy z prostokątną płytą promieniującą: a) budowa, b) charakterystyka kierunkowości bez reflektorów, c) z układem reflektorów. 1 – przecięty pierścień, 2 – elektroda, 3 – płytka prostokątna, 4 – reflektor

Elementem pobudzającym płytkę prostokątną do drgań jest przecięty pierścień wykonany z materiału elektromechanicznie aktywnego, którym może być ceramika piezoelektryczna lub rdzeń z materiału piezomagnetycznego z nawiniętym uzwojeniem. Pobudzony do drgań przecięty pierścień zmienia swoje wymiary; wydłużenie pierścienia wzdłuż jego obwodu powodują powstanie zmiennego momentu zginającego w miejscach styku drgającej płytki z krawędziami przeciętego pierścienia. Pod wpływem tego zmiennego momentu zginającego płytka zostaje pobudzona do drgań giętych i promieniuje energię w skoncentrowaną w czterech wiązках; energia ta jest następnie odbijana od czterech reflektorów w wyniku czego na wyjściu przetwornika powstaje wiązka równoległych fal ultradźwiękowych. Na rys. 10 b) przedstawiono charakterystykę kierunkowości przetwornika z przeciętym pierścieniem piezoelektrycznym i aluminiową prostokątną płytką drgającą bez reflektorów a na rys. 10 c) charakterystykę kierunkowości tego samego przetwornika z układem reflektorów. Parametry przetwornika: $f = 39\ 390$ Hz, $Q = 200$, $Z = 1000\Omega$, $L = 130$ dB ($P=1$ W), $S_o = 2$ mV/ μ bar.

Inne rozwiązanie przetwornika z płytką prostokątną drgającą w modzie pasemkowym zostanie przedstawione w referacie.

7. PRZETWORNIKI ULTRADŹWIEKOWE PRACUJĄCE W PAŚMIE CZĘSTOŚLIWOŚCI 100 KHz – 2 MHz

Do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych w ośrodku gazowym w zakresie częstotliwości powyżej 100 kHz stosowane są na ogół dwa rodzaje przetworników: elektrostatyczne i piezoelektryczne. Przetworniki elektrostatyczne, ze względu na małą

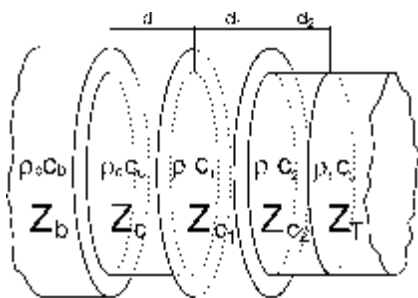
skuteczność są stosunkowo rzadko wykorzystywane jako nadajniki; częściej natomiast są stosowane jako odbiorniki fal ultradźwiękowych.

Zasadniczą grupę przetworników pracujących w tym paśmie częstotliwości stanowią przetworniki piezoelektryczne drgające w modzie grubościowym na częstotliwości podstawowej. Wymagania dotyczące impedancji akustycznej warstwy dopasowującej znajdującej się pomiędzy ceramiką piezoelektryczną i gazem są bardzo trudne do spełnienia dlatego wskazane jest stosowanie układów wielowarstwowych. Zagadnienie doboru odpowiednich warstw (zarówno ich impedancji jak i grubości) jest również bardzo istotne ze względu na charakterystykę funkcji przenoszenia, która ma decydujący wpływ na kształt i czas trwania impulsów ultradźwiękowych generowanych przez przetwornik.

7.1. Przetwornik ultradźwiękowy z płaskim elementem piezoelektrycznym

W większości zastosowań element piezoelektryczny drgający grubościowo ma kształt płaskorównoległego dysku. Górną granicę częstotliwości dla tego modu drgań wyznaczają względy technologiczne – ze względu na wytrzymałość mechaniczną płytki piezoelektryczne mogą być wykonywane o grubości nie mniejszej niż dziesiąte części milimetra co w praktyce oznacza ograniczenie częstotliwości do ok. 15 MHz. Należy jednak zaznaczyć, że występuje tu silna zależność między różnymi modami drgań płytki od stosunku średnicy płytki do jej grubości i w praktyce tylko niektóre z tych modów mogą być wykorzystane.

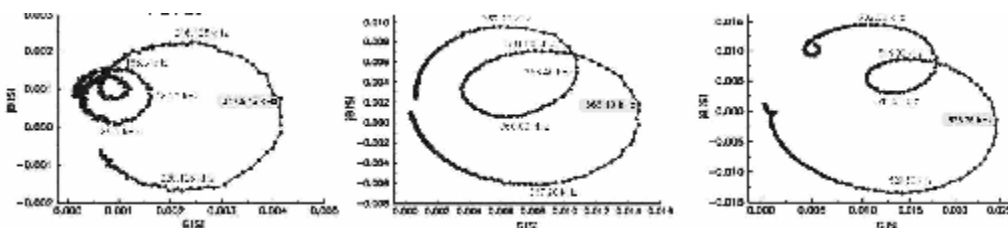
Właściwy dobór impedancji akustycznych wymaga opracowania ścisłych metod syntezy układów dopasowujących, które mogą mieć charakter rezonansowy lub nierezonansowy. Większość metod opiera się na zależnościach wyprowadzonych dla elektrycznych linii długich [5, 13]. Do obliczeń warstw dopasowujących wykorzystywane są wzory wynikające z analizy przetwornika w analogii do linii długich; impedancja dopasowująca jest tu obliczana jako średnia geometryczna impedancji piezoceramiki i impedancji ośrodka (wzory Czebyszewa). DeSilets, Fraser i Kino przeprowadzili analizę dopasowania pod kątem uzyskania optymalnego kształtu impulsu. Impedancje akustyczne warstw były przez nich obliczane w taki sposób by spełnione było kryterium dwumianowe [3]. Souquet, Defranould i Desbois wykazali, że gdy przy obliczaniu warstw spełniony jest warunek równości dobroci gałęzi elektrycznej i mechanicznej w układzie zastępczym przetwornika wtedy amplituda impulsu osiąga maksimum [19]. Interesujące jest porównanie wyników obliczeń impedancji dla różnych kryteriów dopasowania i różnej liczby warstw dopasowujących. Na rys. 11 przedstawiono model przetwornika piezoelektrycznego z dwiema warstwami dopasowującymi o impedancjach Z_{C1} i Z_{C2} i z warstwą tylną o impedancji Z_b ; przetwornik promieniuje energię do nieograniczonego ośrodka gazowego o impedancji Z_T .



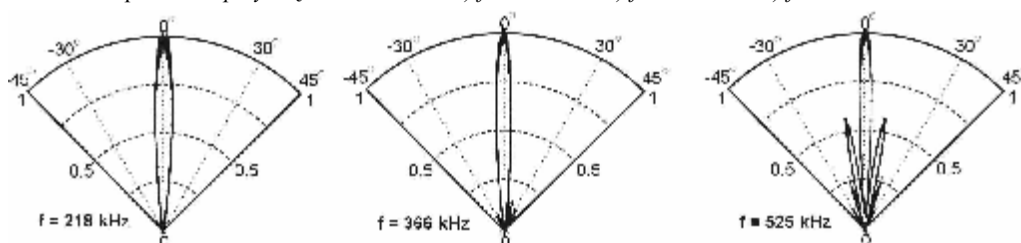
Rys. 11. Przetwornik piezoelektryczny z dwiema warstwami dopasowującymi.

Na podstawie obliczeń w/w modelu wykonano szereg przetworników pracujących w paśmie częstotliwości 100 kHz – 1 MHz [10]. Na rys. 12 i rys. 13 przedstawiono wyniki pomiarów

kilku przetworników pracujących przy częstotliwościach $f = 218$ kHz, $f = 366$ kHz oraz $f = 525$ kHz wyposażonych w warstwy dopasowujące wykonane z kompozytu ITAKOM.



Rys. 12. Charakterystyki amplitudowo-fazowe admitancji przetworników pracujących w powietrzu przy częstotliwościach: a) $f = 218$ kHz, b) $f = 366$ kHz, c) $f = 525$ kHz.



Rys. 13. Charakterystyki kierunkowości przetworników ultradźwiękowych pracujących w powietrzu przy częstotliwościach: a) $f = 218$ kHz, b) $f = 366$ kHz, c) $f = 525$ kHz.

Wszystkie przetworniki miały jednakową budowę i jednakową średnicę $D = 38$ mm. Dobroć mechaniczna wyznaczona z charakterystyk przedstawionych na rys. 12 wynosi odpowiednio: $Q = 54$, $Q = 104$ i $Q = 52$. Większa dobroć dla przetwornika pracującego przy częstotliwości $f = 366$ kHz wynika z zastosowania płytki ceramicznej z ceramiki PXE-4 firmy Philips, pozostałe przetworniki wykonane były na bazie ceramiki PZT produkowanej przez CERAD.

7.2. Przetwornik ultradźwiękowy ze sferycznym elementem piezoelektrycznym

W niektórych zastosowaniach niezbędne jest wykonanie przetwornika ogniskującego wiązkę ultradźwiękową. Do budowy takiego przetwornika pracującego przy częstotliwości 1.27 MHz zastosowano element piezoelektryczny w kształcie czaszy, w której stronę wklęsłą wyposażono w warstwę dopasowującą o parametrach jak dla przetwornika płaskiego. Opracowany przetwornik został wykorzystany w mikroskopie ultradźwiękowym, w którym w miejsce dotychczas stosowanej cieczy zastosowano powietrze dając początek nowego rodzaju mikroskopu ultradźwiękowego [7].

8. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ PRZETWORNIKÓW OPRACOWANYCH W PRACOWNI TECHNIKI ULTRADŹWIĘKOWEJ ITA PWR

Przedstawione rozwiązania przetworników ultradźwiękowych opracowanych na przestrzeni kilkunastu lat znalazły praktyczne zastosowania. Opracowane przetworniki wykorzystywane są zarówno w kraju jak i zagranicą w większości w zastosowaniach biernych jednak niektóre z nich mogą być również wykorzystane do zastosowań czynnych (np. koagulacja cząstek i pyłów - także radioaktywnych, koagulacja aerozoli, ograniczenie

powstawania piany, itp). Ze względu na ograniczenia objętości niniejszej pracy poniżej wymieniono jedynie niektóre obszary zastosowań opisanych przetworników. Należą do nich:

- pomiar wysokości urobku i nieciągłości strugi na przenośnikach taśmowych,
- pomiar wypełnienia zbiorników,
- pomiar przekroju wewnętrznego przewodów rurowych,
- rozpoznawanie położenia, kształtu i rozmiarów obiektów metodą ultradźwiękowej tomografii transmisyjnej,
- wyznaczanie temperatury i składu binarnych mieszanin gazowych metodą ultradźwiękowej tomografii transmisyjnej,
- skaningowa mikroskopia ultradźwiękowa z gazowym ośrodkiem sprzęgającym,
- pomiar prędkości przepływu gazów,
- parametryczne wytwarzanie fali akustycznej w powietrzu,
- demonstracja zjawiska lewitacji ultradźwiękowej.

LITERATURA

- [1] A. BARONE, J.A GALLEGU-JUAREZ, On a Modification of Vibrating Flat Plates in Order to Obtain Phase-Coherent Radiation, *Acustica*, **22**, 1969/70,
- [2] J. BEDNAREK, T. GUDRA, K. OPIELIŃSKI, Analiza wybranych parametrów równania zasięgu dla łącza aeroakustycznego, *Mat. XXXIX OSA*, Kraków, 1992, 113-116.
- [3] C.S. DESILETS C. S., J.D. FRASER, G.S. KINO, The design of efficient broadband piezoelectric transducers, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-25, **3**, 1978, 115-125.
- [4] J.A. GALLEGU-JUAREZ, G. RODRIGUEZ-CORAL, F. MONTERO, E. ANDREAS, New Advances in the Generation Sonic and Ultrasonic Radiation, *Proc. of UI '83*, 1983, 295-300.
- [5] H. GOLL, The design of broadband, fluid loaded, ultrasonic transducers, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-26, **6**, 1979, 385-393.
- [6] T. GUDRA, Przetwornik ultradźwiękowy do pracy w ośrodku gazowym, Patent, PL 178750.
- [7] T. GUDRA, Air-borne ultrasonic focusing transducer for phase sensitive scanning air microscope, *Proc. of 1997 World Congress on Ultrasonics*, Yokohama, Japan, 1997.
- [8] T. GUDRA, K.J. OPIELIŃSKI, Komputerowy model łącza ultradźwiękowego w powietrzu, *Akustyka Molekularna i Kwantowa*, **16**, Gliwice, 1995, 59-62.
- [9] T. GUDRA, K.J. OPIELIŃSKI, Przetwornik warstwowy piezoelektryczny do pracy w ośrodku gazowym, Patent, Polska, PL 175 654.
- [10] T. GUDRA, K.J. OPIELIŃSKI, Ultrasonic transducers working in the air with the continuous wave within the 50 kHz – 500 kHz frequency range, *Ultrasonics*, **42**, 2004, 453-458.
- [11] T. GUDRA, M. PLUTA, Materiał o małej impedancji akustycznej, Patent, Polska, PL 185 148.
- [12] T. GUDRA, E. TALARCZYK, Ultrasonic Air-borne Transducers with Vibration Plates in Stripe Mode, *Ultrasonics International'91, Conf. Proc, Le Touquet*, 1991, 411-414.
- [13] P.J. HIGMORE, Impedance matching at ultrasonic frequencies using thin transition layers, *Ultrasonic International '73, Conf. Proceedings*, 1973, 112-118.
- [14] Z. JAGODZIŃSKI, Przenoszenie sygnałów podwodnych na falach ultradźwiękowych, *Archiwum Akustyki*, **3**, 4, 1968, 373-378.
- [15] Z. JAGODZIŃSKI, Przetworniki ultradźwiękowe, WKL, Warszawa, 1997.
- [16] P. KIELCZYŃSKI, W. PAJEWSKI, M. SZALEWSKI, Ring piezoelectric transducers radiating ultrasonic energy into the air, *IEEE Trans. Ultrason. Ferr. Freq. Control*, **37**, 1, 1990, 38-43.
- [17] L.C. LYNWORTH, Ultrasonic impedance matching from solids to gases, *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, **12**, 1965, 37-48.
- [18] P.C. PEDERSEN, P. TRETIAK, P. HE, Impedance - matching properties of an inhomogeneous matching layer with continuously changing acoustic impedance, *JASA*, **72**, 1982, 327-336.
- [19] J. SOUQUET, P. DEFRAUOULD, J. DESBOIS, Design of low-loss wideband ultrasonic transducers for noninvasive medical application, *IEEE Trans. Son. Ultras.*, **26**, 2, 1979, 75-81.
- [20] E. TALARCZYK, Ultradźwiękowy przetwornik magnetostrykcyjny, Patent, Polska, Nr 78 874.