

E. BERDOWSKA, J. BERDOWSKI*Instytut Fizyki, Wyższa Szkoła Pedagogiczna, Częstochowa*

Analiza konstrukcji i własności czterowarstwowego przetwornika ultradźwiękowego

1. Wstęp

Zastosowanie fal ultradźwiękowych w skali światowej wzrasta z każdym rokiem w wyniku coraz szerszego stosowania tych fal w nauce, technice, medycynie i przemyśle. Są one ważnym narzędziem współczesnej inżynierii materiałowej, elektroniki, telekomunikacji, prac technologicznych i znajdują ciągle nowe zastosowania [1,2]. Zastosowania te inspirują także badania nad konstrukcją coraz lepszych przetworników ultradźwiękowych. Przetworniki piezoelektryczne są obecnie podstawowymi najpowszechniej stosowanymi źródłami fal ultradźwiękowych o bardzo szerokim zakresie częstotliwości od 20 kHz aż do około 10 GHz.

Bardzo wiele zastosowań fal ultradźwiękowych wymaga znacznych mocy tych fal. Do wytwarzania ultradźwięków o dużej mocy stosuje się przetworniki piezoelektryczne typu sandwich [1 – 4]. Przetwornik taki stanowi układ wielowarstwowy. Częstotliwość własna układu warstwowego różni się znacznie od częstotliwości samej płytki piezoelektrycznej i może być w pewnym zakresie regulowana przez dobór warstw biernych. Głównymi zaletami układów wielowarstwowych są możliwości osiągania dużej skuteczności działania przetwornika przez dobór własności mechanicznych i akustycznych poszczególnych warstw nieaktywnych oraz własności elektromechanicznych aktywnych warstw piezoelektrycznych w zależności od impedancji obciążających przetwornik od strony promieniującej i strony niepromieniującej.

Celem niniejszej pracy była konstrukcja warstwowego przetwornika nadawczo-odbiorczego, generującego krótkie impulsy fali ultradźwiękowej o częstotliwości 50 kHz i dużej mocy do ośrodka gazowego. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń teoretycznych pozwalających na prawidłowe zaprojektowanie konstrukcji przetwornika czterowarstwowego o możliwie optymalnych parametrach. W oparciu o te obliczenia został skonstruowany prototyp takiego przetwornika. Wykonano pomiary podstawowych parametrów i charakterystyk generacyjno-detekcyjnych przetwornika.

2. Podstawy analizy teoretycznej czterowarstwowego przetwornika ultradźwiękowego

Rozważając problemy związane z projektowaniem wielowarstwowego nadawczo-odbiorczego przetwornika ultradźwiękowego należy przeanalizować warunki, które mają wpływ na: częstotliwość generowanej fali, natężenie fali, sprawność przetwarzania, współczynnik zysku, kształt powierzchni falowej, czułość detekcji, szybkość działania, zasięg działania.

Podstawowe wymagania stawiane projektowanemu przetwornikowi przedstawiono we Wstępie. Jedną z podstawowych trudności było wymaganie generacji fali akustycznej dużej mocy w ośrodek gazowy. Z powodu bardzo dużej różnicy pomiędzy impedancjami akustycznymi ośrodka gazowego i ciała stałego (przetwornika) do niedawna było niemożliwe wykonanie takiego przetwornika pracującego efektywnie. Dopiero osiągnięcia w dziedzinie inżynierii materiałowej w okresie ostatnich lat pozwoliły tę trudność pokonać [5,6].

Rozważany piezoelektryczny przetwornik warstwowy służący do emisji fal ultradźwiękowych w ośrodek gazowy składa się z czterech podstawowych warstw:

1. warstwy aktywnej, zbudowanej z ceramiki piezoelektrycznej, będącej źródłem drgań — (p),
2. warstwy biernej tylnego obciążenia — (b),
3. warstwy biernej płyty czołowej — (r),
4. warstwy sprzęgającej (promieniującej) — (c).

Analizę teoretyczną tego przetwornika dokonano uogólniając model Domingueza [7,8] opracowany dla przetwornika trójwarstwowego. Model ten został stworzony na podstawie układu zastępczego o stałych rozłożonych.

Założeniem wyjściowym rozważań jest, że płaska, jednorodna fala sprężysta rozchodzi się wzdłuż cylindrycznego układu warstw. Podczas propagacji tej fali muszą być spełnione następujące warunki brzegowe:

- napężenie na powierzchniach granicznych przetwornika równa się zero,
- ciągłość przemieszczenia drgających cząsteczek na powierzchniach granicznych między warstwami,
- ciągłość siły na powierzchniach granicznych między warstwami.

Warunki te dla przetwornika czterowarstwowego pozwalają na zapisanie układu ośmiu równań zawierających osiem niewiadomych amplitud fal. Warunek rozwiązalności tego układu pozwala po długich przekształceniach otrzymać tzw. ogólne równanie przetwornika warstwowego. Otrzymane równanie ma postać:

$$\begin{aligned}
 & \frac{H_b H_r}{H_p^2} \sin(k_b l_b) \sin(k_p l_p) \sin(k_r l_r) \cos(k_c l_c) - \frac{H_b}{H_p} \sin(k_b l_b) \cos(k_p l_p) \cos(k_r l_r) \cos(k_c l_c) + \\
 & + \frac{H_b H_c}{H_p^2} \sin(k_b l_b) \sin(k_p l_p) \cos(k_r l_r) \sin(k_c l_c) + \frac{H_b H_c}{H_p H_r} \sin(k_b l_b) \cos(k_p l_p) \sin(k_r l_r) \sin(k_c l_c) + \\
 & - \frac{H_r}{H_p} \cos(k_b l_b) \cos(k_p l_p) \sin(k_r l_r) \cos(k_c l_c) - \frac{H_c}{H_p} \cos(k_b l_b) \cos(k_p l_p) \cos(k_r l_r) \sin(k_c l_c) + \\
 & + \frac{H_c}{H_r} \cos(k_b l_b) \sin(k_p l_p) \sin(k_r l_r) \sin(k_c l_c) - \cos(k_b l_b) \sin(k_p l_p) \cos(k_r l_r) \cos(k_c l_c) = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie: k_i — liczba falowa w i -tej warstwie,

$$H_i = S_i Z_i = S_i \rho_i v_i$$

S — pole poprzecznego przekroju warstwy,

ρ_i — gęstość materiału warstwy,

v — prędkość propagacji fali sprężystej w warstwie.

Równanie to przedstawia wzajemne zależności pomiędzy własnościami fizycznymi poszczególnych warstw a ich wymiarami geometrycznymi. Ze względu na złożoność obliczenia wykonuje się numerycznie a wyniki przedstawia na wykresach dwu- lub trójwymiarowych. Rozwiązując problem zakładamy rodzaj materiałów poszczególnych warstw oraz grubość warstwy piezoelektrycznej i warstwy promieniującej. W ten sposób otrzymujemy zależność funkcyjną pomiędzy grubościami $l_r = f(l_b)$ przy pozo-

stałych dwu parametrach (zwykle $\frac{2l_p}{\lambda_p}$, $\frac{2l_c}{\lambda_c}$).

Liczba możliwych rozwiązań spełniających równanie (1) jest nieskończenie duża. Jednak te różne rozwiązania nie są równoważne, ponieważ nie dają identycznego wyniku w postaci natężenia fali ultradźwiękowej promieniowanej przez przetwornik.

Korzystne jest, aby amplituda fali promieniowana przez warstwę czołową A_c była jak największa, a amplituda fali promieniowana przez warstwę tylną A_b jak najmniejsza. Miarą wydajności generacji przetwornika jest tzw. współczynnik zysku zdefiniowany jako [8]:

$$G = \frac{A_c^2}{A_b^2} \quad (2)$$

Optymalne warunki generacji znajduje się szukając maksimum funkcji G . Należy jednak pamiętać, że G jest funkcją wielu zmiennych a liczenie kolejnych pochodnych cząstkowych daje wiele kombinacji poszczególnych parametrów. Można wykazać, że duże wartości G uzyskuje się dla struktur, w których $\frac{Z_b}{Z_p} \gg 1$, $\frac{Z_r}{Z_p} \ll 1$, $Z_c \approx \sqrt{Z_r Z_g}$ (Z_g — impedancja akustyczna ośrodka gazowego) oraz grubości płytki piezoelektrycznej $l = \frac{\lambda_p}{2}$ lub 0. W praktyce wykorzystuje się ten drugi przypadek tzn. płytki piezoelektryczne bardzo cienkie. Uzyskuje się wartości $G_{\max}$ kilkadziesiąt. Jest to ogromną zaletą przetworników warstwowych, że wielokrotnie większe natężenie fali emitują one do przodu aniżeli do tyłu.

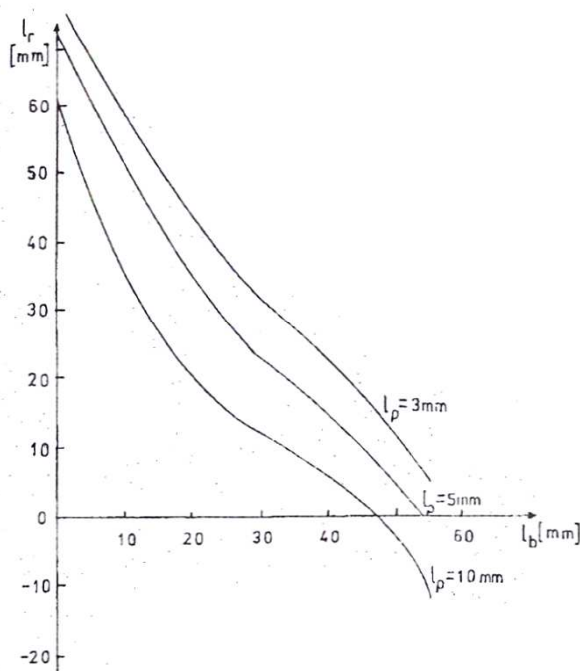
3. Obliczenia numeryczne konstrukcji przetwornika

W oparciu o zależności teoretyczne (1) i (2) napisano program numeryczny pozwalający liczyć optymalne parametry konstrukcyjne przetwornika czterowarstwowego. Wyjściowymi założeniami projektowymi przetwornika, opartymi na wcześniejszych

pracach autorów [6] były:

- częstota generowanej fali 50 kHz,
- warstwę piezoelektryczną stanowi ceramika cyrkonianowo-ołowiowa EC-64 o grubości $l_p = 5 \text{ mm}$,
- warstwa tylna zbudowana ze stali,
- materiałem warstwy przedniej — duraluminium,
- warstwa sprzęgająca wykonana z poliuretanu o grubości ćwierćfali.

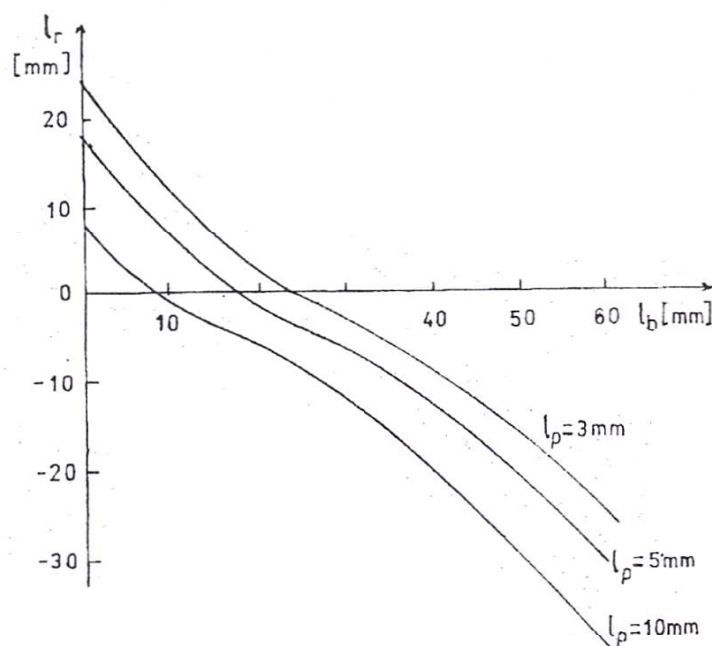
Wykorzystując te założenia wykonano obliczenia numeryczne rodzin charakterystyk $L_n = f(l_b)$ przy $l_c = \frac{\lambda_c}{4}$. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach. Rys. 1 przedstawia rodzinę charakterystyk dla trzech wartości l_p , obliczone przy założeniu, że przekrój poprzeczny wszystkich warstw jest jednakowy. Na Rys. 2 zestawiono charakterystyki dla trzech wartości l_p obliczone przy założeniach, że $S_b = S_p$, $S_r = S_c$, $\frac{S_r}{S_p} = \frac{S_c}{S_b} = 1,77$. Charakterystyki te pozwalają szybko znaleźć szukane parametry konstrukcyjne przetwornika czterowarstwowego.



Rys. 1. Graficzne przedstawienie rozwiązania ogólnego równania przetwornika czterowarstwowego dla $l_p = \text{const}$, $l_c = \frac{\lambda_c}{4}$, $S_b = S_p = S_r = S_c$

4. Charakterystyki i parametry generacyjno-detekcyjne przetwornika

Konstruowany przetwornik miał pracować jako nadawczo-odbiorczy. Ze względu na ten podwójny charakter działania wszystkie mierzone charakterystyki powstały z założenia dwu podstawowych charakterystyk generacyjnej i detekcyjnej.

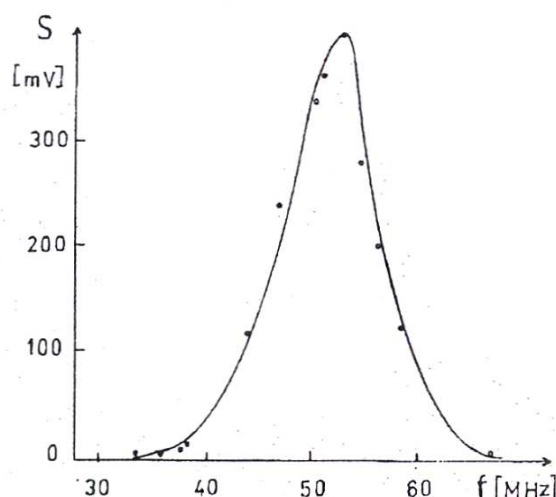


Rys. 2. Rodzina charakterystyk przetwornika czterowarstwowego dla $l_p = \text{const}$,

$$l_c = \frac{\lambda_c}{4}, S_b = S_p, S_r = S_c, \frac{S_r}{S_p} = \frac{S_c}{S_b} = 1,77$$

Poniżej zostaną przedstawione niektóre ze zmierzonych charakterystyk generacyjno-detekcyjnych przetwornika.

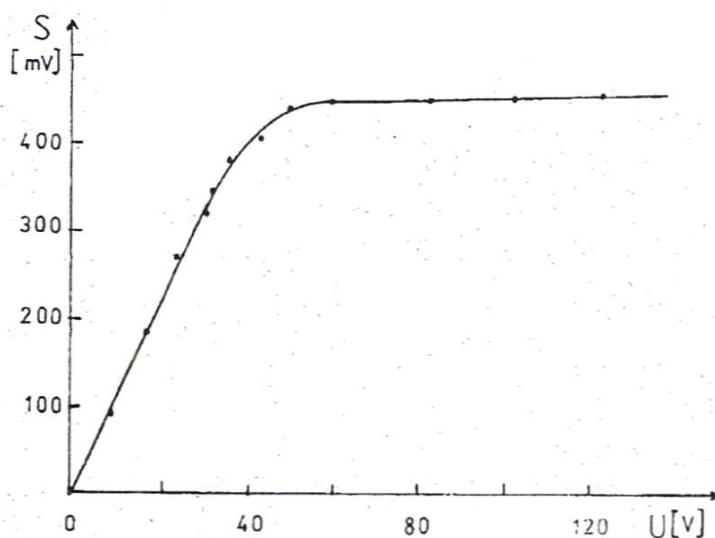
Rys. 3 przedstawia charakterystykę częstotliwościową przetwornika. Wynika z niej częstotliwość rezonansowa $f_r = 52\text{ kHz}$, a szerokość rezonansu na poziomie 3 dB $\Delta f = 10\text{ kHz}$.



Rys. 3. Charakterystyka częstotliwościowa przetwornika

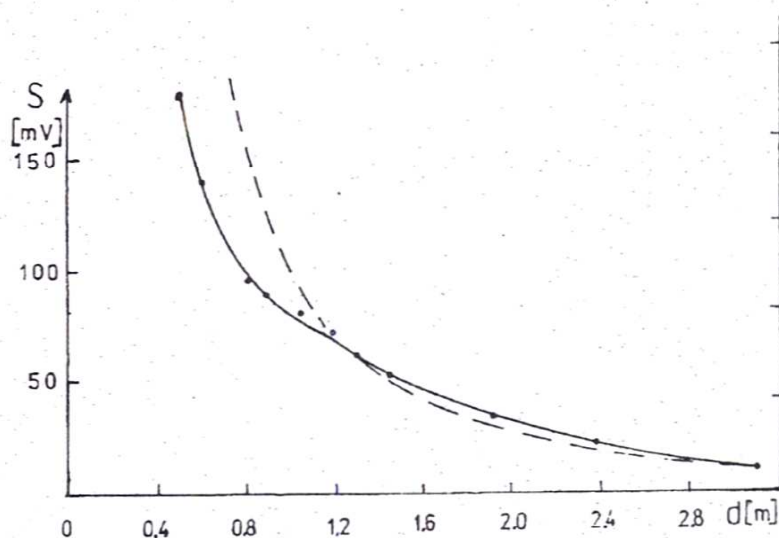
Na Rys. 4 pokazano zależność wielkości detekowanego przez przetwornik sygnału impulsu powrotnego od napięcia wcz. na warstwie piezoelektrycznej. Pomiary wykonano dla częstotliwości rezonansowej oraz odległości powierzchni czołowej przetwornika od ekranu odbijającego $d = 0,6\text{ m}$. Z charakterystyki tej wynika, że do wielkości syg-

nału $S = 420$ mV zależność jest liniowa, a następnie sygnał ustala się na poziomie $S = 450$ mV. Dzieje się tak dlatego, że w układzie detekcyjnym zastosowano dodatkowe zabezpieczenie obcinające sygnały o większej wartości.



Rys. 4. Charakterystyka napięciowa przetwornika

Rys. 5 przedstawia zależność wielkości detekowanego przez przetwornik sygnału impulsu powrotnego od odległości pomiędzy przetwornikiem a ekranem odbijającym, czyli długością drogi przebytej przez falę ultradźwiękową. Badania przeprowadzono dla częstotliwości rezonansowej oraz napięcia w.c.z. na przetworniku $U = 19,0$ V. Dla porównania zestawiono jakby wyglądała ta zależność gdyby $S = f(d^{-2})$. Z porównania tego wynika, że malenie sygnału jest wolniejsze niż typu d^{-2} , która to zależność występuje dla źródeł punktowych. Występują tu równocześnie dwa zjawiska: rozbieżność wiązki ultradźwiękowej i tłumienie fali w ośrodku gazowym.



Rys. 5. Zależność wielkości rejestrowanego przez przetwornik sygnału od długości drogi przebytej przez impuls

Wykorzystując zależność opisującą zasięg pola bliskiego [1]:

$$L = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (3)$$

gdzie: D — średnica warstwy emitującej falę,

λ — długość fali w ośrodku,

wyznaczono, że dla naszego przetwornika $L = 98$ mm.

5. Podsumowanie

Uogólniając model Domingueza wyprowadzono ogólne równanie przetwornika czterowarstwowego. Z równania tego wyznaczono numerycznie optymalne parametry konstrukcyjne przetwornika. Jak wynika z pomiarów parametrów i charakterystyk generacyjno-detekcyjnych zaprojektowanego i wykonanego przetwornika założone cele, które wymieniono we Wstępie zostały osiągnięte. Różnice pomiędzy wyliczonymi teoretycznie parametrami przetwornika a wynikami eksperymentalnymi są niewielkie.

Literatura

- [1] Śliwiński A. *Ultradźwięki i ich zastosowania*, WNT, Warszawa, 1993.
- [2] Talarczyk E. *Podstawy techniki ultradźwiękowej*, t. 1, Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław, 1990.
- [3] Pajewski W. *Archiwum Akustyki*, **9**, 1, (1974).
- [4] Golanowski J., Gudra T. *Podstawy techniki ultradźwiękowej*, t. 2, Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław, 1990.
- [5] Sage S., *Ultrasonic Transducers*, Milltronics, Toronto, 1986.
- [6] Berdowska E., Berdowski J. *Molecular and Quantum Acoustic*, **15**, 42, (1994).
- [7] Dominguez R., Ranz C. *Acustica*, **29**, 156, (1973).
- [8] Dominguez R., Ranz C. *Acustica*, **29**, 161, (1973).

E. BERDOWSKA, J. BERDOWSKI

Analysis of Construction and Properties of Four Layers Ultrasonic Transducer

Summary

The detailed theoretical analysis and computer calculations, made it possible to design the transducer which could operate at a frequency of about 50 kHz and generated the high power ultrasonic pulses in gases. The main parameters of the four layers structure have been investigated. The results of experimental analysis includes a study of frequency characteristic, generation efficiency, detection sensitivity etc. for the sandwich transducer are presented.