

Andrzej MLECZKO

ZWIĘKSZENIE SPRAWNOŚCI PIEZOELEKTRYCZNYCH PRZETWORNIKÓW  
METODĄ ELEKTRYCZNYCH OBWODÓW DOPASOWUJĄCYCH

**Streszczenie.** W pracy omówiono jedną z możliwości zwiększenia sprawności piezoelektrycznych przetworników płytkowych pracujących w zakresie około 30-300 MHz. Polega ona na zastosowaniu biernych czwórników dopasowujących impedancje przetwornika i generatora.

Omówiono metodę graficzną projektowania takich czwórników. Przedstawiono rezultaty uzyskane przez autora po zastosowaniu wymienionej metody do wybranych egzemplarzy przetworników.

### 1. Wstęp

W większości zastosowań piezoelektrycznych przetworników generujących ultradźwięki (np. akustyczne modulatory, deflektory itd.) wymagana jest jak największa moc propagowanej przez przetwornik fali ultradźwiękowej. Wymaganie to można spełnić bądź przez optymalną konstrukcję przetwornika (np. zastosowanie łączenia adhezyjnego), bądź przez dobór odpowiednich materiałów zapewniający najlepsze dopasowanie rezonatora do falowodu.

Przy określonych własnościach fizycznych materiału piezoelektrycznego oraz zadanej mocy generatora pobudzającego inną z możliwości osiągnięcia tego celu jest zapewnienie maksymalnie dużej transmisji mocy czynnej w.cz. od generatora do obciążenia, którym jest wspomniany przetwornik.

Celem pracy jest przeanalizowanie tej możliwości, tj. wybór właściwej metody obliczeniowej i doświadczalna jej weryfikacja dla określenia opłacalności i przydatności do celów praktycznych.

### 2. Przetwornik jako obciążenie generatora wysokiej częstotliwości

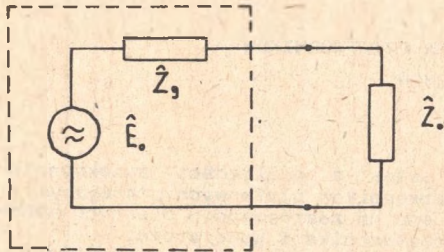
Dla omówienia problemu należy przypomnieć pewne niezbędne informacje i metody teorii obwodów [1].

Typowy układ zawierający źródło sygnału zmiennego i obciążenie przedstawia rys. 1.

Moc czynna oddawana przez źródło  $\hat{E}_0$  do obciążenia  $\hat{Z}_0$  jest maksymalna, gdy spełniony jest warunek:

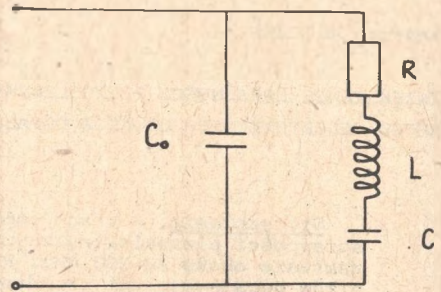
$$\hat{Z}_0 = (\hat{Z}_g)^* \quad (1)$$

Przedyskutujemy możliwości jego spełnienia w przypadku, gdy obciążeniem generatora jest przetwornik piezoelektryczny propagujący falę akustyczną do ośrodka stałego lub ciekłego.



Rys. 1. Generator w.c.z. obciążony impedancją

$\hat{E}_g$  - SEM wysokiej częstotliwości,  
 $\hat{Z}_g$  - impedancja wewnętrzna generatora,  
 $\hat{Z}_o$  - impedancja obciążenia



Rys. 2. Przybliżony układ zastępczy przetwornika

Urządzenie elektromechaniczne, jakim jest piezoelektryczny przetwornik w zakresie częstotliwości około 30–300 MHz można na mocy analogii elektromechanicznych przedstawić w formie następującego dwójnika elektrycznego [2] (rys. 2).

Symbolem  $C_o$  oznaczono pojemność statyczną kondensatora utworzonego przez metalowe elektrody oddzielone niepiezoelektrycznym dielektrykiem. Druga gałąź obwodu jest analogiem zjawiska zamiany energii elektrycznej na mechaniczną na skutek piezoeffectu.

Admitancja takiego dwójnika ma na ogół wartość zespoloną równą:

$$\hat{Y}_o = \frac{R}{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} + j \left[ \omega C_o - \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \right] \quad (2)$$

$$\hat{Y}_o = G(\omega) + jB(\omega) \quad (3)$$

Selektywne własności dwójnika powodują, że istnieje taka wartość częstości

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{C}{C_o} - \frac{R^2 C}{L} - \frac{1}{LC_o} \sqrt{R^2 (R^2 C^2 C_o^2 - 4LCC_o^2 - 2LC^2 C_o) + L^2 C^2} \right) \right] \quad (4)$$

dla której:

$$B(\omega_0) = 0 \quad (5)$$

Wtedy przetwornik reprezentuje sobą przewodność rzeczywistą i pobiera ze źródła największą moc czynną. Jest to tzw. częstotliwość rezonansowa przetwornika.

Jak widać, pomiar częstotliwościowej charakterystyki admitancji wejściowej przetwornika umożliwi określenie jego częstotliwości rezonansowej, a więc optymalnego punktu pracy.

W dalszej części pracy (rozd. III) zamieszczone są niektóre wyniki uzyskane przy użyciu tej metody. Tak więc w ogólnym przypadku zagadnienie sprowadza się do tego, aby między impedancją generatora  $\hat{Z}_g$  a impedancją wejściową przetwornika  $\hat{Z}_0$  zachodził związek (1).

Najczęściej znana jest tylko wartość  $|\hat{Z}_g|$  (50  $\Omega$  lub 75  $\Omega$ ), natomiast na ogół brak dokładnych informacji o jej charakterze. Dlatego często najbardziej opłacalnym i najczęściej stosowanym sposobem jest zapewnienie równości modułów wspomnianych impedancji. Należy więc zastosować transformator impedancji - na ogół, jak wiadomo [3], pasywny czwórnik liniowy, który obciążony impedancją  $\hat{Z}_0$ , transformuje ją do wartości:

$$\hat{Z}_{we} = \frac{\hat{A}\hat{Z}_0 + \hat{B}}{\hat{C}\hat{Z}_0 + \hat{D}} \quad (6)$$

gdzie:

$\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$  - elementy macierzy łańcuchowej czwornika dopasowującego, których wartości określa jego konstrukcja.

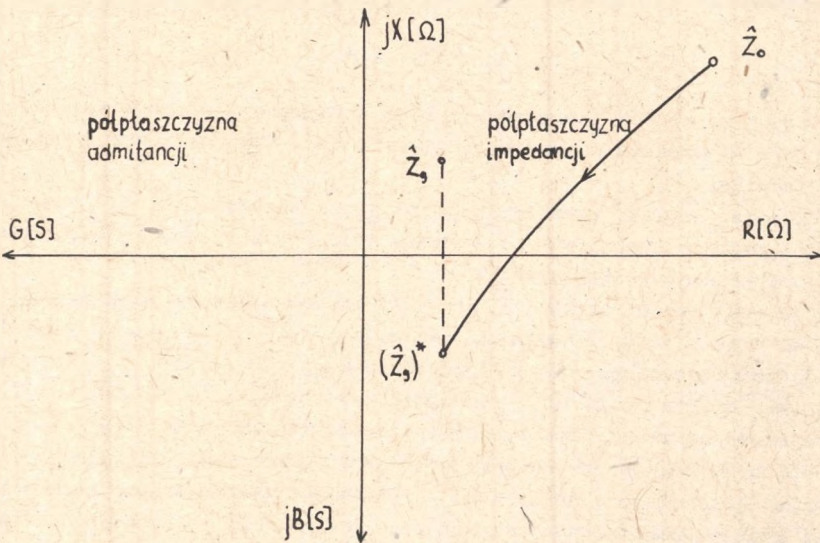
Oczywiście powinno być:

$$\hat{Z}_{we} = (\hat{Z}_g)^* \quad (7)$$

Zagadnienie sprowadza się więc do syntezy biernego czwornika liniowego (określenie wartości  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$ ).

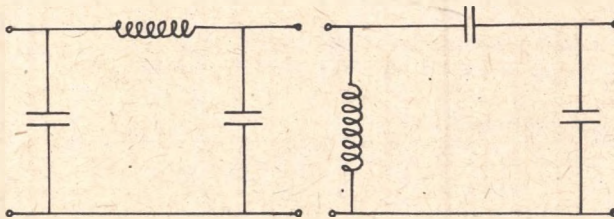
Spśród znanych metod [1] do przedstawionych celów szczególnie nadaje się metoda graficzna [3, 4]. Z uwagi na jej szybkość i przejrzystość a także - jak stwierdzono - wystarczającą dokładność może być z powodzeniem stosowana w wielu przypadkach. Polega ona na graficznym przedstawieniu na płaszczyźnie Gaussa każdej z zespolonych impedancji.

Wychodząc z punktu  $\hat{Z}_0$  należy szeregowo bądź równolegle do obciążenia przyłączać elementy L, C (które utworzą szukany czwórnik), aby dojść do punktu  $(\hat{Z}_g)^*$ . Przykładowo przyłączając szeregowo cewkę o indukcyjności L przesuwamy się o odcinek  $\omega L$  w kierunku osi jX.



Rys. 3. Płaszczyzna impedancji - admitancji (Gausa)

Odpowiednio przyłączając następane elementy dochodzi się dożądanego punktu, realizując w ten sposób dopasowanie impedancji. Wszystkie dołączone elementy tworzą szukany czwórnik, którego najczęściej spotykane typy [3] przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Najczęściej spotykane czworniki o sprzężeniu bezpośrednim

Często w przypadku dość rozbudowanych układów opłaca się zapewnić tylko równość modułów impedancji, tj.

$$|\hat{Z}_g| = |\hat{Z}_o| \quad (8)$$

zamiast pełnego warunku (1).

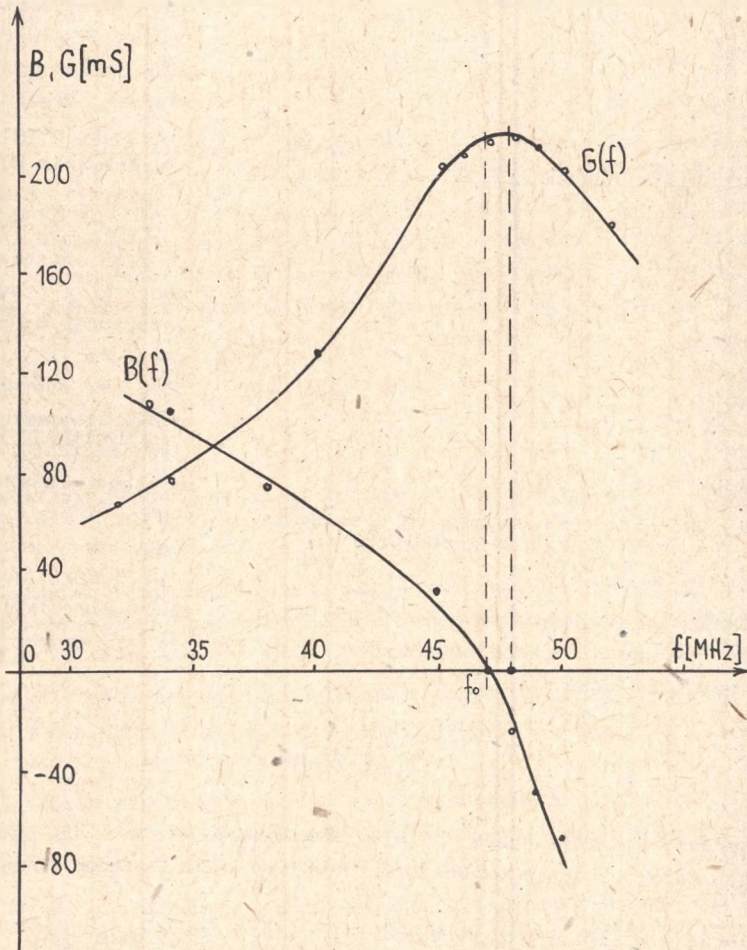
Zyskuje się na prostocie układu (który czasami sprowadza się do jednego elementu) przy niewielkim zmniejszeniu sprawności. Należy nadmienić, że jako elementów dopasowujących można także użyć obwodów o sprzężeniu magnetycznym [5], zwłaszcza wtedy, gdy różnice między  $|\hat{Z}_g|$  i  $|\hat{Z}_o|$  są znaczne.

### 3. Konstrukcje obwodów dopasowujących i wyniki pomiarów mocy

Wyżej opisaną procedurę zastosowano do przebadania kilku egzemplarzy piezoelektrycznych przetworników wykonanych z różnych materiałów i pracujących przy różnych częstotliwościach.

1. Przetwornik z ceramiki piezoelektrycznej PP6 obciążony kwarcem topionym jako ośrodkiem akustycznym

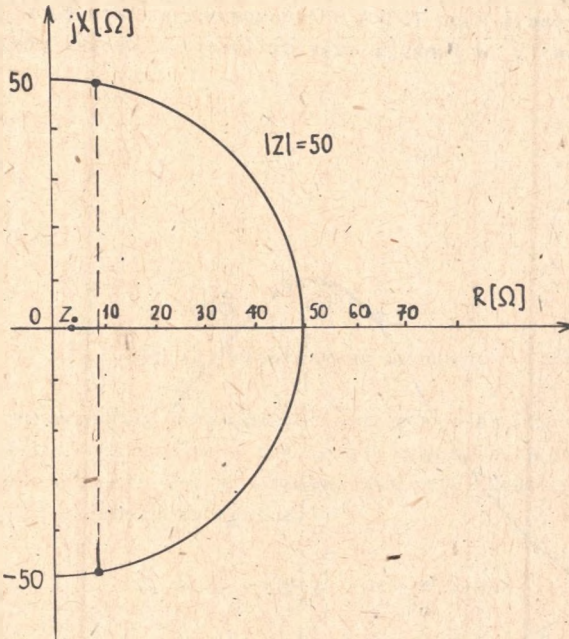
Przy użyciu mostka admitancji typu TESLA BM4 dokonano pomiaru admitancji wejściowej przetworników  $\hat{Y}$  w funkcji częstotliwości. Wyniki pomiarów przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Zależność impedancji przetwornika od częstotliwości

Z położenia punktu  $B = 0$  odczytano częstotliwość rezonansową przetwornika  $f_0 = 47$  MHz. Jest to dosyć dokładna metoda pomiaru tego parametru, który jest charakterystyczny dla każdego przetwornika.

Dla  $f = f_0$  przetwornik reprezentuje sobą impedancję prawie rzeczywistą  $R = 4,9\Omega$ .



Rys. 6. Oporność przetwornika w rezonansie na półpłaszczyźnie impedancji

z wystarczającą dokładnością zrealizowane przez szeregowe dołączenie ujemnej reaktancji o odpowiedniej wartości. Wartość szeregowej pojemności obliczona z warunku:

$$\left| -\frac{1}{\omega_0 C_0} \right| = 50 \quad (9)$$

dla uprzednio znalezionej  $f_0 = 47$  MHz wynosi  $C_0 = 68$  pF. Zastosowanie trymera ceramicznego o odpowiednim zakresie częstotliwości dało widoczny efekt.

Mierzona metodami akustycznymi [6] wartość mocy propagującej się w kryształach fali akustycznej (proporcjonalna do doprowadzonej mocy elektrycznej) wzrosła o około 11%, co już daje pewne korzyści.

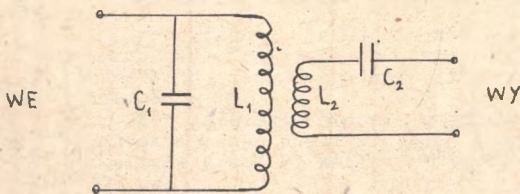
Generator zasilający w.c.z., dla którego  $R_w = 50\Omega$  nim obciążony pracuje w stanie bliskim zwarcia, a więc w warunkach bardzo niekorzystnych. Oczywiście maleje także moc akustyczna promieniowana przez przetwornik. Graficzne przedstawienie sytuacji na półpłaszczyźnie  $R, jX$  przedstawia rys. 6.

Punkt  $Z_0$  reprezentuje sobą obciążenie (przetwornik w rezonansie). Impedancja wyjściowa generatora  $|Z_g|$  równa jest  $50\Omega$ , jej charakter w przypadku stosowanego UGM-1 jest zbliżony do rzeczywistego. Spełnienie warunku (8) polega na przejściu do punktu okręgu  $|Z| = 50\Omega$ . Może to być

## 2. Przetwornik z niobianu litu obciążony falowodem z $\text{PbMoO}_4$

Dla częstotliwości pracy  $f_0 = 95 \text{ MHz}$  wartość jego impedancji wynosi około  $1,8 [\Omega]$  i jest praktycznie rzeczywista. Jej dosyć mała wartość powoduje konieczność zastosowania obwodów o sprzężeniu magnetycznym. W tym przypadku zgodnie z [3] zaprojektowano obwód typu M z dostrojonym uzwojeniem wtórnym. Do obliczeń przyjęto następujące dane:

- oporność dopasowywana  $R_0 = 2 \Omega$ ,
- dobroć obwodu  $Q = 3$ ,
- przekładnia transformatora  $p = 0,8$ .



Rys. 7. Obwód dopasowujący typu M

Uzyskano następujące wartości elementów obwodu (rys.7):

- $C_1 = 80 \text{ pF}$
- $C_2 = 60 \text{ pF}$
- $L_1 = 60 \text{ nH}$
- $L_2 = 45 \text{ nH}$

Zmierzona wartość impedancji wejściowej tego czwórnika obciążonego przetwornikiem wynosi około  $46 \Omega$ , co - jak się okazuje - jest efektem zupełnie zadowalającym. W tym przypadku bowiem moc generowanej fali akustycznej wzrosła o około 80%, co świadczy o poprawności konstrukcji. Celowość stosowania tego typu transformatorów nie budzi zastrzeżeń.

## 4. Podsumowanie

Przedstawione rozważania upoważniają do wyciągnięcia następujących wniosków:

1. Jedną ze skutecznych metod osiągnięcia możliwie największej mocy fali ultradźwiękowej generowanej przez przetwornik jest zastosowanie elektrycznych układów dopasowujących impedancję przetwornika i generatora.
2. W przypadku niezbyt dużych różnic między  $|\hat{Z}_g|$  i  $|\hat{Z}_0|$  zadanie to spełniają w sposób zadowalający pasywne czwórniki liniowe o sprzężeniu indukcyjnym lub pojemnościowym.
3. Zastosowanie najprostszych nawet jednoelementowych transformatorów daje widoczny o około 10% wzrost sprawności, układy rozbudowane dają wyniki znacznie lepsze.
4. Metoda graficzna przy swej szybkości i prostocie daje wystarczającą do tego celu dokładność.

## LITERATURA

- [1] АТЕВІЕКОВ G.J.: Teoria liniowych obwodów elektrycznych. PWN, Warszawa 1965.
- [2] BERGMAN Ł.: Ultrazwuk i jego primienienije w naukie i tiechnike. Moskwa 1956.
- [3] EBERT J., FIOK A.: Projektowanie obwodów dopasowujących wysokiej częstotliwości. PWN, Warszawa 1971.
- [4] EBERT J.: Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka z. 56, 1967.
- [5] FIOK A.: Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka z. 56, 1967.
- [6] FINAK J., KLESZCZEWSKI Z., WOJEWODA M.: Acustica, 5, 36, s. 341 1976/77.

ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДГОНЯЮЩИХ ЦЕПЕЙ

## Р е з ю м е

В работе анализируется одна из возможностей повышения к.п.д. пьезоэлектрических пластинчатых преобразователей работающих в диапазоне 30-300 МГц, которая заключается в применении пассивных четырёхполюсников подгоняющих импеданции преобразователя и генератора. Представлено графический метод проектирования таких четырёхполюсников и результаты полученные автором при применении метода для некоторых избранных преобразователей.

THE ENHANCEMENT OF THE EFFICIENCY OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS WITH  
THE USE OF ELECTRIC MATCHING CIRCUITS

## S u m m a r y

One of the possibilities of the enhancement of the efficiency of lamellar piezoelectric transducers working in the range from 30 to 300 MHz is discussed. The method presented consists in the application of passive four-terminal network for impedance matching of transducer and generator. A graphical method of design of such four-terminal networks is discussed. The results obtained by the author for some selected transducers are presented.

Wpłynęło do Redakcji 27.XI.1979 r.

Recenzent

Prof. dr hab. Aleksander Opilski