



BIULETYN WAT  
VOL. LV, NR 1, 2006

## Zastosowanie podzespołów z akustyczną falą powierzchniową do przetwarzania sygnałów

ADAM KAWALEC

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Radioelektroniki,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wybrane zastosowania podzespołów z akustyczną falą powierzchniową dla przetwarzania sygnałów. W rozważaniach opierających się na teorii widmowej uwzględniono współczynnik metalizacji elektrod, wpływający na zmianę prędkości fali powierzchniowej dla elektrod zwartych i rozwartych elektrycznie oraz na efektywność wzbudzenia fali dla wyższych overttonów. W teorii widmowej uwzględniono pełną zespoloną efektywną przenikalność powierzchniową, której część urojona opisuje wzbudzenie akustycznych fal objętościowych przez przetwornik międzypalczasty. Podano przykład realizacji eksperymentalnej filtru, którego zniekształcenia charakterystyki częstotliwościowej odpowiadają urojonej części efektywnej przenikalności powierzchniowej. Uwzględniając wyniki otrzymane z analizy teoretycznej, dokonano syntezy linii dyspersyjnej oraz zaprezentowano charakterystyki eksperymentalne tych linii na podłożu kwarcowym, stosowane dla przetwarzania radiolokacyjnych sygnałów złożonych. Praca zawiera również analizę generatorów bazujących na linii opóźniającej z akustyczną falą powierzchniową dla potrzeb pomiarowych wielkości fizycznych, takich jak siła i przyspieszenie. Przedstawiono występujące problemy technologiczne i wyniki badań generatora z linią opóźniającą, zawierającą dwa współpracujące przetworniki międzypalczaste, oraz wyniki badań praktycznie wykonanego czujnika siły w technologii akustycznej fali powierzchniowej.

**Słowa kluczowe:** akustyczne fale powierzchniowe, filtry i sensory z AFP

**Symbole UKD:** 621.396.96

### 1. Wstęp

Akustyczne fale powierzchniowe (AFP) [1] propagujące się przy powierzchni materiału piezoelektrycznego mogą być wykorzystane w unikalnym przetwarzaniu sygnału, co w pewnych przypadkach jest niemożliwe do realizacji za po-

mocą podzespołów konwencjonalnej elektroniki. Są one użyteczne w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 1,5 GHz, w paśmie od 0,1-500 MHz oraz długości odpowiedzi impulsowej do 100  $\mu$ s. Generalnie, podzespoły z akustyczną falą powierzchniową mogą być syntetyzowane zgodnie z wymaganą charakterystyką amplitudową oraz fazową. Są one stabilne i nadają się do produkcji seryjnej.

Podstawowym elementem podzespołów z akustyczną falą powierzchniową są przetworniki międzypalczaste złożone z układu elektrod metalowych naniesionych na powierzchnię piezoelektryka. Ich geometria i sposób połączenia między sobą wynikają z konkretnego przypadku dla danego podzespołu i wpływają na charakterystykę częstotliwościową podzespołu. Przykładem filtru z dwoma współpracującymi przetwornikami są linie dyspersyjne służące do generacji sygnałów złożonych i ich przetwarzania, stosowane w stacjach radiolokacyjnych. Linie dyspersyjne zajmują szczególne miejsce w technice przetwarzania sygnałów — ze względu na złożoną konstrukcję i wysokie wymagania charakterystyczne dla techniki wojskowej. Istotny postęp w radiolokacji osiągnięto właśnie dzięki tym podzespołom, dobrze wypełniającym lukę w możliwościach klasycznej elektroniki.

Ze względu na duże możliwości w doborze konfiguracji przetworników międzypalczastych oraz dostępnych materiałów piezoelektrycznych, podzespoły te mogą służyć do realizacji wielu skomplikowanych funkcji związanych z przetwarzaniem sygnałów. Wymaga to jednak ich analizy i syntezy z koniecznością stosowania efektywnych procedur numerycznych.

Linia opóźniająca z akustyczną falą powierzchniową może być również zastosowana dla realizacji generatora wykorzystywanego w czujnikach wielkości fizycznych, takich jak siła czy przyspieszenie.

Filtr z AFP jest liniowym czwórnikiem biernym, złożonym z dwóch współpracujących dwukierunkowych przetworników międzypalczastych. Jego własności opisane są poprzez charakterystyki częstotliwościowe oraz admitancje każdego z przetworników. Do analizy filtru stosuje się następujące metody:

- schemat zastępczy Mezona [20],
- model  $\delta$ -funkcji [21], niepozwalający na uwzględnienie tzw. efektów drugiego rzędu,
- metoda modów sprzężonych [22] (COM), która jest obecnie powszechnie akceptowana. W metodzie tej tworzone są równania różniczkowe z zachowaniem podstawowych zasad fizyki, dobrze opisujące zdefiniowane zjawiska ważne w partykularnych aplikacjach,
- teoria widmowa — teoria polowa oparta na fundamentalnych relacjach pozwala po dodaniu dobrze zdefiniowanych uproszczeń otrzymać zamknięte wyrażenia analityczne dla prądów elektrod podłączonych do szyn zbiorczych przetwornika. Teoria widmowa przedstawiona przez Blotekjaera, a następnie rozwinięta przez Danickiego [2, 3], [4, 5] jest bardzo obiecująca w badaniach wpływu elektrod przetwornika międzypalcza-

stego na propagującą się pod nim falę powierzchniową z uwzględnieniem współczynnika metalizacji elektrod oraz wzbudzenia wyższych harmonicznych przez strukturę przetwornika.

## 2. Efekty drugiego rzędu

Dwa współpracujące przetworniki międzypalczaste, tworzące filtr z akustyczną falą powierzchniową, naniesione są na powierzchni materiału piezoelektrycznego o ściśle określonych własnościach, co powoduje, że w praktyce charakterystyka częstotliwościowa jest zniekształcona wskutek istnienia dodatkowych sygnałów oprócz sygnału właściwego. Należy do nich zaliczyć:

- sygnał bezpośredniego przejścia, związany z pojemnością elektryczną między przetwornikami międzypalczastymi. Powoduje to pojawienie się periodycznych zniekształceń na charakterystyce częstotliwościowej;
- sygnał trzeciego echa (Triple Transit Signal TTS), związany z regeneracją akustycznej fali powierzchniowej przez obciążony elektrycznie przetwornik. W wyniku tego właściwy sygnał opóźniony odbierany z drugiego przetwornika zawiera echa, z których największą amplitudę posiada echo trzecie. TTS jest łatwo rozróżnialny, ponieważ częstotliwość periodycznych zniekształceń charakterystyki częstotliwościowej jest związana z czasem opóźnienia  $t$  między przetwornikami międzypalczastymi poprzez zależność:  $f_{TTS} = 1/2 t$ ;
- sygnał pochodzący od odbicia fali powierzchniowej od elektrod wskutek istnienia nieciągłości impedancji na powierzchni piezoelektryka;
- sygnał związany z falami objętościowymi wzbudzonymi przez przetwornik międzypalczasty. Ze względu na większą prędkość fali objętościowej, w porównaniu z prędkością fali powierzchniowej, znaczne zniekształcenia charakterystyki częstotliwościowej występują dla zakresu częstotliwości powyżej częstotliwości środkowej;
- filtr współpracuje zwykle z układami konwencjonalnej elektroniki. Zarówno skończona impedancja źródła, jak i obciążenia wpływają na charakterystyki filtru;
- dyfrakcja AFP związana jest ze skończoną długością elektrod w przetworniku;
- przetwornik międzypalczasty wzbudza, oprócz fali na częstotliwości podstawowej, również sygnały na częstotliwościach harmonicznych, co związane jest z układem jego elektrod i zależy także od współczynnika metalizacji elektrod.

Ze względu na możliwości aplikacyjne, najważniejsze jest ograniczenie dwóch zjawisk pasożytniczych: sygnałów fałszywych odbitych i fal objętościowych. Na

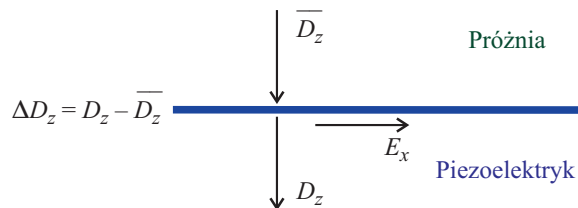
obecnym etapie rozwoju technologii i techniki projektowania filtrów zjawiska te stanowią główną barierę dla poprawy parametrów omawianych podzespołów.

Rozwiązanie zagadnienia wzbudzenia fali objętościowej jest skomplikowane, dlatego też stosuje się inne podejście, znacznie upraszczające obliczenia. Wymaga to jednak znajomości zespolonej efektywnej przenikalności powierzchniowej, która jest obliczana numerycznie dla konkretnego podłoża piezoelektrycznego, określonego cięcia i kierunku propagacji akustycznej fali powierzchniowej. Znajomość przebiegu efektywnej przenikalności powierzchniowej pozwala na wybór parametrów przetworników, tak aby ich pasma pracy były położone poza obszarami silnego wzbudzenia fal objętościowych.

### 3. Efektywna przenikalność powierzchniowa

Związek między składową pola elektrycznego równoległą i składową indukcji normalną do powierzchni piezoelektryka jednoznacznie charakteryzuje własności elektryczne piezoelektryka oraz znacznie upraszcza analizę teoretyczną przetwornika międzypalczastego. Takie podejście umożliwia bowiem zamianę złożonego zagadnienia z obszaru mechaniki ośrodka ciągłego na obszar teorii pola. Podstawą analizy w teorii widmowej jest efektywna przenikalność powierzchniowa, która charakteryzuje zjawiska na powierzchni piezoelektryka z uwzględnieniem własności akustycznych materiału podłoża piezoelektrycznego. Podłoża te są anizotropowe, co oznacza znaczną komplikację równań i konieczność stosowania obliczeń numerycznych.

Ingebrigsten i in. [1] zdefiniowali przenikalność efektywną, która odnosi gęstość ładunku powierzchniowego do potencjału elektrycznego na powierzchni piezoelektryka, co oznacza również związek indukcji z polem elektrycznym na powierzchni rozgraniczającej piezoelektryk i próżnię (rys. 1).



Rys. 1. Rozkład pola elektrycznego i indukcji elektrycznej na granicy piezoelektryk-próżnia

Efektywna przenikalność powierzchniowa Ingebrigstena dla fali powierzchniowej o częstotliwości  $\omega$  uzależniona od wektora falowego  $r$  jest następująca:

$$\varepsilon_s(r) = \frac{\Delta D}{\varphi} = \varepsilon_\infty \frac{r - k_v}{r - k_o}, \quad (1)$$

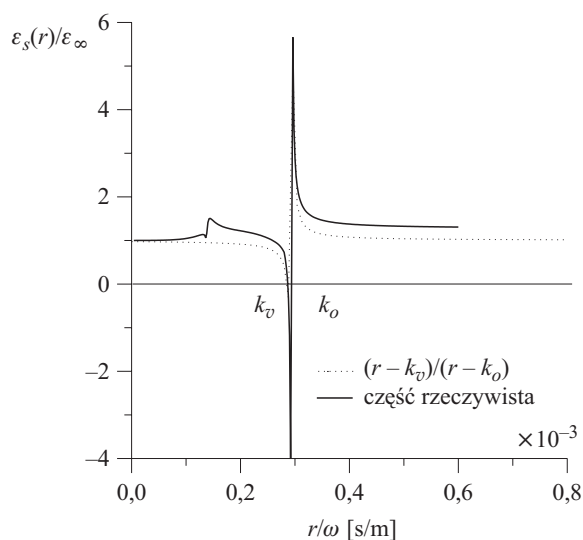
gdzie:  $\varphi$  — potencjał elektryczny na powierzchni podłoża piezoelektrycznego;  $\Delta D$  — powierzchniowy ładunek elektryczny;  $k_{v,o} = \omega/v_{v,o}$ ;  $v_{v,o}$  — prędkość AFP dla swobodnej ( $v$ ) i metalizowanej ( $o$ ) powierzchni piezoelektryka;  $\varepsilon_\infty = \varepsilon_o(1 + \varepsilon_e)$  — przenikalność dielektryczna charakteryzująca granicę rozdziału między próżnią i piezoelektrykiem;  $\varepsilon_e = (\varepsilon_{11}\varepsilon_{33} - \varepsilon_{13}^2)^{1/2}$  — efektywna względna stała dielektryczna zależna od składowych tensora przenikalności dielektrycznej  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{33}$ ,  $\varepsilon_{13}$ , przy czym kierunek 1 pokrywa się z kierunkiem wektora falowego  $r$ , a kierunek 3 jest normalny do powierzchni.

Efektywna przenikalność powierzchniowa liczona jest jako funkcja niezna-nej prędkości i zależy od własności materiału oraz orientacji kryształu. W ten sposób otrzymuje się liczby falowe związane z prędkościami dla powierzchni swobodnej i elektrycznie zwartej odpowiednio  $k_v$  oraz  $k_o$ , co generalnie odróżnia piezoelektryk od dielektryka.

Przenikalność efektywna zależy wyłącznie od parametrów objętościowych materiału oraz orientacji kryształu. Może być ona określona jako funkcja zmiennej unormowanej ( $r/\omega$ ), która odpowiada odwrotności prędkości AFP. Efektywna przenikalność powierzchniowa wyznaczana jest numerycznie poprzez rozwiązanie odpowiedniego zagadnienia brzegowego dla półprzestrzeni piezoelektrycznej [3, 6].

Rzeczywista część tej przenikalności jest zbliżona do modelu Ingebrigstena, co przedstawiono na rysunku 2. Najlepsza zgodność aproksymacji Ingebrigstena z wynikami obliczeń numerycznych występuje w pobliżu liczb falowych  $k_v$  oraz  $k_o$ .

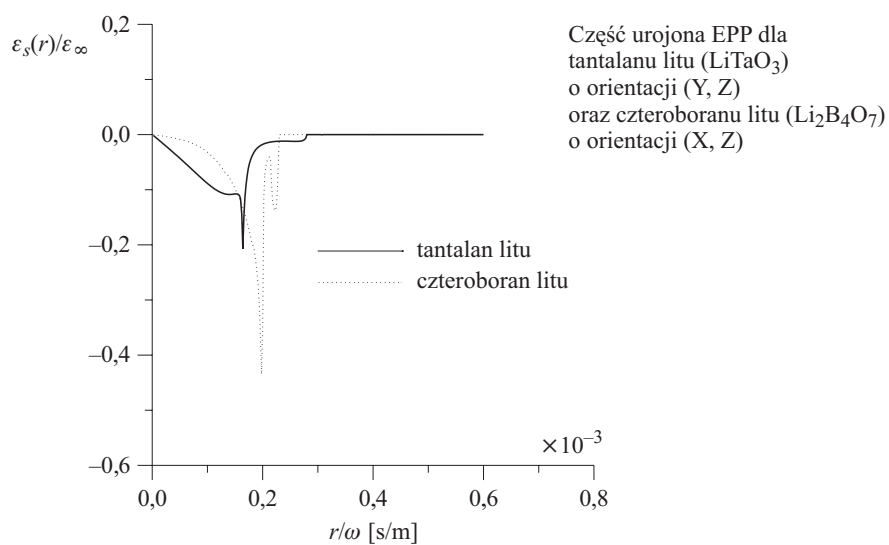
Dodatkowo pojawia się część urojona, która związana jest ze wzbudzeniem akustycznych fal objętościowych przez przetwornik międzypalczasty. Wartość



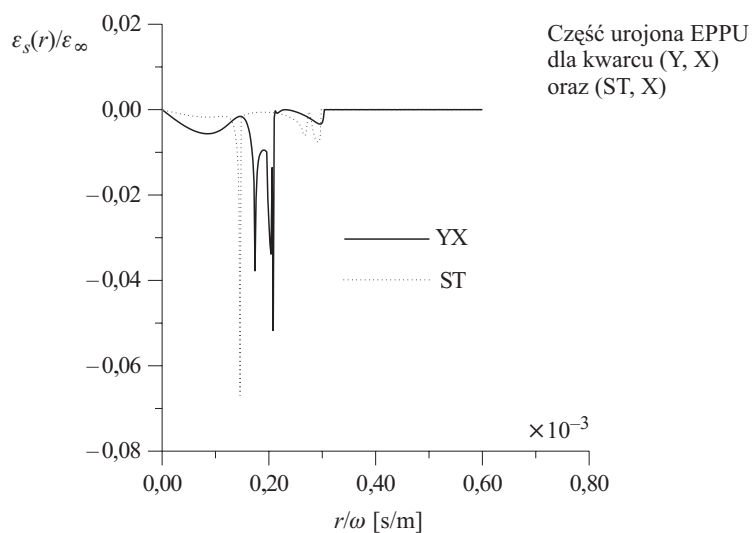
Rys. 2. Część rzeczywista efektywnej przenikalności powierzchniowej

tej przenikalności jest różna od zera w ograniczonym zakresie liczby falowej, poniżej liczby falowej odcięcia fal objętościowych.

Na wykresach (rys. 3 i 4) przedstawiono wyniki obliczeń dla tantalanu i czteroboranu litu oraz kwarcu [8-10, 17]. Można pokazać (rys. 4), że nawet dla tego samego piezoelektryka, ale o innej orientacji, część urojona EPP jest znacząco różna.



Rys. 3. Części urojone efektywnej przenikalności powierzchniowej dla tantalanu litu oraz czteroboranu litu



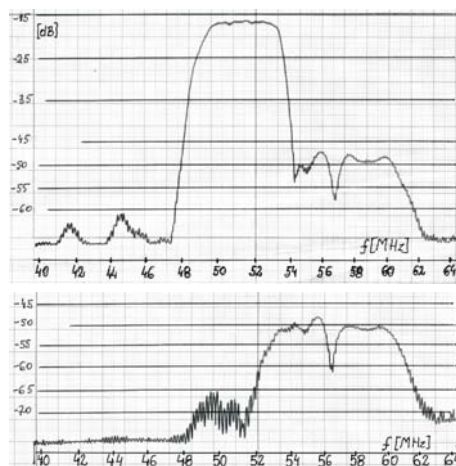
Rys. 4. Części urojone efektywnej przenikalności powierzchniowej dla kwarcu

Aproksymacja tej przenikalności podana przez Ingebrigstena uwzględnia tylko podstawowe efekty związane z propagacją fali powierzchniowej poprzez biegun  $k_o$  i zero  $k_v$ , stąd konieczność analizy pełnej, zespolonej efektywnej przenikalności powierzchniowej.

Ponadto jest ona zwykle skomplikowaną funkcją liczby falowej i musi być liczona numerycznie dla każdego ze znanych lub badanych materiałów piezoelektrycznych.

Efektywna przenikalność powierzchniowa stanowi podstawę dalszej analizy propagacji fali pod układem elektrod umieszczonych na piezoelektryku.

Eksperymentalnym potwierdzeniem występowania fal objętościowych, oprócz użytecznych fal powierzchniowych, jest charakterystyka amplitudowa filtra pasmowego, przedstawiona na rysunku 5 oraz charakterystyka tego samego filtra z wytłumioną falą powierzchniową, poprzez naniesienie między dwa współpracujące przetworniki międzypalczaste materiału absorbującego falę powierzchniową [17].



Rys. 5. Charakterystyka amplitudowa filtra pasmowego na podłożu niobianu litu (Y, Z)

Zniekształcenia charakterystyki amplitudowej filtra wykonanego na podłożu niobianu litu o orientacji (Y, Z) pokrywają się z zakresem występowania fal objętościowych.

Przy odpowiednim doborze częstotliwości struktury przetwornika, możliwe jest ograniczenie wpływu fal objętościowych wzbudzanych przez przetwornik międzypalczasty na charakterystykę częstotliwościową syntetyzowanego filtra.

Część urojona przenikalności powierzchniowej dostarcza więc istotnej informacji o możliwych obszarach występowania fal objętościowych wzbudzanych przez przetworniki międzypalczaste.

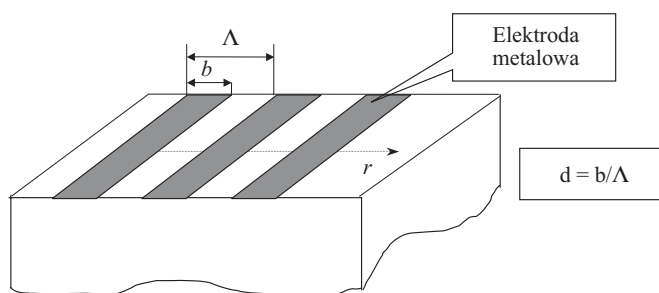
### 3. Analiza propagacji fali powierzchniowej

Podzespoły z akustyczną falą powierzchniową, charakteryzujące się długą odpowiedzią impulsową (np. dyspersyjne linie opóźniające) zawierają znaczną ilość elektrod usytuowanych na powierzchni piezoelektryka. Stąd realizacja takiej linii dyspersyjnej wymaga dogłębnej analizy wzbudzenia i detekcji oraz propagacji akustycznej fali powierzchniowej pod elektrodami tworzącymi przetwornik międzypalczasty.

Teoria widmowa, oparta na fundamentalnych relacjach teorii pola elektromagnetycznego, pozwala otrzymać zamknięte wyrażenia analityczne dla prądów płynących w elektrodach podłączonych do szyn zbiorczych przetwornika. Została ona zaproponowana po raz pierwszy przez Blotekjaera i in. [4, 5], umożliwia rozwiązanie zagadnienia własnego. Dokonano w ten sposób analizy charakterystyk dyspersyjnych fal powierzchniowej propagującej się pod okresowymi elektrodami metalowymi naniesionymi na powierzchni piezoelektryka, ale bez uwzględnienia wyższych harmonicznych.

Zasadne jest więc badanie zjawisk związanych ze wzbudzeniem i detekcją fali powierzchniowej przez przetworniki międzypalczaste okresowe, pracujące w różnych pasmach częstotliwości, w piezoelektrykach posiadających określony współczynnik sprzężenia elektromechanicznego oraz stałą dielektryczną w oparciu o teorię widmową.

Rozpatrzmy układ elektrod metalowych położonych na podłożu piezoelektrycznym o szerokości  $b$  i okresie równym  $\Lambda$  (rys. 6).



Rys. 6. Okresowy układ elektrod

W teorii widmowej wprowadza się dwa typy warunków elektrycznych, to jest ze zwartą i rozwartą strukturą elektrod, co z odpowiednich równań dyspersyjnych pozwala na obliczenie prędkości fali powierzchniowej, w tym przypadku zależnych od współczynnika metalizacji elektrod  $d$ .

Rozwiązania ogólne otrzymuje się z dala od synchronizmu liczby falowej akustycznej fali powierzchniowej z liczbą falową struktury elektrod przetwornika.



Zarówno dla pasma pracy podstawowego, jak i dla wyższych harmoniczych układ odpowiednich równań jest następujący [7, 17]:

$$\sum_m \alpha_m P_{m-1+r/K}(\cos \Delta) = 0 \quad (2)$$

dla elektrod otwartych i

$$\sum_m \alpha_m (-1)^m P_{m-1+r/K}(-\cos \Delta) = 0 \quad (3)$$

dla elektrod zwartych,

gdzie:  $K = 2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  — period struktury, natomiast  $\alpha_m$  jest określone z następującego układu równań:

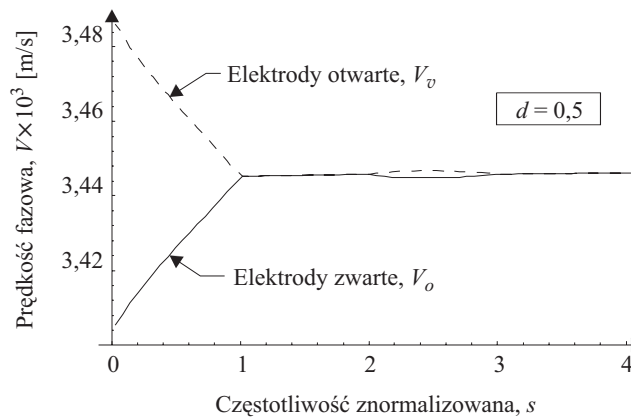
$$\sum_m \alpha_m [1 - S_{n-m} S_{r+nK} \frac{r+nK-k_v}{r+nK-k_o}] P_{n-m}(\cos \Delta) = 0 \quad (4)$$

przy  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N$ ,

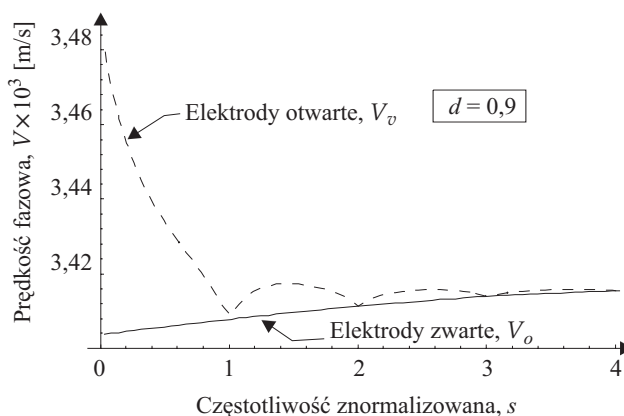
gdzie:  $r \in (0, K)$  i  $P$  — funkcje Legendera;  $\Delta = Kb/2$ ;  $b$  — szerokość elektrody;  $S_n = 1$  dla  $n \geq 0$  oraz  $-1$  dla pozostałych, natomiast  $N$  jest wybrane większe niż  $N_K = \text{Entier}(k/K)$ ,  $k = (k_o + k_v)/2$ .

#### 4. Wyniki obliczeń numerycznych

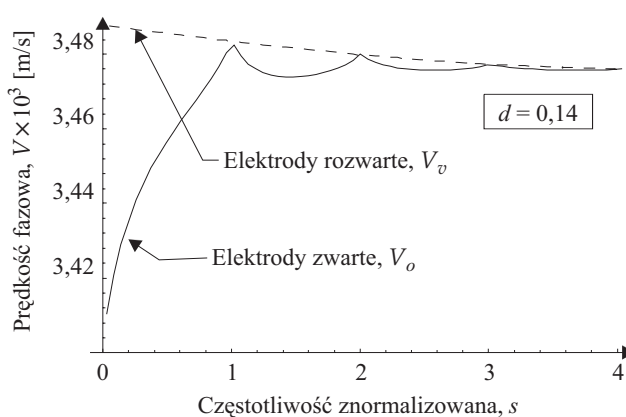
Na rysunkach 7, 8 i 9 przedstawiono zależność prędkości fazowej fali powierzchniowej, propagującej się pod strukturą elektrod periodycznych o różnym współczynniku metalizacji, w funkcji częstotliwości znormalizowanej, zdefiniowanej jako  $s = 2\nu/K/(k_v + k_o)$ , co pozwala łatwo zobrazować zachowanie się fali



Rys. 7. Zależność prędkości fazowej fali powierzchniowej dla częstotliwości znormalizowanej dla współczynnika metalizacji  $d = 0,5$



Rys. 8. Zależność prędkości fazowej AFP od częstotliwości znormalizowanej dla elektrod elektrycznie otwartych i zwartych przy współczynniku metalizacji  $d = 0,9$



Rys. 9. Zależność prędkości fazowej AFP od częstotliwości znormalizowanej dla elektrod elektrycznie otwartych i zwartych przy współczynniku metalizacji  $d = 0,14$

powierzchniowej dla podstawowej oraz dla wyższych harmonicznych. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla niobianu litu o cięciu (YZ).

Zmiany prędkości fazowej fali powierzchniowej zawarte są między prędkościami fali powierzchniowej dla powierzchni piezoelektryka metalizowanej i swobodnej, które dla niobianu litu YZ wynoszą odpowiednio  $v_o = 3403,7$  m/s,  $v_v = 3487,8$  m/s.

W obliczeniach uwzględniono dwa skrajne przypadki współczynnika metalizacji elektrod, tzn.  $d = 0,9$  (elektrody szerokie) oraz  $d = 0,14$  (elektrody wąskie). Dla elektrod szerokich zmiany prędkości fali powierzchniowej występują w za-

kresie prędkości dla powierzchni metalizowanej, a dla elektrod wąskich — w zakresie prędkości fali dla powierzchni swobodnej piezoelektryka.

Zwykle do analizy i syntezy podzespołów z akustyczną falą powierzchniową przyjmuje się stałą prędkość propagacji fali powierzchniowej, co jest słuszne dla wąskich pasm przepustowych filtru oraz dla piezoelektryków o małym współczynniku sprzężenia elektromechanicznego. Natomiast dla pasm szerokich, nawet do 100% wartości częstotliwości środkowej, prędkość fali w pierwszej strefie Brillouina ulega znacznym zmianom. Przykładowo, dla pasma 100% przy współczynniku metalizacji elektrod  $d = 0,14$  (rys. 9) dla struktury zwartej zmiana prędkości wynosi około 1%.

Oczywiście, prędkość fali może zmieniać się między wartościami prędkości fali dla powierzchni swobodnej i metalizowanej piezoelektryka. Tak istotnych zmian prędkości nie obserwuje się dla wyższych stref Brillouina. Przy małym współczynniku metalizacji elektrod, prędkość fali jest bliska prędkości fali dla powierzchni swobodnej, a dla współczynnika metalizacji około jedności prędkość ta odpowiada prędkości fali dla powierzchni metalizowanej piezoelektryka.

Charakterystyczny przypadek, z którym zwykle mamy do czynienia w podzespołach z akustyczną falą powierzchniową, jest przedstawiony na rysunku 7. Można przyjąć, że prędkość fali dla wyższych stref Brillouina jest średnią z wartości prędkości dla powierzchni swobodnej oraz metalizowanej i jest praktycznie stała. Dodatkowo, dla piezoelektryków o małym współczynniku sprzężenia elektromechanicznego (np. kwarc) różnica między rozpatrywanymi prędkościami jest niewielka. Widać, że dla małego współczynnika metalizacji przy otwartych elektrodach prędkość fali jest bliska prędkości fali dla powierzchni swobodnej w rozważanym zakresie stref Brillouina, czego nie obserwujemy dla elektrod zwartych, gdzie różnice prędkości są znaczne w pierwszej strefie.

## 5. Wybrane przykłady analizy i syntezy filtrów z uwzględnieniem wyników teorii widmowej

Współpracę dwóch przetworników międzypalczastych, tworzących podzespół z akustyczną falą powierzchniową, można rozważyć w oparciu o model  $\delta$ -funkcji. Otrzymuje się w ten sposób charakterystykę częstotliwościową podzespołu bez uwzględnienia własności elektrycznych przetworników oraz wpływu struktury międzypalczastej na falę powierzchniową propagującą się pod strukturą elektrod. Dlatego skorzystamy z przedstawionych wyżej wyników teorii widmowej.

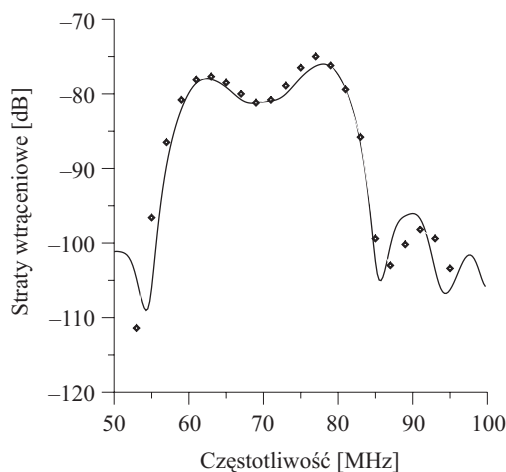
W filtrach pasmowych jako przetworniki wzbudzające o znanym widmie stosuje się przetworniki o stałej długości elektrod (tzw. przetworniki proste).

Nowym sposobem modyfikacji charakterystyki amplitudowej filtru jest wykorzystanie przetworników sekcyjnych, których sekcje zasilane są różnymi na-

pięciami [13-16]. Widmo struktury tych przetworników różni się od widma typu  $\text{SinX/X}$  odpowiadającego strukturze przetwornika prostego.

Wykorzystanie przetworników sekcyjnych umożliwia „ważenie” ich widma amplitudowego przy zachowaniu stałej apertury tego przetwornika. Można więc wstępnie dobrać widmo tego przetwornika do wymaganej charakterystyki filtru. W ten sposób ograniczymy dyfrakcję fali powierzchniowej, ponieważ drugi przetwornik syntetyzowany będzie zawierał mało krótkich elektrod względem jego apertury. Z tego powodu przetworniki te stosowane są również do syntezy filtru o ściśle określonej charakterystyce częstotliwościowej.

Charakterystyka częstotliwościowa układu przetworników sekcyjnych może więc być kształtowana i w rozważanym przypadku ma postać jak na rysunku 10 (struktura przetwornika sekcyjnego, w którym sekcja środkowa zawiera 7 elektrod, a sekcje boczne zawierają po 2 elektrody). Częstotliwość struktury elektrod pokrywa się z częstotliwością środkową charakterystyki częstotliwościowej filtru i wynosi 70 MHz. Dane z eksperymentu, przedstawione w postaci punktów, w paśmie przepustowym niewiele odbiegają od wyników teoretycznych.



Rys. 10. Charakterystyka częstotliwościowa dwóch współpracujących przetworników sekcyjnych w układzie 2-7-2 elektrod każdy (linia ciągła — model teoretyczny, punkty — dane otrzymane z eksperymentu)

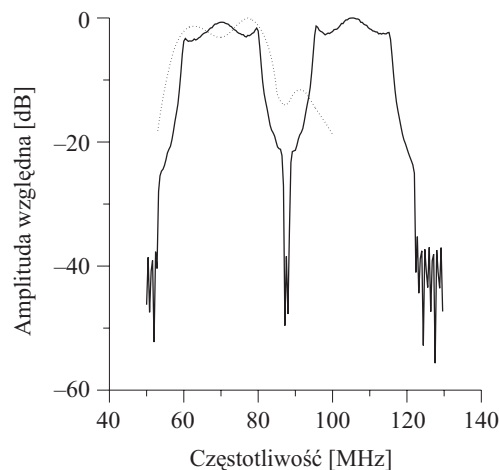
Maksymalne straty wtrąceniaowe 75 dB wynikają z niedopasowania przetworników do układów zewnętrznych o rezystancji  $50 \Omega$ . Widoczny jest również wpływ czynnika częstotliwościowego występującego w zależności na skuteczność wzbudzenia fali powierzchniowej.

Sposób wzbudzenia sygnału złożonego z zastosowaniem przetwornika dyspersyjnego periodycznego podany został po raz pierwszy przez E. Danickiego [3]. Zastosowany został do realizacji praktycznej linii dyspersyjnych z akustyczną

falą powierzchniową [12-14], które stosowane są obecnie w systemach radarowych produkowanych w kraju.

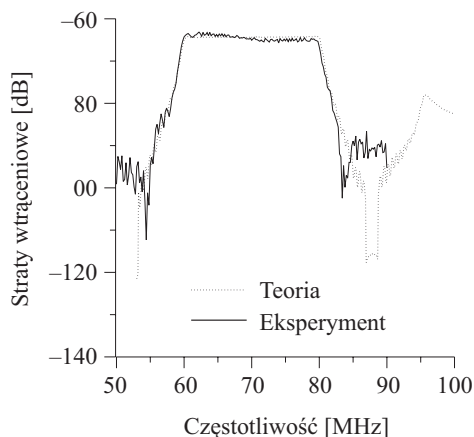
Syntezie podlega filtr dyspersyjny o częstotliwości środkowej  $f_o = 70$  MHz, o czasie trwania odpowiedzi impulsowej  $T = 10$   $\mu$ s, którego charakterystyka amplitudowa jest płaska w paśmie  $B = 20$  MHz. Jako przetwornik wzbudzający wykorzystano omówiony poprzednio przetwornik sekcyjny, pokrywający pasmo pracy filtra dyspersyjnego. Charakterystyka fazowa filtra będzie nieliniowa. Wynika to z własności sygnału złożonego z liniową modulacją częstotliwości.

Periodyczny przetwornik dyspersyjny posiada dwa pasma pracy położone symetrycznie wokół częstotliwości struktury elektrod wynoszącej  $f_{oo} = 87,75$  MHz, co przedstawiono na rysunku 11. Stąd też period struktury elektrod jest równy  $\Lambda = 18$   $\mu$ m. Pasmo dodatkowe nie jest wykorzystywane i tłumione przez przetwornik wzbudzający, którego widmo jest położone wokół częstotliwości środkowej filtra.



Rys. 11. Pasma pracy periodycznego przetwornika dyspersyjnego (linia ciągła) oraz widmo struktury sekcyjnego przetwornika wzbudzającego (linia przerywana)

Filtr dyspersyjny wykonano na podłożu kwarcu o orientacji (Y, X). Przetwornik wzbudzający zawierał 11 elektrod o szerokości 11  $\mu$ m, natomiast dyspersyjny — 1921 elektrod o szerokości 9  $\mu$ m, co wynika z przyjętej częstotliwości struktury elektrod. Przyjęty współczynnik metalizacji wynosił  $d = 0,5$ , a apertura przetworników międzypalczastych  $w = 4$  mm. Straty wtrąceniowe 65 dB filtra dyspersyjnego (rys. 12) są wysokie ze względu na szerokie pasmo filtra oraz niski współczynnik sprzężenia elektromechanicznego podłoża kwarcowego.



Rys. 12. Charakterystyka amplitudowa filtra dyspersyjnego (eksperyment — linia ciągła, teoria — linia przerywana)

## 6. Czujniki wielkości fizycznych bazujące na generatorach z akustyczną falą powierzchniową

Współczesna technika wymaga stosowania pomiarów różnych wielkości fizycznych takich jak np. siła mechaniczna, temperatura, ciśnienie lub stężenie gazu.

W pomiarach tych wykorzystuje się różne zjawiska fizyczne, pozwalające na zmianę wielkości nieelektrycznych na elektryczne. Urządzenia dokonujące tego przetworzenia nazywają się czujnikami.

Do pomiaru siły wykorzystywane są następujące rodzaje czujników:

- czujniki wykorzystujące efekt piezoelektryczny,
- mikromechaniczne czujniki krzemowe,
- czujniki wykorzystujące tensometry,
- czujniki z akustyczną falą powierzchniową.

Zasada działania czujników wykorzystujących efekt piezoelektryczny polega na pomiarze wielkości ładunku powstającego na powierzchni piezoelektryka poddanego działaniu siły.

Główną wadą tych czujników jest brak możliwości pomiaru parametrów drgań wolnozmiennych oraz wysoka wrażliwość na wpływ czynników środowiskowych, np. wilgotności.

Zasada działania mikromechanicznych czujników krzemowych oraz czujników wykorzystujących tensometry jest podobna. Polega ona na pomiarze zmian pojemności kondensatora lub rezystancji tensometru zamontowanego na powierzchni krzemowej belki.

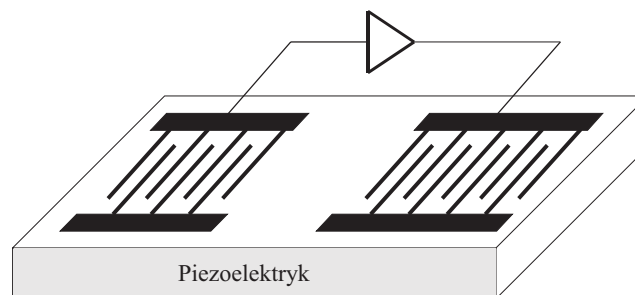
Zmiana mierzonej wielkości wywołana jest przez zmianę naprężeń lub odkształceń spowodowanych działaniem siły.

Czujniki z akustyczną falą powierzchniową należą do mniej znanych i ostatnio znacznie rozwijanych.

Akustyczne fale powierzchniowe wzbudzone w kryształach piezoelektrycznym za pomocą przetwornika międzypalczastego rozchodzą się wzdłuż swobodnej powierzchni kryształu i zanikają w kierunku do niej prostopadłym.

W odróżnieniu od fal objętościowych, są one dostępne w każdym miejscu tej powierzchni, co stwarza nowe możliwości ich praktycznego wykorzystania.

Konstrukcja dwóch współpracujących przetworników międzypalczastych tworzy linię opóźniającą (rys. 13) na akustycznej fali powierzchniowej.



Rys. 13. Generator z akustyczną falą powierzchniową

Opóźnienie sygnału elektrycznego w takiej linii to czas upływający od zamiany sygnału na falę powierzchniową przez jeden przetwornik do powtórnej zamiany fali na sygnał elektryczny przez drugi przetwornik międzypalczasty.

Opóźnienie to zależy od prędkości fali powierzchniowej i odległości pomiędzy przetwornikami, a spełnienie warunku fazy (5) pozwala na wyznaczenie częstotliwości drgań generatora.

$$\Phi_w + 2\pi f_g L/v = 2n\pi, \quad (5)$$

gdzie:  $\Phi_w$  — przesunięcie fazy sygnału elektrycznego we wzmacniaczu;  $L$  — odległość między środkami przetworników międzypalczastych;  $v$  — prędkość akustycznej fali powierzchniowej;  $n$  — liczba naturalna.

Zmiana opóźnienia w linii opóźniającej jest zależna od zmiany prędkości fali powierzchniowej oraz zmiany odległości między przetwornikami.

Prędkość fali powierzchniowej może być różna w zależności od temperatury oraz stanu powierzchni podłoża piezoelektrycznego określonego przez naprężenia lub warunki elektryczne na powierzchni. Zmianę odległości między przetwornikami wywołują: temperatura oraz odkształcenie powierzchni.

Względne zmiany opóźnienia fali w linii opóźniającej są rzędu od  $10^{-4}$  do  $10^{-7}$ .

Jeśli przyjmiemy przykładowo opóźnienie linii opóźniającej  $\tau = 10 \mu\text{s}$ , to otrzymamy bezwzględne zmiany opóźnienia w granicach (1 ns-1ps), które są niewielkie i których bezpośredni pomiar nie jest stosowany.

Z tego względu pomiary zmian opóźnienia fali powierzchniowej wykonuje się różnymi metodami pośrednimi, bazującymi na pomiarze zmiany fazy bądź zmiany częstotliwości generatora z akustyczną falą powierzchniową (rys. 13).

Generator ze sprzężeniem zwrotnym jest połączeniem dwóch czwórników: wzmacniacza oraz obwodu sprzężenia zwrotnego.

Umieszczając linię opóźniającą w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza, otrzymamy generator z akustyczną falą powierzchniową, jeśli tylko wzmacniacz skompensuje straty wnoszone przez linię oraz jeśli jest spełniony warunek zgodności fazy w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza. Częstotliwość takiego generatora zależy od opóźnienia wnoszonego przez linię. Zmiana opóźnienia linii prowadzi do zmiany częstotliwości generatora.

Zakładamy stałe przesunięcie fazy we wzmacniaczu w zakresie pasma pracy linii opóźniającej. O częstotliwości pracy generatora decyduje zatem wielkość przesunięcia fazy sygnału przez linię opóźniającą, zależnej od odległości między przetwornikami i prędkości akustycznej fali powierzchniowej. Zmiana tych wielkości wywołuje zmianę częstotliwości generatora  $\Delta fg = fg\Delta\tau/\tau$ .

Zarówno wzmacniacz, jak i linia opóźniająca posiadają swoje charakterystyki częstotliwościowe, przy czym wzmacniacz posiada płaską charakterystykę w paśmie pracy linii.

Charakterystyka częstotliwościowa dwóch prostych przetworników międzypalczastych jest typu  $(\sin x/x)^2$ . Jej kształt zależy od liczby elektrod przetwornika. Przy większej liczbie elektrod charakterystyka jest wąska, a przy małej — obejmuje szersze pasmo pracy.

Natomiast przy większych opóźnieniach w linii nachylenie charakterystyki fazowej wzrasta.

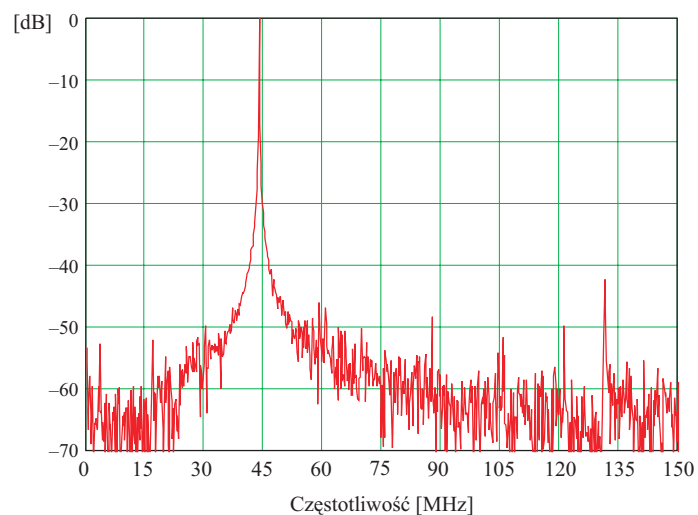
Można tak dobrać te charakterystyki, aby warunek zgodności fazy był spełniony tylko dla jednej wartości  $n$  określonej z równania na  $fg$ . Wówczas generator generuje stabilnie tylko jedną częstotliwość.

Widmo sygnału generowanego przez ten generator wykonany praktycznie przedstawia rysunek 14. Warunek generacji jest w tym przypadku spełniony dla częstotliwości 43,955 MHz. Czystość widmowa jest na poziomie niższym niż 40 dB. Najwyższe zakłócenia wnosi trzecia harmoniczna sygnału generowanego.

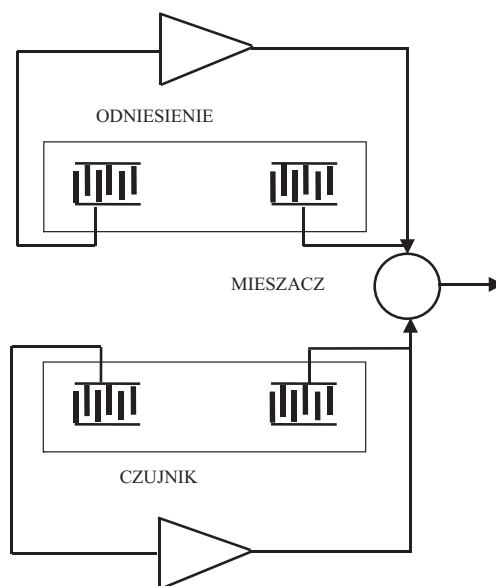
Typowy układ pomiarowy czujnika, przedstawiony na rysunku 15, zawiera dwa generatory, z których jeden (czujnik) jest poddany działaniu określonej wielkości fizycznej. Drugi jest dodatkowym generatorem odniesienia, pracującym stabilnie na częstotliwości zbliżonej do częstotliwości pracy czujnika.

Uzyskanie częstotliwości różnicowej z obu tych generatorów pozwala na bezpośredni pomiar zmian częstotliwości czujnika. Zachowanie wysokiej dokład-





Rys. 14. Widmo generatora z akustyczną falą powierzchniową



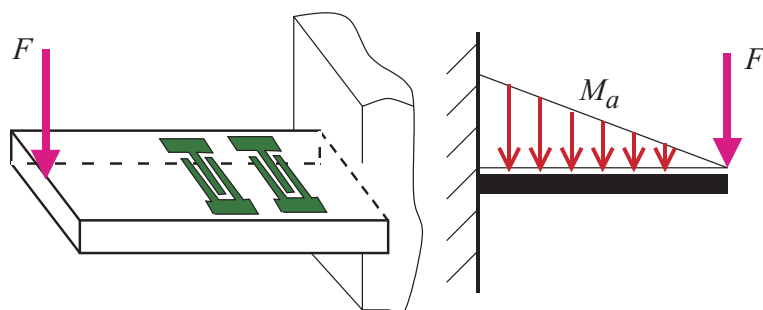
Rys. 15. Układ czujnika z dwoma generatorami

ności pomiaru wymaga, aby stabilności i czystości widmowe obydwu generatorów były podobne. Mierzona różnica częstotliwości obu generatorów jest sygnałem użytecznym.

Zastosowanie tego układu pozwala na obniżenie częstotliwości sygnału pomiarowego o trzy rzędy wielkości. Wynika to ze zmiany częstotliwości generato-

ra stanowiącego czujnik pomiarowy o  $\Delta f$  rzędu kiloherców przy częstotliwości generowanego sygnału  $f_g$  rzędu megaherców.

Przykładową konstrukcję czujnika siły, w której wykorzystano belkę z kwarcu przedstawiono na rysunku 16. Jeden koniec belki został sztywno zamocowany w ścianie, a drugi pozostaje swobodny. Na powierzchni belki kwarcowej wykonano dwa przetworniki międzypalczaste tworzące linię opóźniającą z akustyczną falą powierzchniową. Do swobodnego końca belki przykładana jest mierzona siła.



Rys. 16. Konstrukcja czujnika siły na akustycznych falach powierzchniowych

Pod wpływem tej siły powstaje wzdłuż osi belki moment gnący, a w jej przekroju poprzecznym — naprężenia mechaniczne. Ilustruje to rysunek 16.

Największe naprężenia występują w miejscu sztywnego zamocowania belki. Nie mogą one przekroczyć wartości naprężeń niszczących.

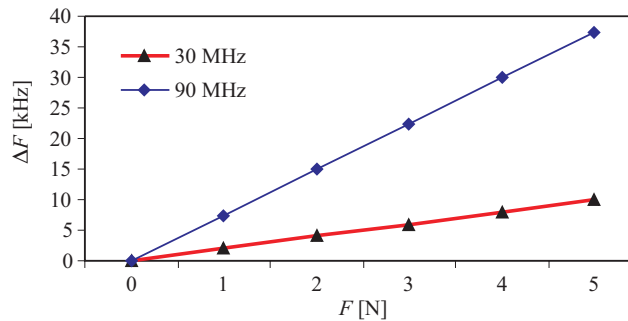
Wprowadzone naprężenia belki zmieniają opóźnienie sygnału elektrycznego w linii opóźniającej, powodując tym samym zmianę częstotliwości generatora.

Zmiany te będą tym większe, im bliżej zamocowania belki umieścimy przetworniki międzypalczaste.

Pomiaru dokonamy, stosując dwa generatory bazujące na linii opóźniającej z akustyczną falą powierzchniową o zbliżonej częstotliwości.

Wyniki pomiarów zmiany częstotliwości czujnika siły w zależności od wartości siły przykładanej do swobodnego końca belki przedstawiono na rysunku 17.

Wykresy dotyczą dwóch różnych czujników, bazujących na generatorach o różnych częstotliwościach. Z wykresu wynika, że, dla tej samej geometrii belki, wykorzystanie generatora z falą powierzchniową o większej częstotliwości umożliwi podwyższenie czułości czujnika. Podobny efekt można uzyskać, wykorzystując generator o tej samej częstotliwości na cieńszej belce.



Rys. 17. Zmiana częstotliwości generatora w zależności od siły  $F$  (dane dla belki  $110 \times 15 \times 3$  mm i częstotliwości generatorów 30,140 MHz oraz 90,028 MHz)

## 7. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane zastosowania podzespołów z akustyczną falą powierzchniową istotne dla przetwarzania sygnałów. W teorii widmowej przetwornika międzypalczastego uwzględniono współczynnik metalizacji elektrod. Należy zwrócić uwagę na to, że teoria ta jest teorią ścisłą, w pełni wyjaśniającą zjawiska fizyczne związane z działaniem przetwornika międzypalczastego oraz propagacji fali powierzchniowej pod taką strukturą. Przedstawiono wpływ współczynnika metalizacji elektrod na prędkość fazową akustycznej fali powierzchniowej w szerokim zakresie wartości.

Generalnie, materiał piezoelektryczny podłoża stosowany w filtrach dyspersyjnych wpływa na ich charakterystyki częstotliwościowe. W stosowanym przypadku kwarcu straty wtrąceniowe są raczej wysokie, ale zniekształcenia charakterystyki wskutek odbicia fali od elektrod przetwornika dyspersyjnego i rezystancji elektrod są niewielkie. Stosowanie piezoelektryków o dużej wartości współczynnika sprzężenia elektromechanicznego [15] powoduje zmniejszenie strat wtrąceniowych filtru. Wzrasta jednak pojemność statyczna przetwornika dyspersyjnego, co powoduje zniekształcenia charakterystyki. Skuteczną metodą redukcji tych zniekształceń jest wykorzystanie warstwy dielektrycznej, położonej między przetwornikami międzypalczastymi i piezoelektrykiem. Istotną korzyścią w stosowaniu przetworników sekcyjnych jest poprawienie własności dyfrakcyjnych filtru.

Podwyższenie częstotliwości środkowej filtrów o liniowej i nieliniowej charakterystyce fazowej jest możliwe poprzez wykorzystanie wyższych harmonicznych wzbudzanych przez przetwornik międzypalczasty.

Zastosowanie w linii przetwornika dyspersyjnego o równoodległych elektrodach do syntezy linii dyspersyjnej szerokopasmowej stanowi gwarancję porównywalności wyników eksperymentalnych z wynikami analizy teoretycznej.

Potencjalne zastosowania omawianego w pracy czujnika siły z wykorzystaniem wysokostabilnych generatorów z akustyczną falą powierzchniową [18-19] są następujące:

- pomiary drgań mechanicznych (amplituda, częstość, rejestracja drgań w czasie bądź ich widma),
- pomiary wektora przyspieszenia lub jego wybranej składowej,
- w pomiarach sejsmicznych jako czujnik ciągłego monitorowania o częstotliwościach rezonansowych kilkunastu Hz,
- jako czujnik ostrzegawczy w systemach alarmowych (bardzo łatwa identyfikacja czujników przez wykorzystanie ich różnych częstości rezonansowych lub różnych częstotliwości pracy oraz możliwości bezprzewodowej pracy czujnika),
- do uruchamiania systemów zabezpieczających w samochodowych poduszkach powietrznych.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.10.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2006 r.

#### LITERATURA

- [1] K. INGEBRIGSTEN, *Surface waves in piezoelectrics*, J. Appl. Phys., 40, 1969, 2681-2686.
- [2] E. DANICKI, *Fale powierzchniowe. Propagacja, wzbudzenie, zastosowanie*, dod. do Biul. WAT nr 11, 1976.
- [3] E. DANICKI, *Unified theory of interdigital transducers and SAW reflectors*, J. of Tech. Phys., 21, 1980, 387-403.
- [4] K. BLOTEKJAER, K. INGEBRIGSTEN, H. SKEIE, *A method for analysing waves in structures consisting of metal strip on dispersive media*, IEEE Trans. ED-20, 1973, 1133-1138.
- [5] K. BLOTEKJAER, K. INGEBRIGSTEN, H. SKEIE, *Acoustic surface waves in piezoelectric materials with periodic metal strips on the surface*, IEEE Trans., ED-20, 1973, 1139-1146.
- [6] Y. ZHANG, J. DESBOIS, L. BOYER, *Characteristic parameters of surface acoustic waves in a periodic metal grating on a piezoelectric substrate*, IEEE Trans. Ultras. Ferro. and Freq. Contr., UFFC-40, 3, 1993, 183-192.
- [7] E. DANICKI, A. KAWALEC, *Metallization – ratio dependent higher operation of IDTs*, Proc. IEEE Ultras. Symp., 1996, 309-312.
- [8] A. KAWALEC, *The spectral theory of IDT included metallization ratio for fundamental and higher overtone*, Proc. Molecular and Quantum Acoust., 18, 1997, 9-18.
- [9] A. KAWALEC, *Simplifying SAW calculations*, Innovation in Mathematics, Computational Mechanics Publications, 1997, 299-306.
- [10] E. DANICKI, *Spectral theory for IDTs*, IEEE Ultras Symp., 1994, 213-222.
- [11] A. KAWALEC, *On the design of a SAW wide-band dispersive delay line with P-dispersive transducer by synthesis*, MICON'96, 1996, 250-254.
- [12] E. DANICKI, J. FILIPIAK, A. KAWALEC, *SAW dispersive delay line utilising apodised IDT with periodic electrodes*, Electron. Lett. 22, 19, 1986, 976-977.

- [13] J. FILIPIAK, A. KAWALEC, E. DANICKI, *Wide-band SAW dispersive filter with a flat amplitude response*, *Ultrasonics*, 28, 1990, 355-357.
- [14] A. KAWALEC, *Progress in P-dispersive filters for radar application*, *Biul. WAT* 48, 6, 1999, 125-131.
- [15] A. KAWALEC, *Low-loss SAW dispersive filters with low sidelobe level in compressed signal*, *Opto-Electronics Review*, No 2, 1994.
- [16] A. KAWALEC, *Synthesis and experimental results of SAW dispersive filters for spectrum analysers*, *J. of Techn. Phys* 37, 1996, 39-49.
- [17] A. KAWALEC, *Wybrane zagadnienia analizy i syntezy szerokopasmowych linii dyspersyjnych z akustyczną falą powierzchniową*, WAT, 2000.
- [18] E. DANICKI, J. FILIPIAK, A. KAWALEC, M. RYGLEWICZ, *Czujnik siły i przemieszczenia wykorzystujący akustyczne fale powierzchniowe*, *Elektronika* 10, 1993, 17-21.
- [19] L. M. REINDL, *Wireless Passive SAW Identification Marks and Sensors*, 2002 IEEE Int'l Frequency Control Symposium Tutorials June 1, 2002, New Orleans, LA, USA.
- [20] W. R. SMITH, H. M. GERARD, J. H. COLLINS, T. W. REEDER, H. J. SHAW, *Analysis of interdigital surface wave transducers by use an equivalent circuit model*, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, MTT-17, 1969, 856-864.
- [21] R. H. TRANCRELL, M. G. HOLLAND, *Acoustic surface Wave filters*, *Proc. IEEE*, 59, 1971, 393.
- [22] P. V. WRIGHT, *Analysis and Design of Low-Loss SAW Devices With Internal Reflections Using Coupling-of-Modes Theory*, *IEEE Ultras. Symp.*, 1989, 141-152.

ADAM KAWALEC

#### Application of surface acoustic waves devices for signal processing

**Abstract.** Applications of some devices, based on surface acoustic wave (SAW), for the signal processing are shown in this paper. Based on spectrum analysis, the coefficient of electrodes metallization was taken into account. The analysis of the effective surface permittivity which characterizes the piezoelectric material features is presented. Its imaginary part shows excitation of bulk acoustic waves by the interdigital transducer. The influence of a bulk acoustic waves on frequency characteristics for experimental realization of the SAW filter is presented. Taking into account the results of theoretical analysis, a synthesis of dispersion line was executed. The experimental characteristics of these lines on quartz substrate were presented in this paper. These lines are applied to the radar complex signal processing. The paper contains also the analysis of generators based on delay line with surface acoustic wave, which are used to measure some physical quantity such as: force and acceleration. Some technological problems and results of investigations of generator with a delay line (based on two co-operating interdigital transducer) were shown in this article. Some results of investigations and practically executed the sensor of force in SAW technology are presented here.

**Keywords:** surface acoustic waves, dispersive delay lines, SAW filters, SAW sensors

**Universal Decimal Classification:** 621.396.96