

Rezonator z akustyczną falą powierzchniową do zastosowań w czujnikach wielkości mechanicznych

Streszczenie. W pracy przedstawiono rezonator z akustyczną falą powierzchniową do zastosowań w czujnikach wielkości mechanicznych. Omówiono jego właściwości na podstawie wyników badań wykonanego modelu. Na bazie rezonatora wykonano ustroje pomiarowe czujnika przyspieszenia. Otrzymano prostsze konstrukcje w porównaniu do modeli z klasyczną linią opóźniającą. Wyznaczono podstawowe parametry czujnika. Potwierdzono możliwość wykorzystania czwórnikowego rezonatora w czujnikach wielkości mechanicznych.

Abstract. In the paper the applications of the surface acoustic wave resonator as the mechanical sensors were presented. Its properties were discussed on the basis of the results of the proposed model. Measurement systems of the acceleration sensor were made on the basis of the resonator. Simpler designs were obtained compared to models with a classic delay line. Basic sensor parameters were determined. It was confirmed that four-cross resonator could be used in mechanical size sensors. (**Surface acoustic wave resonator for mechanical sensors applications**).

Słowa kluczowe: rezonator, akustyczne fale powierzchniowe, czujnik wielkości mechanicznych.

Keywords: resonator, surface acoustic waves, mechanical sensor.

Wstęp

Problematyka zagadnień związanych z kinematyką ruchu ciał oraz dynamiką ruchu układów ciągłych wymaga znajomości wartości takich wielkości mechanicznych jak przemieszczenia, odkształcenia, przyspieszenia i drgania. Do ich pomiaru wykorzystuje się różnego rodzaju czujniki. Ustroje pomiarowe czujników przetwarzają zmianę wielkości mechanicznej na zmianę wielkości elektrycznej, która nadaje się do dalszego pomiaru. Do tego wykorzystuje się różne zjawiska fizyczne, które określają rodzaj czujników. Do pomiarów przyspieszenia i drgań można wykorzystywać: geofony, sejsmometry, akcelerometry (typu MEMS lub piezoelektryczne) oraz czujniki światłowodowe. Przemieszczenia i odkształcenia można mierzyć geofonami strunowymi lub czujnikami światłowodowymi. Do pomiarów wymienionych wielkości mechanicznych można również wykorzystywać czujniki z akustyczną falą powierzchniową (AFP) [1,2,3].

Czujniki wielkości mechanicznych z AFP

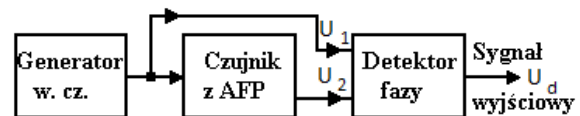
Działanie czujników z AFP polega na wykorzystaniu zjawiska zmiany prędkości AFP spowodowane zmianami naprężenia i odkształcenia ośrodka, po powierzchni którego rozprzestrzenia się fala. Dlatego organem pomiarowym czujnika z AFP jest płytka z materiału piezoelektrycznego z wykonaną na jej powierzchni linią opóźniającą z AFP. Linia opóźniająca (rys. 1) jest wykonana w postaci dwóch przetworników międzypalczastych. Jeden z nich zamienia sygnał elektryczny na falę powierzchniową, drugi zamienia ją na sygnał elektryczny.



Rys.1. Struktura linii opóźniającej z AFP

Opóźnienie linii z AFP to czas rozprzestrzeniania się fali pomiędzy przetwornikami. Zmiany wielkości mechanicznych powodują zmiany naprężenia i przemieszczeń w płytce, a to prowadzi do zmiany opóźnienia linii opóźniającej z AFP ($\Delta\tau_n$). Pomiar zmian opóźnienia pozwala na określenie zmian wielkości mechanicznej, która go spowodowała. Pomiar jest relatywnie trudny, ponieważ linie z AFP pracują przy częstotliwości od kilkudziesięciu do kilkuset MHz, a ich względne zmiany opóźnienia są rzędu jednej stutysięcznej. Wydaje się, że najprostszym technicznie rozwiązaniem tego

problemu jest wykorzystanie detektora fazy w układzie przedstawionym na rys. 2.



Rys.2. Schemat blokowy układu pomiarowego czujnika z AFP

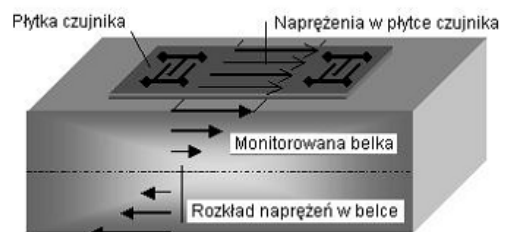
Zmiana fazy ϕ_h harmonicznego sygnału pomiarowego o częstotliwości Ω_0 przechodzącego przez linię jest:

$$(1) \quad \phi_0 = 2\pi \Omega_0 \Delta\tau_n$$

Na wyjściu detektora fazy uzyskujemy sygnał w postaci:

$$(2) \quad u_d(t) = k_d U_1 U_2 \cos \Psi_b$$

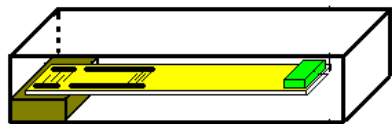
gdzie: k_d – stała detektora fazy, U_1, U_2 – amplitudy sygnałów na wejściu detektora, Ψ_b – przesunięcie fazy pomiędzy sygnałem pomiarowym i sygnałem odniesienia z generatora.



Rys.3. Przykładowa struktura czujnika naprężenia z AFP

Zmiany fazy sygnału pomiarowego są niewielkie (rzędu kilku stopni). Jeśli w układzie pomiarowym przesunięcie fazy pomiędzy sygnałem pomiarowym i odniesienia będzie 90 stopni oraz zapewnimy stałe wielkości sygnałów U_1 oraz U_2 to sygnał wyjściowy z detektora będzie proporcjonalny do wielkości przesunięcia fazy przez linię, a więc do mierzonej wielkości mechanicznej. Dlatego, linia opóźniająca z AFP jest ustrojem pomiarowym czujnika wielkości mechanicznych z AFP. Parametry linii będą decydowały o parametrach czujników wielkości mechanicznych, a przykładowa struktura czujnika naprężenia z AFP jest przedstawiona na rysunku 3.

Natomiast na rysunku 4 przedstawiono strukturę czujnika przyspieszenia z AFP.



Rys.4. Struktura czujnika przyspieszenia z AFP

Strukturę linii dla czujnika przyspieszenia przedstawiono na rysunku 5. Jest ona złożona z dwóch współpracujących przetworników międzypalczastych.



Rys. 5. Struktura linii z AFP w postaci dwóch przetworników międzypalczastych

Linie wykonano na kwarcu ST. Linia jest czwórnikowym filtrem szerokopasmowym. Straty wnoszone przez linie o tej konstrukcji wynosiły 60dB. Ze względu na duże straty w skład ustroju pomiarowego czujnika wchodziły układy dopasowujące przetworniki do wymaganej impedancji oraz wzmacniacze. Ich zastosowanie zawęża pasmo przepustowe linii i kompensuje straty. Konstrukcja ustroju pomiarowego czujnika bez tych podzespołów byłaby prostsza. Jest ona możliwa, jeśli straty wnoszone przez linie będą niskie (kilka dB). Takie parametry posiadają rezonatory czwórnikowe z AFP.

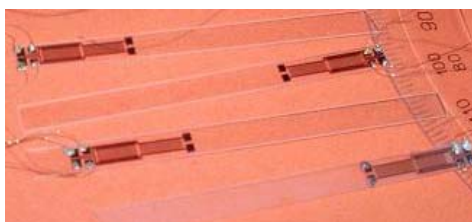


Rys. 6. Rezonator czwórnikowy z AFP

Do konstrukcji ustroju pomiarowego czujnika można wykorzystać rezonator (rys. 6) złożony z dwóch przetworników umieszczonych pomiędzy reflektorami.

Wyniki badań eksperymentalnych rezonatora z AFP

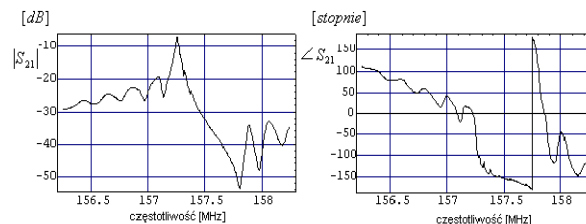
Rezonatory z AFP o częstotliwości środkowej 157,26MHz zostały przez autorów opracowane dla podłoża piezoelektrycznego z kwarcu ST. Ich struktury posiadały następujące parametry: period struktury $p=10\mu\text{m}$, ilość elektrod przetworników $N=80$, ilość elektrod reflektora $R=600$, apertura $L=2\text{mm}$. Szerokość elektrod struktury odbijającej wynosiła $5\mu\text{m}$. Wykonane rezonatory przedstawiono rysunku 7.



Rys. 7. Rezonatory czwórnikowe z AFP

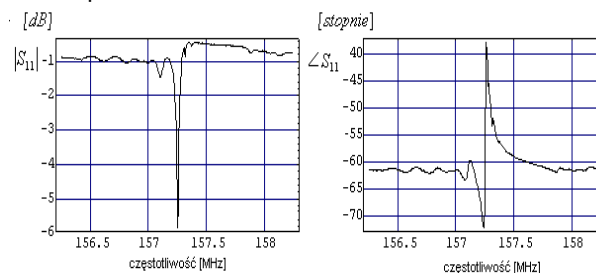
Sposób projektowania, otrzymane parametry teoretyczne i eksperymentalne były tematem publikacji autorów [4,5]. Częstotliwościową charakterystykę amplitudową i fazową (w postaci macierzy rozpraszania) wykonanych rezonatorów przedstawiono na rysunku 8.

Dla częstotliwości środkowej rezonator ma najmniejsze straty (6,7dB). Względna szerokość pasma wynosi 0,022%. A więc dobroć rezonatora jest rzędu 5000. Te parametry pozwalają zaliczyć wykonaną linię opóźniającą to filtrów o niskich stratach.



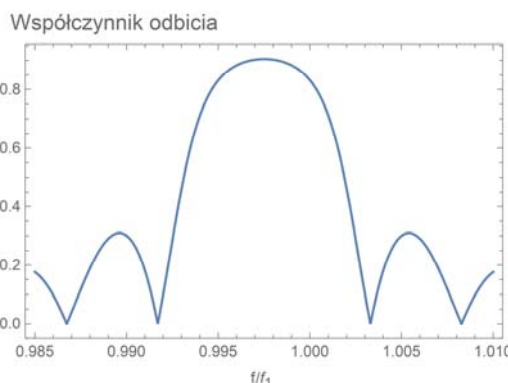
Rys. 8. Charakterystyka amplitudowa (a) oraz fazowa (b) rezonatora z AFP

Elektryczne dopasowanie filtra do impedancji 50Ω przedstawiono na rysunku 9. Dla częstotliwości środkowej jego amplituda wynosi -6dB , natomiast faza zmienia się o 180 stopni.



Rys. 9. Amplituda (a) oraz faza (b) współczynnika odbicia rezonatora z AFP

Rezonator posiada małe straty, ale w wąskim pasmie częstotliwości. Pozwala to uprościć konstrukcję organu pomiarowego czujnika. Te właściwości powinny być zachowane w przypadku zmian naprężenia w piezodielektrycznym podłożu podczas pracy czujnika. Dotyczy to przede wszystkim pracy reflektora. Odbicie fali przez reflektor jest związane ze zmianą impedancji falowej w obszarze elektrod i powierzchni swobodnej. Analizę i projekt rezonatora (a więc i reflektora) wykonano w oparciu o schemat zastępczy przetwornika. W tym modelu zmiana impedancji jest spowodowana zwarcie pola elektrycznego. Model pomija masę elektrod, a więc i jej wpływ na wielkość odbicia fali powierzchniowej. Reflektor można zastąpić selektywnym lustrem położonym w odległości efektywnego odbicia od krawędzi struktury reflektora. Selektowność lustra charakteryzuje prawie całkowite odbicie AFP w wąskim paśmie położonym wokół częstotliwości środkowej linii. Zmianę współczynnika odbicia w funkcji częstotliwości przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Zależność współczynnika odbicia reflektora od częstotliwości

Można przyjąć, że pasmo pracy reflektora określa różnica częstotliwości f_1 oraz f_3 . Są one związane zależnością:

$$(3) \quad f_3 = f_1 \left(1 - \frac{k^2}{2} \right)$$

gdzie: k^2 - współczynnik sprzężenia piezoelektrycznego.

Dla kwarcu ST $k^2=0.16\%$. Zatem dla częstotliwości środkowej rezonatora 157,26MHz wartość różnicy tych częstotliwości wynosi 126kHz. Oznacza to, że rezonator może pracować w relatywnie małym paśmie częstotliwości. A przecież mogą wystąpić zmiany parametrów współczynnika odbicia reflektora pod wpływem naprężenia w podłożu i jego odkształcenia. Może to prowadzić do zmian parametrów linii. Warunkiem właściwej pracy układu pomiarowego czujnika przedstawionego na rysunku 2 jest stała amplituda sygnału pomiarowego przechodzącego przez linię U2. Dla weryfikacji obliczeń teoretycznych wykonano pomiary współczynnika odbicia reflektora wykorzystanego w rezonatorach. Do tego celu wykonano linię złożoną z dwóch przetworników i umieszczonym pomiędzy nimi reflektorem. Strukturę takiej linii przedstawiono na rysunku 11.

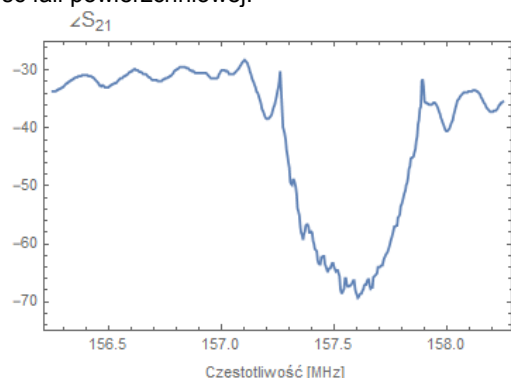


Rys. 11. Linia do pomiaru współczynnika odbicia reflektora

Jej częstotliwościowa charakterystyka amplitudowa pozwala na wyznaczenie współczynnika odbicia reflektora. Na rysunku 12. przedstawiono jej fragment. Część położona pomiędzy częstotliwościami f_1 oraz f_3 odpowiada obszarowi współczynnika odbicia w tym zakresie. Jej kształt to zwierciadlane odbicie współczynnika z rysunku 10 względem osi częstotliwości. Jednak różnica tych częstotliwości wynosi 620kHz. Jest ona pięciokrotnie większa niż wielkość teoretyczna. Jest to związane z pominięciem masy elektrod w analizie i projekcie rezonatora. Masa elektrod zmienia wielkość impedancji akustycznej, a tym samym wielkość współczynnika odbicia. Źródła literaturowe opisują ten efekt zależnością [6]:

$$(4) \quad f_3 = f_1 \left(1 - \frac{k^2}{2} - \frac{2\rho_{Al}h}{3\rho_{ST}\lambda} \right)$$

gdzie: ρ_{ST} - gęstość piezoelektrycznego podłoża, ρ_{AL} - gęstość aluminiowych elektrod, h - grubość elektrod, λ - długość fali powierzchniowej.



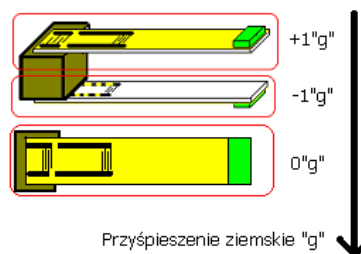
Rys. 12. Charakterystyka amplitudowa linii ilustrująca zmianę współczynnika odbicia reflektora od częstotliwości

Aby wyjaśnić tą różnicę wykonano obliczenia dla reflektora o parametrach: $h=0,1\mu\text{m}$, $\lambda=20\mu\text{m}$, $\rho_{ST}=2,65\text{g/cm}^3$, $\rho_{AL}=2,7\text{g/cm}^3$. Otrzymano wynik równy wartości eksperymentalnej. Oznacza to, że obciążenie masowe powierzchni ma większy wpływ na parametry odbicia reflektora niż jej elektryczne zwarcie. Dla dalszych badań wykonano urządzenie pomiarowe czujnika przyspieszenia z rezonatorem. Przedstawiono go na rysunku 13. Jeden koniec płytki z linią został sztywno zamocowany. Drugi swobodny obciążono masą sejsmiczną tak, aby częstotliwość własna czujnika wynosiła 13Hz. Zapewnia to wysoką czułość czujnika. W obszarze reflektorów wystąpią relatywnie duże, ale różne naprężenia i odkształcenia. Pozwala to na uzyskanie większej wrażliwości organu na ten efekt.



Rys. 13. Urządzenie pomiarowe czujnika z AFP z rezonatorem

Sposób badania ustroju w polu grawitacyjnym przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Pozycje ustroju względem pola grawitacyjnego

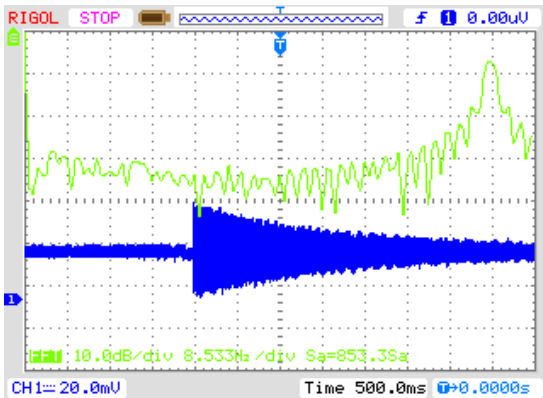
Wykonano pomiary amplitudowych charakterystyk częstotliwościowych w funkcji zmian stałego przyspieszenia w zakresie od $+1g$ do $-1g$. Na rysunku 15 przedstawiono charakterystykę częstotliwościową ustroju pomiarowego czujnika. Częstotliwość środkowa rezonatora 157,251MHz, jest nieco zmieniona ze względu na obciążenie masą sejsmiczną linii masą sejsmiczną. Straty dla częstotliwości środkowej wynosiły 7,66dB.



Rys. 15. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa ustroju pomiarowego czujnika z AFP

Zmiana amplitudy charakterystyki częstotliwościowej dla częstotliwości środkowej wynosiła mniej niż 0,2dB. Pozwala to na stwierdzenie, że amplituda sygnału przechodzącego przez rezonator jest praktycznie stała. Zmiana częstotliwości rezonansowej wynosiła 150kHz. Zatem w

badanym zakresie zmian przyspieszenia wykonany ustrój pomiarowy można wykorzystać do konstrukcji czujnika przyspieszenia z AFP. Dalsze badania ustrojów pomiarowych wykonano w układzie przedstawionym na rysunku 2. Na rysunku 17 przedstawiono odpowiedź impulsową czujnika (linia niebieska) oraz jej transformatę Fouriera, której kształt odpowiada amplitudowej charakterystyce częstotliwościowej płytki czujnika (linia zielona).



Rys. 16. Odpowiedź impulsowa czujnika o częstotliwości rezonansowej 13Hz i jej transformata Fouriera. Podstawa czasu 0,5s/dz

Amplituda odpowiedzi impulsowej maleje o połowę co 1s. Częstotliwość własna czujnika wynosi 13Hz. Czujnik pracował poprawnie w badanym zakresie zmian przyspieszenia stałego $\pm 1''g$.

Wnioski

W pracy przedstawiono rezonator z AFP do zastosowań w czujnikach wielkości mechanicznych. Wykonano badania jego parametrów. Parametry jego wejścia i wyjścia są identyczne. Na bazie rezonatorów wykonano ustroje pomiarowe czujnika przyspieszenia z AFP. Przedstawiono je na rysunku 17.



Rys. 17. Ustroje pomiarowy czujnika przyspieszenia z AFP

Wykonano ich badania. Wyniki potwierdziły możliwość wykorzystania rezonatora z AFP do czujników wielkości mechanicznych. W porównaniu do linii złożonej z dwóch przetworników rezonator z AFP ma mniejsze straty oraz większą czułość. Pozwala to na uproszczenie konstrukcji ustroju pomiarowego czujnika. Wzrost czułości czujnika zapewnia podwyższenie częstotliwości linii. W przypadku rezonatorów jest to technologicznie dużo prostsze niż dla linii innych konstrukcji. Łatwo jest też wykonać tego typu czujniki w technologii MEMS [7]. Potencjalna wąskopasmowość rezonatora nie wydaje się być przeszkodą jego wykorzystania. Parametry odbicia reflektora można zmieniać przez: zmianę grubości jego elektrod oraz zmianę materiału elektrod. Przykładowo dla elektrod wykonanych ze złota o gęstości $19,3g/cm^3$ można uzyskać jego pasmo rzędu 1MHz. Zmiany te mogą być ograniczone przez inne efekty fizyczne występujące podczas odbicia AFP (rezystancja elektrod, fale objętościowe). Jednak pozwalają one uzyskać szersze pasmo odbicia reflektora. Obniżenie selektywności reflektora zapewnia możliwość wykorzystania rezonatora do czujników wielkości mechanicznych z AFP.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jerzy Filipiak, Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach, Wydział Nauk Ścisłych, E-mail: filiapiak1947@gmail.com.

dr inż., Paweł Marć, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, E-mail: pawel.marc@wat.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Filipiak J., Solarz L., Steczko G., SAW Vibration Sensor, *Sensors*, 11 (2011), 11809-11832.
- [2] Wang W., Huang Y., Liu X., Liang Y., Surface acoustic wave acceleration sensor with high sensitivity incorporating ST-X quartz cantilever beam, *Smart Materials and Structures*, 24 (2015), 015015.
- [3] Durdaut, P.; Höft, M.; Friedt, J.-M.; Rubiola, E. Equivalence of Open-Loop and Closed-Loop Operation of SAW Resonators and Delay Lines. *Sensors*, 19 (2019), 185.
- [4] Panasik C. M., Hunsinger B. J., Scattering matrix analysis of surface wave reflectors and transducers. *IEEE Trans. SU-28* (1981), nr 2, 173-182.
- [5] Marć P., Filipiak J., Application of Equivalent-Network Model to Analysis and Synthesis of the Saw Resonator, *Mol. Quant. Acous.*, 22 (2001), 165-170.
- [6] Filipiak J., Marć P., Loss Low Narrow-Band Saw Filter, *Mol. Quant. Acous.*, 23 (2002), 139-149.
- [7] Shevchenko S., Kukaev A., Khivrich M., Lukyanov D., Surface-Acoustic-Wave Sensor Design for Acceleration Measurement, *Sensors* 18 (2018), 2301.