

Laboratorium Półprzewodniki, Dielektryki i Magnetyki

Ćwiczenie 4

Pomiary rezonatorów i filtrów piezoelektrycznych

dr inż. Tomasz Piasecki (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Anizotropia zjawiska piezoelektrycznego
2. Model zastępczy rezonatora piezoelektrycznego
3. Zależność admitancji i impedancji rezonatora piezoelektrycznego od częstotliwości
4. Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego - definicje energii
5. Metoda Okami wyznaczania współczynnika sprzężenia elektromechanicznego
6. Stała częstotliwości drgań N
7. Podstawowe parametry filtrów piezoelektrycznych i sposoby ich pomiaru

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Anizotropia zjawiska piezoelektrycznego	1
1.2	Rezonatory piezoelektryczne	3
1.3	Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego	3
1.4	Filtry piezoelektryczne	5
2	Program ćwiczenia	6
2.1	Przygotowanie stanowiska pomiarowego do badań metodami dynamicznymi	6
2.2	Wyznaczanie współczynnika sprzężenia elektromechanicznego metodą dynamiczną	7
2.3	Wyznaczenie parametrów filtrów piezoelektrycznych	7



Katedra
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

Tematyka tego ćwiczenia **wymaga znajomości informacji dotyczących zjawiska piezoelektrycznego, jego opisu oraz równań elektromechaniki**. Informacje te są przedstawione w instrukcji do ćwiczenia pt. „Pomiary i wyznaczanie parametrów ceramiki piezoelektrycznej” tego kursu. Innymi słowy, należy być zaznajomionym z definicjami i nazwami parametrów i zmiennych występujących w poniższych równaniach:

$$D = \epsilon^T \cdot E + d \cdot T \quad (1a)$$

$$S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad (1b)$$

$$S = s^D \cdot T + g_t \cdot D \quad (1c)$$

$$E = \beta^T \cdot D - g \cdot T \quad (1d)$$

$$T = c^E \cdot S + e_t \cdot E \quad (1e)$$

$$D = \epsilon^S \cdot E + e \cdot S \quad (1f)$$

$$T = c^D \cdot S - h_t \cdot D \quad (1g)$$

$$E = \beta^S \cdot D - h \cdot S \quad (1h)$$

W równaniach (1) występują:

- parametry mechaniczne materiałów takie jak moduł sprężystości c i jego odwrotność czyli podatność mechaniczna s , a indeks górny E lub D oznacza warunki brzegowe, w jakich zostały wyznaczone (przy stałym E lub D),
- parametry elektryczne, takie jak przenikalność elektryczna ϵ i jej odwrotność β , wyznaczone dla stałego T (nazywane wolnymi) lub S (nazywane obciążonymi),
- współczynniki piezoelektryczne d – moduł piezoelektryczny i jego odwrotność h , g – stała napięciowa i jej odwrotność e .

1.1 Anizotropia zjawiska piezoelektrycznego

Analizę zjawisk piezoelektrycznych komplikuje fakt, że zazwyczaj piezoelektryki są anizotropowe, to znaczy, że współczynniki mechaniczne, elektryczne i piezoelektryczne zależą od kierunków działania sił i naprężeń.

Dla ceramiki piezoelektrycznej tensory D i E mają po trzy współrzędne (1 – 3), odpowiadające kierunkom układu współrzędnych x , y , z , natomiast tensory S i T mają po sześć współrzędnych, związanych z naprężeniami i odkształceniami liniowymi w trzech osiach (1 – 3) oraz ścinającymi, również w trzech osiach (4 – 6). Dla materiałów anizotropowych równania elektromechaniki przyjmują postać macierzową.

Dla materiałów ceramicznych występują pewne symetrie powodując, że niektóre z elementów macierzy są równe 0 a inne powtarzają się. Dla typowej ceramiki piezoelektrycznej tensorowa

postać podstawowych równań elektromechaniki wygląda jak następująco:

$$S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad (2a)$$

$$D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E \quad (2b)$$

gdzie

$$s^E = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{11}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11}^E + s_{12}^E) \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \epsilon^T = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix}$$

gdzie d^T oznacza transpozycję macierzy współczynników d .

W takim równaniu współczynniki d_{ik} to moduły piezoelektryczne opisujące związek między składową naprężeń mechanicznych T_k lub odkształceń mechanicznych S_k ze składową indukcji elektrycznej D_i lub natężenia pola elektrycznego E_i w identyczny sposób, jak równanie (1) opisze to dla materiału izotropowego.

Jeśli w tensorach odkształceń, naprężeń czy pola elektrycznego niezerowa jest tylko jedna składowa, wtedy równanie (2) silnie się upraszcza. W materiałach anizotropowych wyróżnia się podstawowe kombinacje wyodrębnionych kierunków działania sił i pola elektrycznego:

- podłużny efekt piezoelektryczny, w którym kierunki naprężenia mechanicznego i indukcji elektrycznej (polaryzacji) są zgodne a pozostałe równe zero, obowiązuje zatem w tym przypadku zależność:

$$d_{33} = \frac{D_3}{T_3} = \frac{S_3}{E_3} \quad (3)$$

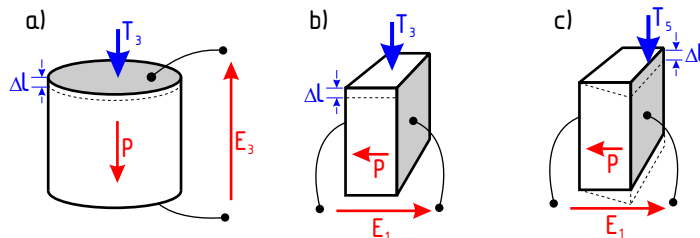
- poprzeczny efekt piezoelektryczny, w którym kierunki naprężenia mechanicznego i indukcji elektrycznej (polaryzacji), są prostopadłe, obowiązuje zatem w tym przypadku zależność:

$$d_{31} = \frac{D_3}{T_1} = \frac{S_1}{E_3} \quad (4)$$

- skośny efekt piezoelektryczny, w którym wektor polaryzacji jest równoległy do płaszczyzny, w której zachodzi odkształcenie ścinające, obowiązuje zatem w tym przypadku zależność:

$$d_{15} = \frac{D_1}{T_5} = \frac{S_5}{E_1} \quad (5)$$

Kierunki działania sił i pola elektrycznego w tych zjawiskach ilustruje rysunek 1.



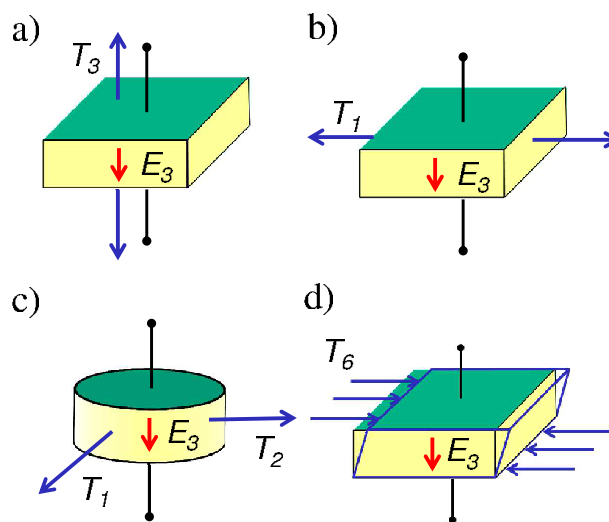
Rysunek 1: Rodzaje prostego i odwrotnego efektu piezoelektrycznego obserwowanego w piezoceramicie: a) efekt podłużny, b) efekt poprzeczny, c) efekt skośny.

1.2 Rezonatory piezoelektryczne

Rezonatory piezoelektryczne to elementy elektroniczne, wykonane z piezoelektryków z naniesionymi na nie elektrodami, w których wykorzystuje się zależność impedancji takiego elementu od częstotliwości.

Materiał piezoelektryczny jest w nich umieszczony tak, aby mógł się swobodnie odkształcać pod wpływem napięcia przyłożonego do elektrod rezonatora dzięki odwrotnemu zjawisku piezoelektrycznemu. W normalnych warunkach i napięciach rzędu woltów odkształcenia te są znikome, rzędu pikometra. Jeśli jednak napięcie będzie przemienne a jego częstotliwość zbliżona do częstotliwości rezonansowej, to dzięki wzmocnieniu rezonansowemu odkształcenia staną się znacznie większe. Wtedy ładunek generowany dzięki prostemu zjawisku odwrotnemu silnie będzie wpływał na właściwości elektryczne rezonatora.

W rezonatorach mogą występować różne rodzaje wzbudzonych drgań, których przykłady pokazano na rysunku 2.



Rysunek 2: Podstawowe rodzaje drgań w rezonatorach piezoelektrycznych: a) drgania grubościowe, b) drgania poprzeczne, c) drgania radialne, d) drgania ścinania.

Ich częstotliwości zależą od wymiarów rezonatora oraz prędkości rozchodzenia się fali akustycznej w materiale N (nazywaną również stałą częstotliwości drgań lub stałą częstotliwościową), z którego je wykonano. Na przykład dla rezonatora o kształcie dysku o średnicy ϕ i grubości h częstotliwość rezonansowa dla drgań radialnych wynosi:

$$f_r = \frac{N}{\phi} \quad (6)$$

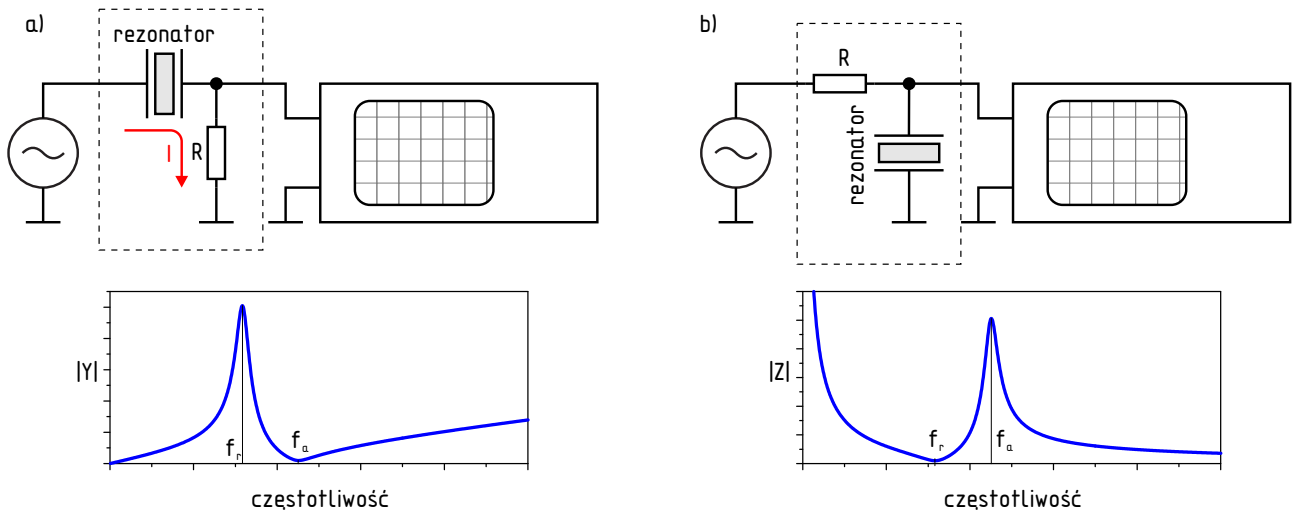
a grubościowych:

$$f_r = \frac{N}{h} \quad (7)$$

Wartość N również może zależeć od kierunku rozchodzenia się fali a jej typowe wartości dla ceramiek piezoelektrycznych to 1850 – 2000 m/s.

1.3 Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego

Ważnym parametrem opisującym materiał piezoelektryczny jest współczynnik sprzężenia elektromechanicznego k . Jest on bezwymiarową miarą stopnia przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną i odwrotnie w piezoelektryku. Można go określić na podstawie stosunku



Rysunek 3: Dwa sposoby pomiaru krzywych rezonansowych za pomocą oscyloskopu w metodzie dynamicznej: a) pobudzenie napięciowe i pomiar prądu, b) pobudzenie prądowe i pomiar napięcia.

wewnętrznej energii elektromechanicznej W_{EM} do iloczynu energii zmagazynowanej w postaci pola elektrycznego W_E oraz energii mechanicznej (energii potencjalnej sprężystości) W_M :

$$k^2 = \frac{W_{EM}^2}{W_E \cdot W_M}, \text{ gdzie:} \quad (8a)$$

$$W_{EM} = \frac{1}{2} S_3 E_3 = \frac{1}{2} d_{33} E_3 T_3 \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (8b)$$

$$W_E = \frac{1}{2} E_3 D_3 = \frac{1}{2} \epsilon_{33}^T E_3^2 \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (8c)$$

$$W_M = \frac{1}{2} S_3 T_3 = \frac{1}{2} s_{33}^E T_3^2 \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (8d)$$

W zależności od materiału, rodzaju wzbudzonych drgań i warunków brzegowych przy jakich pracuje element wykonany z materiału piezoelektrycznego liczbowe wartości k mogą osiągać wartości od 0,01 do 0,75. Im ta wartość jest większa, tym większa skuteczność przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną i odwrotnie.

Współczynnik ten można wyznaczyć na różne sposoby. Jeden z nich, bazujący na pomiarze przenikalności elektrycznej opisano w ćwiczeniu „Pomiary i wyznaczanie parametrów ceramiki piezoelektrycznej”.

Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego można również wyznaczyć badając krzywe rezonansowe rezonatora wykonanego z materiału piezoelektrycznego.

Krzywe te można wyznaczać w sposób przybliżony za pomocą prostych układów pomiarowych, pokazanych na rysunku 3. W układach tych generator funkcyjny pracuje jako wobulator, czyli generator sygnału sinusoidalnego, o relatywnie dużej częstotliwości zmiennej w czasie, na przykład w zakresie od 100 kHz do kilku MHz w ciągu 0,1 s.

Jeśli czas trwania kreślenia obrazu na ekranie oscyloskopu podłączonego do układu jak na rysunku 3a to również będzie 0,1 s, wtedy uzyskamy przebieg, którego obwiednia będzie odpowiadała natężeniu prądu I płynącego przez szeregowe połączenie rezonatora i rezystora.¹ Zakładając, że napięcie z generatora odkłada się w większości na rezonatorze można w przybliżeniu powiedzieć, że oscyloskop pokaże przebieg modułu admitancji $Y = \frac{I}{U}$ od częstotliwości. Taki wykres można uzyskać również używając analizatora impedancji.

¹Prąd jest tu mierzony pośrednio, poprzez zastosowanie rezystora i obrazowanie na oscyloskopie napięcia na rezystorze, przez który płynie ten prąd ($U = R \cdot I$).

Na takim wykresie widoczne maksimum odpowiada częstotliwości, dla której następuje rezonans. Minimum odpowiada tzw. antyrezonansowi. Określając częstotliwości rezonansu f_r i antyrezonansu f_a można określić współczynnik sprzężenia elektromechanicznego korzystając z przybliżonej zależności podanej przez Okami:

$$\frac{1}{k^2} = \frac{a}{\frac{f_a - f_r}{f_r}} + b \quad (9)$$

na podstawie której można obliczyć k_r dla drgań radialnych podstawiając $a = 0,495$, $b = 0,574$ a k_{33} dla drgań grubościowych podstawiając $a = 0,405$, $b = 0,810$.

Jeśli pomiary przeprowadza się w układzie z pobudzeniem prądowym, pokazanym na rysunku 3b, wtedy na oscyloskopie obserwuje się wykres, którego obwiednia odpowiada w przybliżeniu przebiegowi modułu impedancji $Z = \frac{U}{I}$, rezonansowi odpowiada minimum a antyrezonansowi maksimum.

1.4 Filtry piezoelektryczne

W elektronice spotyka się różne rodzaje filtrów. W zależności od elementów wykorzystywanych do ich budowy wyróżnia się filtry: aktywne, wykorzystujące elementy aktywne jak tranzystory, wzmacniacze operacyjne oraz pasywne - zbudowane z elementów reaktancyjnych LC o podwyższonej dobroci.

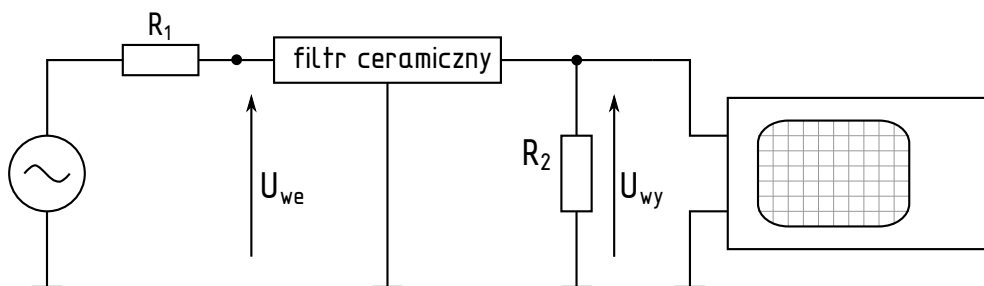
Osobną grupę stanowią filtry piezoelektryczne, które swoimi właściwościami znacznie przewyższają właściwości filtrów rezonansowych zbudowanych na bazie dyskretnych elementów reaktancyjnych. Filtry piezoelektryczne ze względu na rodzaj wykorzystywanych drgań elementów piezoelektrycznych podzielono na dwie zasadnicze grupy:

- filtry, w których stosowane są rezonatory z drganiami objętościowymi,
- filtry z akustycznymi falami powierzchniowymi.

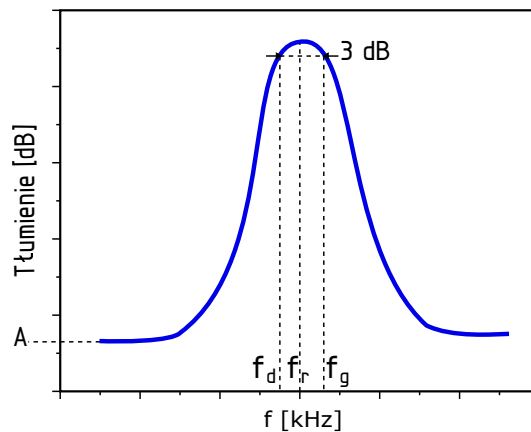
W ramach ćwiczenia mierzone będą filtry z pierwszej grupy. Filtry te mogą zawierać rezonatory dyskretnie (dwójnikowe) lub rezonatory ze sprzężeniami akustycznymi. W przypadku rezonatorów objętościowych możliwe jest, dzięki występowaniu zjawiska pułapkowania energii, uzyskiwanie sprzężeń między rezonatorami wykonywanymi na jednej płytce piezoelektryka. Filtry takie nazywane są filtrami monolitycznymi.

Na podstawie typowej, przedstawionej na rysunku 5 charakterystyce filtru pasmowo-przepustowego należy wyznaczyć następujące parametry:

- częstotliwość środkową f_r ,
- szerokość pasma przenoszenia na poziomie 3 dB, $\Delta f = f_g - f_d$,
- tłumienie poza pasmem A [dB], definiowane jako $A = 20 \log \left(\frac{U_{wy}}{U_{we}} \right)$, gdzie U_{we} - napięcie wejściowe, U_{wy} - napięcie wyjściowe.



Rysunek 4: Układ do pomiaru charakterystyk częstotliwościowych filtrów piezoelektrycznych



Rysunek 5: Charakterystyka filtra środkowo-przepustowego

2 Program ćwiczenia

2.1 Przygotowanie stanowiska pomiarowego do badań metodami dynamicznymi

Pomiary piezoelektryków i filtrów, wykonywane w tym ćwiczeniu, wymagają przygotowania nastaw generatora funkcyjnego oraz oscyloskopu. Pomiary te polegają na pobudzeniu układu pomiarowego sygnałem sinusoidalnym o zadanej amplitudzie i częstotliwości zmieniającej się liniowo pomiędzy wartością początkową i końcową oraz obserwacji na ekranie oscyloskopu obwiedni sygnału w odpowiednim punkcie układu pomiarowego.

Aby przygotować tego rodzaju pomiar należy postępować zgodnie z poniższą procedurą wiedząc, jaką amplitudę, zakres częstotliwości i szybkość zmian częstotliwości należy użyć. Konkretnie wartości podane są w dalszych podpunktach instrukcji.

1. Połączyć wyjście generatora oraz wejście kanału A oscyloskopu w odpowiedni sposób z układem pomiarowym. Zależec to będzie od konkretnego pomiaru.
2. Wyjście SYNC generatora połączyć z wejściem kanału B oscyloskopu. Generator podaje tam sygnał prostokątny o amplitudzie około 3 V. Zbocze rosnące na tym sygnale oznacza początek przemiatania, opadające występuje albo w połowie przemiatania, albo przy częstotliwości ustawionej za pomocą funkcji MARKER w menu SWEEP w generatorze funkcyjnym.
3. Ustawić w generatorze funkcyjnym generację sygnału sinusoidalnego o zadanej amplitudzie.
4. Korzystając z funkcji SWEEP w generatorze funkcyjnych włączyć przemiatanie częstotliwości w generatorze funkcyjnym i ustalić zakres częstotliwości oraz czas trwania przemiatania według wskazówek prowadzącego zajęcia.
5. W oscyloskopie włączyć kanały A i B ustawiając w nich sprzężenie stałoprądowe DC i mnożnik $\times 1$, zmienić metodę pomiaru na Peak-Detect (menu Acquire).
6. Podstawę czasu w oscyloskopie wyregulować tak, aby odcinek czasu równy czasowi przemiatania zajmował 10 podziałek. Znacznik wyzwalacza „T” przesunąć w poziomie na lewą stronę ekranu.
7. Wyregulować wzmocnienie na kanale B, używanym do synchronizacji z generatorem. Wyzwalanie oscyloskopu ustawić na rosnące zbocze na kanale B a poziom wyzwalania ustalić w połowie wysokości sygnału na kanale B. W wypadku czasów przemiatania dłuższych niż około 0,5 s konieczna będzie zmiana trybu pracy wyzwalacza z „AUTO” na „NORMAL”. Po wykonaniu tego punktu powinno się uzyskać stabilny obraz na oscyloskopie.
8. Wyregulować wzmocnienie i położenie wykresu na kanale A.

2.2 Wyznaczanie współczynnika sprzężenia elektromechanicznego metodą dynamiczną

Wyznaczenie współczynnika sprzężenia elektromechanicznego dla wskazanych przez prowadzącego elementów piezoelektrycznych odbywa się w układzie, jak na rysunku 3.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy zgrubnie oszacować częstotliwości, przy których mogą wystąpić podstawowe typy rezonansów w badanym rezonatorze. Dokonuje się tego na podstawie pomiarów wymiarów elementów piezoelektrycznych wskazanych przez prowadzącego i równań (6) i (7).

1. Należy przygotować układ pomiarowy zgodnie z opisem w punkcie 2.1. Amplituda generatora powinna wynosić kilka V_{PP} , przemiatanie liniowe od 100 kHz do 5 MHz w czasie 100 ms.
2. Na oscylogramie widoczne będą liczne rezonanse. Określić zgrubnie częstotliwość wszystkich z nich w przedziale częstotliwości zadanym przez prowadzącego.
3. Na podstawie przeprowadzonych wcześniej oszacowań zidentyfikować rzeczywiste podstawowe drgania radialne i grubościowe.
4. Zmieniając **wyłącznie** ustawienia generatora zawęzić zakres przemiatania tak, aby na oscylogramie był widoczny wyłącznie podstawowy rezonans dla drgań radialnych. Zmierzyć częstotliwości rezonansu i antyrezonansu.
5. Wyznaczyć ze wzorów Okami (9) współczynnik sprzężenia elektromechanicznego dla drgań radialnych.
6. Powtórzyć dwa poprzednie punkty dla podstawowych drgań grubościowych.

2.3 Wyznaczenie parametrów filtrów piezoelektrycznych

1. Należy przygotować układ pomiarowy zgodnie z opisem w punkcie 2.1. Amplituda generatora powinna wynosić kilka V_{PP} , przemiatanie liniowe od 100 kHz do 1 MHz w czasie 200 ms.
2. Na oscyloskopie powinna być widoczna charakterystyka filtru. By wygodnie przeprowadzić pomiar, na generatorze zawęzić zakres przemiatania częstotliwości.
3. Wydłużyć w generatorze czas przemiatania do 2 s, przełączyć tryb wyzwalania oscyloskopu na NORMAL i odpowiednio skorygować ustawienia podstawy czasu w oscyloskopie.
4. Przeprowadzić pomiar wielkości niezbędnych do obliczenia parametrów filtru zgodnie z opisem w punkcie 1.4.

Literatura

- [1] Wykład kursu „Dielektryki i Magnetyki”
- [2] Waldemar Soluch „Filtry piezoelektryczne”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982

Materiały dodatkowe

Tabela 1: Podstawowe parametry materiałowe wybranych ceramiek piezoelektrycznych.

Materiał	840	841	850	Typ IV	880
względna przenikalność elektryczna ϵ_{33r}^T	1250	1350	1900	3400	1000
współczynnik strat $tg\delta$	0,40	0,35	1,40	1,70	0,35
temperatura Curie [$^{\circ}C$]	325	320	360	180	310
gęstość $\rho[g/cm^3]$	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
dobroć mechaniczna Q_m	500	1400	80	65	1000
współczynniki sprzężenia elektromechanicznego					
k_p	0,59	0,60	0,63	0,77	0,50
k_t	0,59	0,60	0,63	0,77	0,50
k_{33}	-	-	-	0,52	-
k_{31}	0,72	0,68	0,72	-	0,62
k_{15}	0,35	0,33	0,36	-	0,30
moduły piezoelektryczne $\left[\frac{pC}{N}\right], \left[\frac{pm}{V}\right]$					
d_{33}	290	300	400	650	215
$-d_{31}$	125	109	175	-	95
d_{15}	480	450	590	-	330
stałe ładunkowe $\left[\frac{mV \cdot m}{N}\right], \left[\frac{mC}{m^2}\right]$					
g_{33}	26,5	25,5	24,8	20,9	25,0
$-g_{31}$	11,0	10,5	12,4	-	10,0
g_{15}	38,0	35,0	36,0	-	28,0
moduły sprężystości [GPa]					
c_{11}	80	76	63	59	90
c_{33}	68	63	54	51	72
stałe częstotliwości drgań $\left[\frac{m}{s}\right]$					
N_L	1524	1700	1500	-	1725
N_T	2005	2005	2040	2040	2110
N_P	2130	2055	2080	1980	2120