



CZUJNIKI POMIAROWE I ELEMENTY WYKONAWCZE

# Ćwiczenie 4

## Pomiar drgań mechanicznych Akcelerometry mikromaszynowe i piezoelektryczne

Ramowy plan pracy

15'	30'	45'	1 <sup>h</sup>	1 <sup>h</sup> 15'	1 <sup>h</sup> 30'	po zajęciach

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:  
Bartosz Pękosławski, Piotr Pietrzak

Łódź 2012

wer. 1.0.2. 4.03.2012



## Spis treści

<b>B Wprowadzenie do ćwiczenia.....</b>	<b>5</b>
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Podstawy teoretyczne .....	7
2.1. Wprowadzenie .....	7
2.2. Metody pomiaru drgań mechanicznych.....	7
2.2.a. Piezoelektryczne czujniki przyspieszenia.....	9
2.2.b. Mikromaszynowe, pojemnościowe czujniki przyspieszenia .....	10
<b>C Doświadczenie.....</b>	<b>13</b>
3. Pomiary.....	13
3.1. Układ pomiarowy .....	13
3.2. Wykonanie pomiarów .....	15
<b>D Wyniki.....</b>	<b>17</b>
4. Opracowanie i analiza wyników.....	17
<b>E Informacje.....</b>	<b>19</b>
5. Literatura .....	19



## Wprowadzenie do ćwiczenia

---

### 1. Cel i przebieg ćwiczenia

---

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady pomiaru drgań mechanicznych za pomocą czujników przyspieszenia liniowego. Ponadto w ćwiczeniu poruszone jest zagadnienie właściwości i charakterystyk akcelerometrów mikromaszynowych oraz piezoelektrycznych.



## 2. Podstawy teoretyczne

---

### 2.1. Wprowadzenie

Drgania mechaniczne są okresowo-zmiennymi ruchami ciał (układów mechanicznych) wokół ich pozycji równowagi. Ten rodzaj ruchu nazywa się ruchem harmonicznym. Istnieją różne przyczyny powstawania drgań, ale główną jest działanie sił sprężystości. Innymi siłami, które mogą powodować drgania są siły np. grawitacyjne, elektrostatyczne i magnetyczne.

Drgania mechaniczne występują powszechnie w naturze. Typowym przykładem są drgania atomów w sieci krystalicznej w związku z ruchami cieplnymi. Propagacji fal dźwiękowych w ośrodku towarzyszą drgania mechaniczne cząstek. Maszyny zawierające elementy ruchome generują drgania podczas pracy w wyniku nierównomiernego rozkładu obciążenia i niedokładnego wykonania podzespołów. Często drgania mechaniczne są generowane celowo, np. w instrumentach muzycznych, wahadle zegara, huśtawce, wiertarce udarowej czy szlifierce oscylacyjnej. Fale mechaniczne, którym towarzyszą drgania, są stosowane w wielu aplikacjach, np. ultrasonografii w medycynie. Istnieje też wiele niechcianych efektów istnienia zjawiska drgań mechanicznych. Jednym z nich jest uciążliwy hałas generowany przez drgające maszyny. Innymi problemami wynikającymi z istnienia drgań mechanicznych są szybsze zużycie części maszyn w wyniku zmęczenia materiału i uszkodzeń spowodowanych poluzowaniem mocowań. Ponadto drgania z pobliskich źródeł (przejeżdżające pojazdy, drgające maszyny, itd.) mogą znacząco osłabić konstrukcje budynków, a rezonans konstrukcji (np. mostu lub drapacza chmur spowodowany silnym wiatrem lub wstrząsami ziemi) może doprowadzić do katastrofy.

### 2.2. Metody pomiaru drgań mechanicznych

Proces pomiaru drgań mechanicznych generowanych przez pewien obiekt jest podstawą do ich dalszej analizy i opisu. Pomiaru tego można dokonać na trzy sposoby – poprzez pomiar przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia. Te trzy wielkości mogą być przekształcane na inną wielkość, którą można łatwo zmierzyć (zwykle wielkość elektryczną, taką jak napięcie) za pomocą czujników odpowiednio przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia.

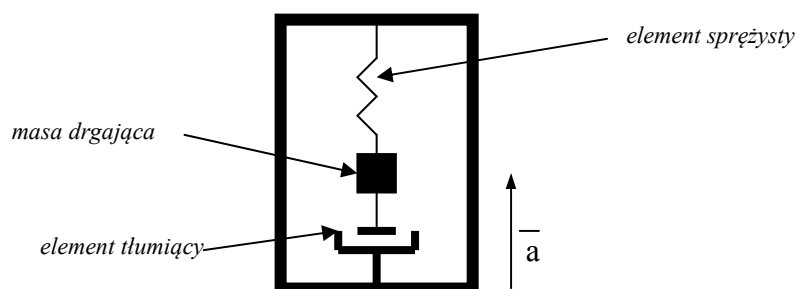
W związku z tym że wielkości reprezentujące drgania mechaniczne są ze sobą powiązane, możliwe jest otrzymanie jednego parametru ruchu z innego poprzez wykonanie różniczkowania lub całkowania po czasie. Jednak wybór rodzaju czujnika nie jest dowolny. W zależności od częstotliwości i poziomu drgań dany rodzaj przetwornika może być bardziej właściwy od innego.

Czujniki przemieszczenia mierzą względny ruch dwóch elementów (odległość pomiędzy nimi) lub bezwzględny ruch całej struktury w odniesieniu do nieruchomego punktu. Czujniki te mogą być wykonane jako bezdotykowe sondy zbliżeniowe (przemieszczenie względne) lub czujniki przyspieszenia z podwójnym całkowaniem (ruch bezwzględny). Czujniki przemieszczenia są najbardziej odpowiednie do pomiaru drgań o niskiej częstotliwości i amplitudzie. Typowy czujnik

przemieszczenia jest sondą, w której zmiany prądu elektrycznego w cewce umieszczonej w końcówce sondy są zamieniane na zmienne napięcie. Zmiany prądu zachodzą w wyniku powstania prądu wirowego w przewodzącej powierzchni, która znajduje się w polu elektromagnetycznym wytworzonym przez sondę. Im mniejsza odległość pomiędzy sondą a powierzchnią, tym większe zmiany prądu.

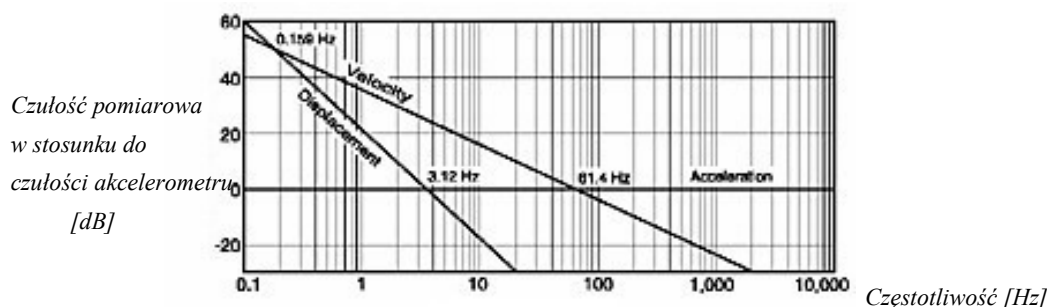
Czujniki prędkości są z reguły konstruowane jako układy elektromagnetyczne z cewką i magnesem. Im szybszy jest ruch magnesu, który poddany jest działaniu sił bezwładności, tym większa siła elektromotoryczna jest indukowana w cewce. Istnieją także czujniki prędkości zbudowane jako czujniki przyspieszenia z wewnętrznym całkowaniem. Czujniki prędkości są używane w pomiarach drgań o niskich do średnich częstotliwościach.

Czujniki przyspieszenia, zwane akcelerometrami, mierzą przyspieszenie poprzez pomiar siły bezwładności działającej na masę pomiarową. Model mechaniczny czujnika jest pokazany na Rys. 3. Siła bezwładności działająca na masę zawieszoną na połączeniu elastycznym (takim jak sprężyna) jest proporcjonalna do przyspieszenia zgodnie z drugim prawem Newtona i powoduje powstanie równej co do wielkości siły elastycznej w połączeniu zgodnie z trzecim prawem Newtona. Istnienie siły elastycznej skutkuje proporcjonalnym odkształceniem, które może być mierzone na różne sposoby. Czujniki przyspieszenia są odpowiednie do pomiarów drgań o niskich do wysokich częstotliwościach, co czyni je bardzo wszechstronnymi.



Rys. 1. Model mechaniczny czujnika przyspieszenia

Czułość różnych rodzajów czujników w funkcji częstotliwości obrazuje Rys. 2. Jak widać, czujniki przyspieszenia oferują najlepszą czułość w szerokim paśmie częstotliwości i ich użycie jest polecane w większości zastosowań związanych z monitoringiem stanu technicznego maszyn i diagnostyką.



Rys. 2. Wykres czułości czujników przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia w funkcji częstotliwości

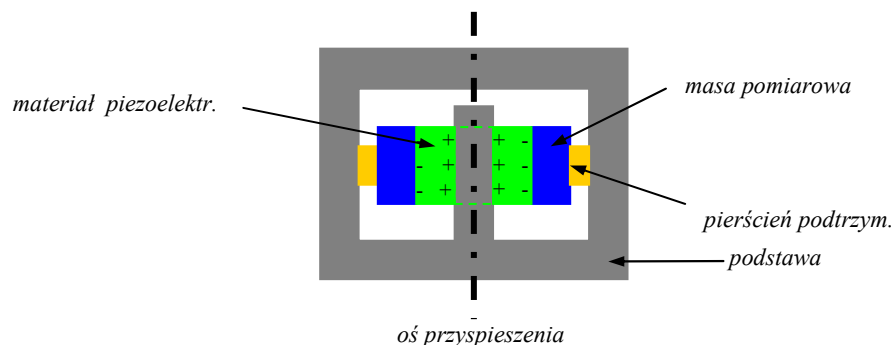


## 2.2.a. Piezoelektryczne czujniki przyspieszenia

W akcelerometrach piezoelektrycznych wykorzystywane jest zjawisko piezoelektryczne. Zewnętrzna zmienna siła działająca na kawałek kryształu dielektryka powoduje indukcję ładunku powierzchniowego proporcjonalnego do wielkości siły, a więc do przyspieszenia.

Materiałami piezoelektrycznymi używanymi do produkcji akcelerometrów są kwarc, ceramiki syntetyczne, takie jak cyrkonian-tytanian ołowiu (PZT) oraz tworzywa sztuczne takie jak poli(fluorek winylodenu) (PVdF). Akcelerometry kwarcowe wykazują niższą czułość i wyższy poziom szumu niż czujniki wykonane z materiałów piezoceramicznych. Z drugiej jednak strony, kwarc jest mniej podatny na indukcję ładunku pod wpływem temperatury, co jest zwane efektem piroelektrycznym. W rzeczywistości, gdy materiał piezoelektryczny jest właściwie zamknięty w obudowie czujnika, niechciane sygnały mogą być zminimalizowane i odkształcenia mechaniczne wynikające z szybkim zmian temperatury mogą być odizolowane od kryształu. Stąd właściwe zaprojektowanie obudowy może rozwiązać problemy wynikające z zastosowania materiałów piezoceramicznych. W przypadku pracy w wysokiej temperaturze akcelerometry budowane są z turmaliny lub niobianu litu.

Materiały piezoelektryczne mogą mieć różne kształty. Zwykle mają formę cienkich sztabek lub płytek. Kryształ musi być dokładnie przycięty w określonym kierunku do jego osi. W przypadku akcelerometrów kryształ zwykle jest cięty w ten sposób, że jest on czuły na siły ścinające. Ta konfiguracja powoduje indukcję ładunku na obciążonych powierzchniach i umożliwia na szeregowe łączenie mechaniczne oraz elektryczne elementów w celu zwiększenia indukowanego ładunku. Siła ścinająca oddziałuje na kryształ poprzez ruch masy pomiarowej wzdłuż wspornika z kryształem umieszczonym pomiędzy jak pokazano na Rys. 3. Ten tryb pracy pozwala na dobre odizolowanie materiału piezoelektrycznego od przejściowych zmian temperatury podstawy i odkształceń oraz sprawia, że konstrukcja jest sztywna (mniej podatna na rezonans).



Rys. 3. Budowa czujnika przyspieszenia pracującego w trybie ścinania

Można wyróżnić dwa rodzaje akcelerometrów piezoelektrycznych – czujniki wysoko i niskoimpedancyjne. Czujniki wysokoimpedancyjne mają wyjście ładunkowe i wymagają dodatkowego wzmacniacza ładunku pełniącego rolę przetwornika ładunek-napięcie. Akcelerometry niskoimpedancyjne mają zintegrowany wzmacniacz ładunku i parametrem wyjściowym jest napięcie. Wzmacniacz ładunku jest zazwyczaj wzmacniaczem napięcia o dużym wzmocnieniu zbudowanym z wejściem zbudowanym na tranzystorach polowych (JFET lub MOSFET), co zapewnia dużą rezystancję izolacji. W przypadku czujników niskoimpedancyjnych, niezbędne jest ich zewnętrzne zasilanie.

Poza dryfem temperaturowym, inną trudnością związaną z zastosowaniem czujników piezoelektrycznych jest starzenie się materiału wskutek nadmiernego poziomu drgań i temperatury. Dlatego czujniki te muszą być często kalibrowane. Sztuczne postarzanie podczas procesu produkcyjnego jest stosowane w akcelerometrach wysokiej jakości w celu zminimalizowania starzenia w przyszłości. Ponadto czujniki piezoelektryczne nie nadają się do pomiarów przyspieszenia statycznego (tj. nachylenia).

Do zalet akcelerometrów piezoelektrycznych należy wysoka rozdzielczość pomiarowa, stosunkowo mały poziom szumu i szerokie pasmo częstotliwościowe mierzonych drgań w związku z wysokimi częstotliwościami rezonansowymi. Mimo iż akcelerometry piezoelektryczne nie mogą

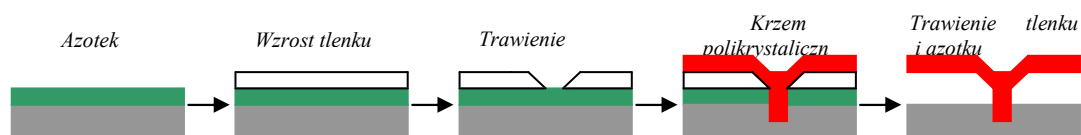
mierzyć nachylenia, są one odpowiednie do pomiarów zjawisk quasi-statycznych, nie tylko dynamicznych.

### 2.2.b. Mikromaszynowe, pojemnościowe czujniki przyspieszenia

Akcelerometry mikromaszynowe, które należą do rodziny urządzeń MEMS (ang. Micro Electro Mechanical Systems), są zwykle wytwarzane jako monolityczne struktury krzemowe. Są one produkowane przy wykorzystaniu technik objętościowych i powierzchniowych. Większość akcelerometrów MEMS wykorzystuje pojemnościową metodę pomiaru, jednak istnieją także mikromaszynowe akcelerometry rezystancyjne i piezoelektryczne. Produkowane są również akcelerometry MEMS wykonane np. z kwarcu (piezorezystywne) lub niktowe (pojemnościowe, produkowane przez Silicon Designs, Inc.).

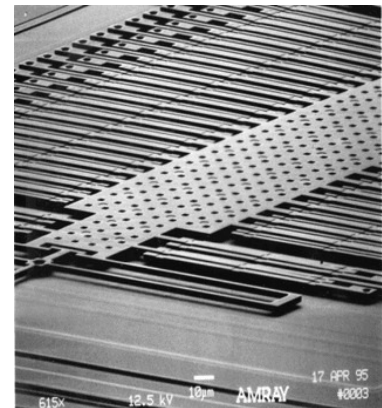
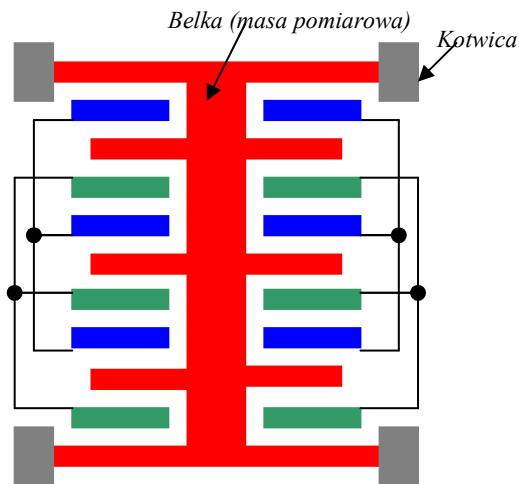
Akcelerometry MEMS wytwarzane metodami objętościowymi są wytrawiane z materiału bazowego. To podejście wymaga trzech warstw krzemu umieszczonych jedna na drugiej za pomocą technik wytwarzania cienkich podłoży. Środkowa warstwa jest używana jako masa pomiarowa połączona za pomocą anodowania pomiędzy warstwami zewnętrznymi, które są elementami wchodzącymi w skład kondensatora o zmiennej pojemności. W rezultacie otrzymywane są bardzo dobre właściwości mechaniczne mikrostruktury dzięki doskonałej strukturze podłoża. Wadami tego rozwiązania są jednak trudności z elektryczną izolacją poszczególnych części, ograniczenie pomiaru do jednej osi (prostopadłej do płaszczyzny podłoża), niska częstotliwość rezonansowa i stosunkowo wysokie koszty produkcji.

Wady te są mniej widoczne w mikromaszynowych akcelerometrach powierzchniowych. W podejściu powierzchniowym cała struktura czujnika jest wykonana na waflu krzemowym z warstw, które są utworzone na niej i osobno wytrawiane. Warstwami tymi są krzem polikrystaliczny, azotek krzemu i dwutlenek krzemu. Cały proces został pokazany na Rys. 4 i rozpoczyna się on od nałożenia ochronnej warstwy azotku na podłożu typu p. Następnie cienki tlenek tworzy się na warstwie azotku, co chroni go przed zanieczyszczeniem domieszkami. Tlenek jest kształtowany za pomocą fotolitografii i trawienia (maska fotorezystu jest formowana za pomocą naświetlania UV). Następnie warstwy polikrzemowa jest nakładana poprzez osadzanie z fazy lotnej (CVD), a leżący poniżej tlenek jest usuwany poprzez trawienie. Polikrzem jest materiałem strukturalnym, którego grubość i odległość od podłoża wynosi około  $1\div 2\ \mu\text{m}$ .



Rys. 4. Proces technologiczny produkcji czujnika mikromaszynowego

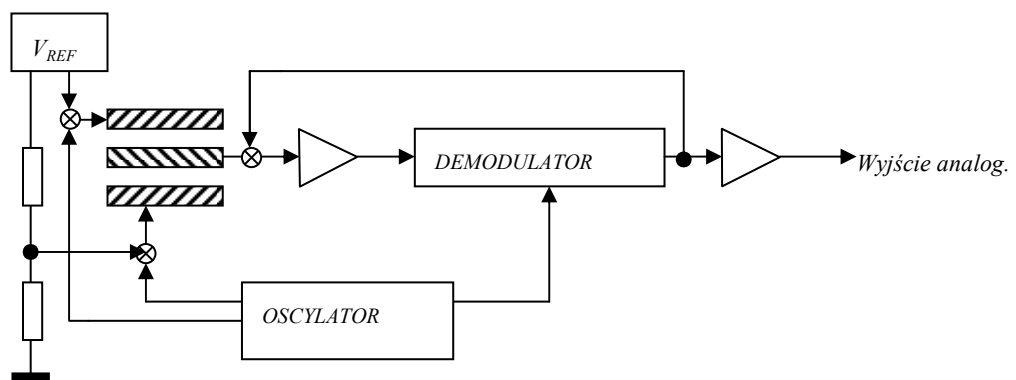
Struktury grzebieniowe o różnych pojemnościach są często używane do pomiaru przesunięcia masy pomiarowej w mikromaszynowych akcelerometrach powierzchniowych. Przykładem takiej struktury są czujniki produkowane przez firmę Analog Devices. Struktura jest pokazana schematycznie wraz z rzeczywistym widokiem na Rys. 5. Składa się ona z polikrzemowej belki z długimi i cienkimi zębami po obu stronach. Belka jest zamocowana do kotwic podłożowych za pomocą elementów elastycznych. Działają one jak sprężyny, gdy belka będąca masą pomiarową, porusza się i powoduje ugięcie elementów sprężystych. Zęby na belce stanowią środkową okładkę kondensatora i poruszają się one pomiędzy dwiema pozostałymi okładkami zamocowanymi do podłoża. W rezultacie zmieniają się dwie pojemności pomiędzy ruchomą okładką i jedną z nieruchomych okładek (jedna rośnie, a druga maleje). Cała struktura grzebieniowa ma wymiary około  $0,5\ \text{mm} \times 0,6\ \text{mm}$ , zęby mają długość  $200\ \mu\text{m}$  i szerokość  $2\ \mu\text{m}$ , odległości między okładkami wynoszą  $2\ \mu\text{m}$  a masa pomiarowa ma wagę  $0,1\ \mu\text{g}$ .



[3]

Rys. 5. Schemat budowy i zdjęcie struktury pojemnościowego czujnika mikromaszynowego

Pomiar zmiany pojemności różnicowej wymaga złożonego układu, który umożliwia wykrycie ekstremalnie małych zmian pojemności wynoszących  $10 \div 20$  aF, jako że całkowita pojemność wynosi zaledwie 0,1 pF, a maksymalna zmiana pojemności wynosi ok.  $\pm 0,01$  pF. Układ jest zintegrowany wraz ze strukturą mikromaszynową w jednym układzie scalonym. Istnieją dwa podejścia do procesu integracji. Podejście z dwoma chipami, opracowane przez firmę Motorola, wymaga łączenia struktury czujnika z chipem układu współpracującego. W odróżnieniu, firma Analog Devices stosuje podejście z jednym chipem, łączące cały układ i strukturę czujnika w jednym chipie i zwraca je „integrated MEMS” (iMEMS). Obwód składa się z oscylatora, którego prostokątny sygnał wyjściowy jest podawany na pierwszy zestaw nieruchomych okładek i po przesunięciu fazy o  $180^\circ$  na drugi zestaw okładek. Sygnał na środkowej okładce (zęby belki), który ma wartość zerową w stanie równowagi tzn. bez siły bezwładności działającej na czujnik, ma amplitudę proporcjonalną do przesunięcia zębów oraz fazę zależną od kierunku tego przesunięcia. Sygnał jest wstępnie wzmacniany i demodulowany, tak aby napięcie stałe z wartością bezwzględną proporcjonalną do amplitudy przyspieszenia i znaku zależnego od zwrotu przyspieszenia jest obecny na wyjściu demodulatora. To napięcie stałe jest podawane z powrotem do ruchomej okładki w celu umożliwienia powrotu do środkowej pozycji za pomocą wypadkowej siły elektrostatycznej (nieruchome okładki są także spolaryzowane za pomocą pewnego napięcia stałego). Wyjście demodulatora jest buforowane w akcelerozmiernikach z wyjściem analogowym lub modulowana jest szerokość impulsu (PWM) w akcelerozmiernikach z wyjściem cyfrowym. Schemat blokowy opisywanego układu jest pokazany na Rys. 6.



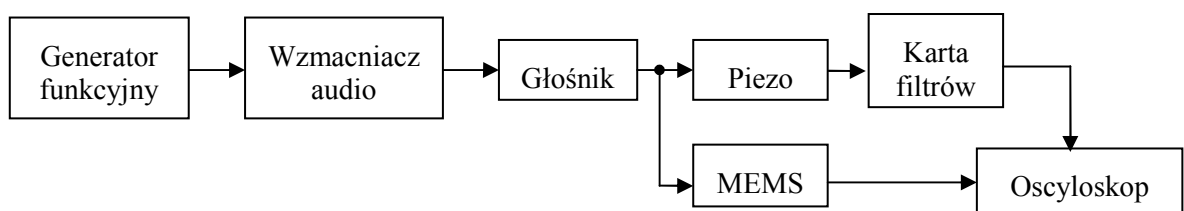
Rys. 6. Schemat blokowy układu do pomiaru zmian pojemności

Zaletami akcelerometrów mikromaszynowych są niska cena (dla akcelerometrów produkowanych masowo), możliwość pomiaru przyspieszenia statycznego (nachylenia) i mały dryft temperaturowy w związku z zastosowaniem pomiaru różnicowo-pojemnościowego oraz brak konieczności częstej kalibracji w przeciwieństwie do czujników piezoelektrycznych. Do wad należą niższa rozdzielczość w porównaniu do czujników piezoelektrycznych, węższe pasmo częstotliwościowe w związku z niższymi częstotliwościami rezonansowymi oraz wyższy poziom szumu. Ostatni czynnik jest związany z ruchami Browna, które są znaczące dla małych mas pomiarowych w czujnikach mikromaszynowych. Dlatego dokładne czujniki MEMS wymagają możliwie dużych mas pomiarowych, jednak wzrost wagi powoduje trudności z zachowaniem liniowości odchylenia w funkcji amplitudy przyspieszenia oraz współpłaszczyznowości ugiętej belki i płaszczyzny podłoża.

### 3. Pomiary

#### 3.1. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy, którego schemat jest pokazany poniżej, składa się z głośnika pełniącego rolę wzbudnika drgań, laboratoryjnego generatora funkcyjnego, wzmacniacza audio, zasilaczy laboratoryjnych, akcelerometru mikromaszynowego ADXL202E oraz piezoelektrycznego IMI Sensors 608A11 wraz z kartą zasilania oraz kondycjonowania sygnału z tego czujnika. Sygnał z czujników jest obserwowany na ekranie oscyloskopu.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego

Zastosowany czujnik piezoelektryczny ma zintegrowany wzmacniacz ładunku i jest wykonany z materiału piezoelektrycznego pracującego w trybie ścinania. Dwużyłowy kabel połączeniowy jest ekranowany i zalany w obudowie wykonanej ze stali nierdzewnej. Czujnik jest skonstruowany tak aby mógł być mocowany na śrubie. Zakres mierzonych przyspieszeń wynosi  $\pm 50$  g. Pasma częstotliwościowe czujnika rozciąga się od 0,5 Hz do 10 kHz, jednak karta filtrów zawęża je do 5 kHz. Częstotliwość rezonansowa jest równa 22 kHz. Rozdzielczość szerokopasmowa wynosi 350  $\mu\text{g}$  a czułość około 100 mV/g. Gęstość widmowa szumu wynosi 5  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Z kolei zastosowany czujnik mikromaszynowy jest przystosowany do pomiaru przyspieszeń w zakresie  $\pm 2$  g. Pasma częstotliwościowe wynosi od 0 Hz do 6 kHz, a częstotliwość rezonansowa 10 kHz. Gęstość widmowa szumu wynosi  $200 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Czujnik umożliwia pomiar w dwóch prostopadłych kierunkach X i Y. Posiada on wyjścia cyfrowe PWM, jednak w ćwiczeniu wykorzystywane jest wyjście analogowe  $X_{\text{FILT}}$  (pin 3 na złączu płytki z czujnikiem). Między tym wyjściem a masą podłączony jest kondensator o pojemności 27 nF ograniczający pasmo czujnika do 200 Hz.

### 3.2. Wykonanie pomiarów

1. Połączyć układ pomiarowy z sondą napięciową na wyjściu czujnika mikromaszynowego oraz wyjściem karty filtrów połączonym z drugim kanałem oscyloskopu. Nie włączać zasilania. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie połączeń.
2. Ustawić napięcie zasilania czujnika mikromaszynowego na 3V oraz zasilanie wzmacniacza na  $\pm 10V$ .
3. Na generatorze funkcyjnym Motech FG-506 ustawić sinusoidalny przebieg wyjściowy oraz włączyć tłumienie (*Attenuation*) równe -20dB.
4. Kanały oscyloskopu skonfigurować w trybie AC, tłumienie sond 1:1, wzmocnienie kanałów około 50 mV/dz. Włączyć pomiar (*Measure*) wartości międzyszczytowych (*Peak-peak*) na obu kanałach.
5. Zmieniając częstotliwość generowanych drgań od 20 Hz do 1 kHz (co 10 Hz w zakresie do 150 Hz, co 50 Hz w dalszej części pasma) zmierzyć międzyszczytowe wartości napięć na wyjściu obu czujników. Utrzymywać międzyszczytową wartość napięcia na wyjściu czujnika piezoelektrycznego równą około 100 mV (ewentualnie zmniejszyć gdyby generowane dźwięki były zbyt uciążliwe, zwiększając tłumienie sygnału wyjściowego na generatorze).
6. Ustawić częstotliwość drgań równą 100 Hz. Ustawić jednakowe wzmocnienie na obu kanałach. Podstawę czasu dostosować tak aby obserwować co najmniej 4 pełne okresy napięcia. Zapisać przebiegi czasowe w formie pliku *.csv*.
7. Wyłączyć generator, ustawić maksymalne wzmocnienie na obu kanałach (najmniejsze napięcie na działkę) i zapisać przebiegi czasowe w formie pliku *.csv*.
8. Powtórzyć punkt 6 i 7 z włączonym uśrednianiem na oscyloskopie (*Acquire, Averages = 16*).
9. Wyłączyć zasilanie.
10. Rozłączyć układ.





### 4. Opracowanie i analiza wyników

---

1. Na podstawie zmierzonych wartości napięcia międzyszczytowego wyznaczyć wykres czułości czujnika mikromaszynowego w funkcji częstotliwości, przyjmując że czułość czujnika piezoelektrycznego jest stała i wynosi 100 mV/g.
2. Sformułować wnioski dotyczące czułości pomiarowej i pasma częstotliwościowego czujnika mikromaszynowego.
3. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów napięcia obliczyć wartość współczynnika SNR dla obu czujników jako stosunek wartości skutecznej idealnego przebiegu sinusoidalnego o danej amplitudzie (przyjąć dla ułatwienia wartość skuteczną napięcia zmierzonego przy włączonym generatorze) do średnio-kwadratowej wartości zarejestrowanego szumu (przy wyłączonym generatorze). W tym celu:

- a. W pliku .csv dodać kolumnę z wartościami będącymi kolejnymi próbkami podniesionymi do kwadratu.
- b. Uruchomić pakiet do obliczeń numerycznych Scilab.
- c. Aby w dalszym ciągu pracy nie wpisywać za każdym razem pełnej ścieżki dostępu do plików z danymi pomiarowymi (pliki programu WaveStar), można zmienić katalog roboczy na katalog zawierający te pliki, wpisując polecenie

```
cd('ścieżka_dostępu_do_pomiarów');
```

- d. Wczytać skrypt zawierający funkcje potrzebne do obliczenia całki mocy chwilowej po czasie (ćwiczenie 3b, laboratorium PiUM) wpisując polecenie (w razie potrzeby należy dodać ścieżkę dostępu do pliku)

```
exec('wavestar_calka.sce');
```

- e. Odczytać wyeksportowane dane poleceniem
- ```
[naglowek, dane]=wczytaj_ws('nazwa_pliku.csv');
```
- f. Obliczyć całkę przebiegu kwadratu napięcia za przedział od  $t1$  do  $t2$  (różnica równa okresowi  $T$ ), wydając polecenie
- ```
calka_infsup(dane, numer_przebiegu, t1, t2, 0, 1)
```
- Parametr numer\_przebiegu to numer kolejny przebiegu zgodnie z rosnącą numeracją w pliku .csv (nie numer kanału oscyloskopu).
- g. Obliczyć wartość skuteczną napięcia zgodnie z definicją wartości RMS.
4. Powtórzyć punkt 3 dla obu czujników, odpowiednio z wyłączonym i włączonym uśrednianiem.
5. Sformułować wnioski dotyczące właściwości szumowych obu czujników i sposobów poprawy współczynnika SNR.

### 5. Literatura

---

- [1] Pietrzak P.,
- [2] Pękosławski B., *Implementation of HDLC Protocol in the System for Measurement of Mechanical Vibrations of Electric Machines*, praca dyplomowa magisterska, Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych, Łódź 2005