

ĆWICZENIE NR 7

CZUJNIKI PRZYSPIESZEŃ STATYCZNYCH I DYNAMICZNYCH

(opracował Eligiusz Pawłowski)

Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z problematyką pomiaru przyspieszenia, budową i właściwościami czujnika przyspieszenia ADXL202JE wykonanego w technologii MEMS [1] oraz praktyczne jego przebadanie w stanie statycznym i dynamicznym.

1. WSTĘP

1.1. Podstawowe definicje

Akcelerometr (czujnik przyspieszenia) jest to układ elektromechaniczny, który mierzy siłę bezwładności pojawiającą się w układzie poddawanemu przyspieszeniu. Siła ta może mieć charakter dynamiczny lub statyczny. Niektóre z akcelerometrów reagują również na siłę grawitacji Ziemi, co bywa niezbyt poprawnie nazywane przyspieszeniem statycznym [1].

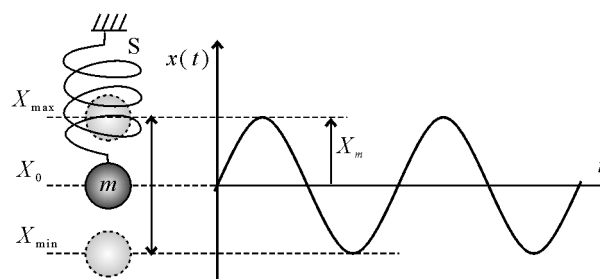
Oscylacje - cykliczne zmiany pewnej wielkości (na przemian rosnącej i malejącej), względem innej zmiennej, najczęściej względem czasu lub jednego lub kilku wymiarów przestrzeni. Oscylacje występują w układach fizycznych, w organizmach żywych, w systemach gospodarczych, w ekosystemach, w społeczeństwie ludzkim itp.

Drgania - oscylacje zachodzące w układach fizycznych. Wyróżnia się: drgania elektryczne, elektromagnetyczne, magnetyczne, mechaniczne i inne.

Drgania mechaniczne - okresowe zmiany położenia ciała fizycznego względem położenia równowagi, np.: drgania wahadła matematycznego, wahadła fizycznego, masy zawieszonyj na sprężynie (Rys. 1), struny, membrany, cząsteczek gazu (powietrza) lub cieczy (wody) itp.

Wibracje - termin najczęściej używany w medycynie pracy i ochronie środowiska, rozumiany jako przekazywanie drgań mechanicznych z ciała stałego na poszczególne tkanki ciała człowieka lub na cały organizm. Wibracje są bodźcami fizycznymi przekazywanymi bezpośrednio z drgającego ciała, z pominięciem środowiska powietrznego. Wibracjom towarzyszy **dźwięk** powstający na skutek przekazywania części energii drgań poprzez powietrze do narządu słuchu człowieka.

Przemieszczenie $x(t)$ - położenie drgającego ciała względem punktu równowagi X_0 . Przykład ciała o masie m zawieszonyj na sprężynie S pokazano na Rys. 1. Ciało wykonuje ruch drgający wokół punktu równowagi X_0 zmieniając swoje położenie od X_{\min} do X_{\max} . Amplituda drgań wynosi X_m . W układzie SI przemieszczenie wyrażane jest w metrach [m].



Rys. 1. Przykład ciała o masie m , zawieszonyj na sprężynie S , wykonującyj drgania wokół punktu równowagi X_0

Prędkość $v(t)$ - pochodna przemieszczenia (drogi) $x(t)$ względem czasu, w układzie SI prędkość wyrażana jest w metrach na sekundę [m/s]:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]. \quad (1)$$

Przyspieszenie $a(t)$ - pochodna prędkości $v(t)$ względem czasu, w układzie SI przyspieszenie wyrażane jest w metrach na sekundę do kwadratu [m/s²]:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]. \quad (2)$$

Warto również zwrócić uwagę na występujące w wielu językach dwa podobne słowa: prędkość i szybkość (*ang. velocity, speed*). W mowie potocznej zazwyczaj stosowane są one zamiennie, jednak w fizyce i technice ich znaczenie jest różne. Bardziej ogólnym pojęciem jest szybkość (*ang. speed*). Szybkość jest to wielkość skalarna, która opisuje zmianę dowolnej wielkości niewektorowej w jednostce czasu, np.: szybkość skanowania – kartek na minutę, szybkość procesora – taktów na sekundę, operacji na sekundę, szybkość nadawania alfabetem Morse'a – znaków na minutę, szybkość czytania – wyrazów na minutę, szybkość nagrzewania/stygnięcia – stopni Celsjusza na minutę itp.

Prędkość (*ang. velocity*) jest to wielkość fizyczna opisująca zmianę położenia ciała względem przyjętego układu odniesienia. Ponieważ ciało poruszające się z jednego punktu przestrzeni do drugiego przebywa drogę o określonym kierunku i zwrocie (droga jest więc wektorem), to prędkość jest również wielkością wektorową. Jeśli uwzględnimy tylko odległość między punktami, pomijając ich położenie w przestrzeni, to stosunek tej odległości do czasu będzie szybkością ruchu ciała, czyli skalarem. Przyspieszenie, jako pochodna prędkości, jest więc również wielkością wektorową. Czujniki przyspieszenia (akcelerometry) jednoosiowe reagują na składową wektorową przyspieszenie tylko w wyróżnionym kierunku. Akcelerometry wieloosiowe 2D, 3D rozkładają wektor przyspieszenia na dwie lub trzy składowe prostopadłe wzdłuż wyróżnionych osi X, Y, Z czujnika. Zastosowany w ćwiczeniu akcelerometr ADXL202JE jest czujnikiem dwuosiowym X,Y [1].

1.2. Parametry opisujące drgania harmoniczne

W technice pomiarów przyspieszenia najczęściej rozpatrywany jest przypadek drgań harmoniczných. Drgania harmoniczne to taki rodzaj drgań, w których zmiana położenia $x(t)$ drgającego ciała opisana jest sinusoidalną funkcją czasu t (Rys. 1):

$$x(t) = X_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

gdzie X_m jest amplitudą drgań, ω jest pulsacją:

$$\omega = 2 \pi f, \quad (4)$$

oraz f jest częstotliwością drgań powiązaną z okresem drgań T znaną zależnością:

$$T = \frac{1}{f}. \quad (5)$$

Uwzględniając wzór definicyjny (1), prędkość $v(t)$ w drganiach harmoniczných jest opisana zależnością:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X_m \omega \cos(\omega t) = V_m \cos(\omega t), \quad (6)$$

gdzie V_m jest amplitudą prędkości:

$$V_m = \omega X_m = 2\pi f X_m. \quad (7)$$

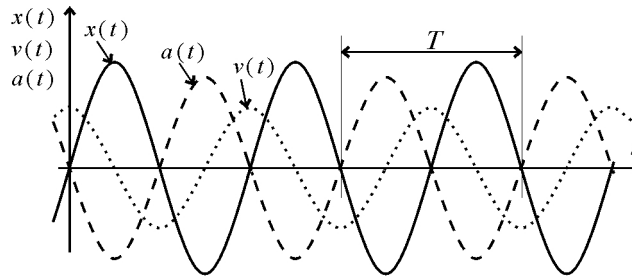
Należy zauważyć, że przy stałej amplitudzie drgań X_m , amplituda prędkości V_m zmienia się proporcjonalnie do częstotliwości drgań f . Uwzględniając wzór definicyjny (2), przyspieszenie $a(t)$ w drganiach harmonicznym jest opisane zależnością:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -X_m \omega^2 \sin(\omega t) = -A_m \sin(\omega t), \quad (8)$$

gdzie A_m jest amplitudą przyspieszenia:

$$A_m = \omega^2 X_m = 4\pi^2 f^2 X_m. \quad (9)$$

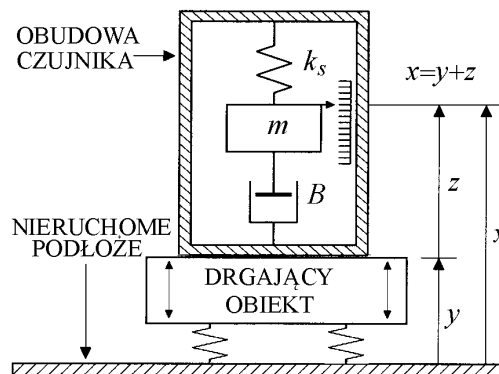
Należy zauważyć, że przy stałej amplitudzie drgań X_m , amplituda przyspieszenia A_m zmienia się proporcjonalnie do kwadratu częstotliwości drgań f^2 . Zależności czasowe pomiędzy położeniem $x(t)$, prędkością $v(t)$ i przyspieszeniem $a(t)$ dla drgań harmonicznym przedstawiono na Rys. 2. Należy zauważyć, że prędkość v jest przyspieszona o 90° względem przemieszczenia x , a przyspieszenie a jest w przeciwfazie względem przemieszczenia x .



Rys. 2. Drgania harmoniczne – przebiegi czasowe położenia $x(t)$, prędkości $v(t)$ i przyspieszenia $a(t)$

1.3. Zasada pomiaru przyspieszenia

Podstawowym rodzajem czujnika do pomiarów przyspieszeń jest przetwornik z **masą inercyjną (masą sejsmiczną)** połączoną z obudową czujnika i z obiektem drgającym poprzez **element sprężysty i układ tłumiący**. Uproszczoną budowę takiego czujnika przedstawiono na Rys.3. Masa sejsmiczna m , stała k_s elementu sprężystego oraz stała tłumienia B elementu tłumiącego decydują o właściwościach przetwornika z masą inercyjną [2].



Rys. 3. Model mechaniczny czujnika z masą inercyjną m : obiekt drga względem Ziemi, obudowa czujnika jest sztywno połączona z obiektem drgającym, masa inercyjna m jest zawieszona na sprężynie k_s i drga względem obudowy czujnika z tłumieniem B

Ruch masy inercyjnej opisuje się za pomocą trzech współrzędnych: x , y , z , opisujących ruch względem siebie masy inercyjnej i obudowy czujnika, odniesionych do nieruchomego układu odniesienia, np. Ziemi, podłogi, fundamentu itp.

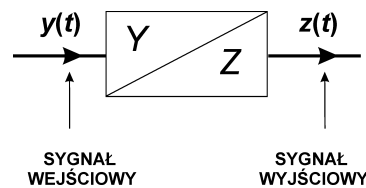
Zgodnie z oznaczeniami na Rys.3. współrzędne x , y , z oznaczają:

x - współrzędna opisująca ruch masy inercyjnej m względem zewnętrznego nieruchomego układu odniesienia (np. względem Ziemi),

y - współrzędna opisująca ruch obudowy czujnika (sztywno połączonej z obiektem drgającym) względem zewnętrznego układu odniesienia (np. względem Ziemi),

z - współrzędna opisująca ruch masy inercyjnej m względem obudowy czujnika sztywno połączonej z obiektem drgającym.

Współrzędna y (opisująca drgania obiektu względem nieruchomego podłoża) jest więc sygnałem wejściowym czujnika, a współrzędna z (opisująca ruch masy inercyjnej m względem obudowy czujnika) jest sygnałem wyjściowym czujnika, tak jak w uproszczeniu przedstawiono to na Rys. 4.



Rys. 4. Sygnał wejściowy i wyjściowy czujnika przedstawionego na Rys.3

W układzie przedstawionym na Rys. 3 w każdej chwili wszystkie siły działające w czujniku na masę m równoważą się:

$$F_m + F_B + F_S = 0, \quad (10)$$

gdzie: F_m – siła bezwładności,
 F_B – siła tłumiąca,
 F_S – siła sprężystości.

Siła bezwładności F_m jest proporcjonalna do przyśpieszenia a masy inercyjnej względem nieruchomego układu odniesienia i do masy m :

$$F_m = m \frac{d^2 x}{dt^2}. \quad (11)$$

Siła tłumiąca F_B jest proporcjonalna do prędkości ruchu masy inercyjnej względem obudowy czujnika i stałej tłumienia B elementu tłumiącego. Ponieważ element tłumiący znajduje się wewnątrz czujnika pomiędzy masą inercyjną a obudową oraz uwzględniając że $z = x - y$ otrzymamy:

$$F_B = B \frac{dz}{dt} = B \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \right). \quad (12)$$

Siła sprężystości F_S jest proporcjonalna do przemieszczenia z masy inercyjnej względem obudowy czujnika i stałej sprężystości k_s sprężyny. Ponieważ sprężyna znajduje się wewnątrz czujnika pomiędzy masą inercyjną a obudową oraz uwzględniając że $z = x - y$ otrzymamy:

$$F_S = k_s z = k_s (x - y) \quad (13)$$

Po podstawieniu zależności (11), (12) oraz (13) do równania na równowagę sił (10) otrzymamy równanie różniczkowe drugiego rzędu opisujące ruch masy inercyjnej m czujnika:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + B \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dy}{dt} \right) + k_s (x - y) = 0 \quad (14)$$

Po prostych przekształceniach (dzielenie przez m , podstawienie $x=y+z$ oraz grupowanie wyrazów) otrzymamy równanie w postaci:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{B}{m} \frac{dz}{dt} + \frac{k_s}{m} z = -\frac{d^2 y}{dt^2} \quad (15)$$

Aby pokazać sens fizyczny poszczególnych składników tego równania, wprowadzamy dodatkowe oznaczenia: pulsacja rezonansowa ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_s}{m}}, \quad (16)$$

oraz współczynnik tłumienia b :

$$b = \frac{B}{2\sqrt{k_s m}}. \quad (17)$$

Po podstawieniu (16), (17) do (15) otrzymujemy równanie różniczkowe przetwornika drugiego rzędu w postaci wygodnej do dalszej analizy:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2b\omega_0 \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z = -\frac{d^2 y}{dt^2}. \quad (18)$$

Prawa strona równania (18) opisuje przyspieszenie obudowy czujnika (czyli również obiektu drgającego) względem nieruchomego podłoża – jest to więc wielkość mierzona. Lewa strona równania opisuje natomiast ruch masy inercyjnej względem obudowy czujnika – jest to więc wielkość wyjściowa czujnika.

W konkretnym rozwiązaniu czujnika jeden z efektów (masa, tłumienie, sprężyste zawieszenie) dominuje nad dwoma pozostałymi, których wpływ na pracę czujnika staje się wtedy praktycznie pomijalny. Zależnie od konstrukcji czujnika można wyróżnić więc trzy szczególne przypadki:

- 1) masa m , - duża, stała tłumienia B – mała, stała sprężyny k_s – mała
- 2) masa m , - mała, stała tłumienia B – duża, stała sprężyny k_s – mała
- 3) masa m , - małą, stała tłumienia B – mała, stała sprężyny k_s – duża

Rozpatrzmy krótko poszczególne trzy przypadki.

1) masa m - duża, stała tłumienia B – mała, stała k_s – mała, otrzymujemy pulsację rezonansową ω_0 bliską zeru. Wtedy:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (19)$$

czyli że:

$$\begin{aligned} z &= -y \\ x &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Równanie (20) oznacza, że masa sejsmiczna m jest nieruchoma względem zewnętrznego układu odniesienia ($x=0$), sygnał wyjściowy z jest proporcjonalny do przemieszczenia czujnika $-y$, taki czujnik nazywamy **wibrometrem** lub czujnikiem przemieszczenia.

2) masa m - mała, stała tłumienia B - duża, stała k_s - mała, otrzymujemy dużą wartość współczynnika tłumienia b . Wtedy dominuje składnik drugi, a pomijamy pierwszy i trzeci składnik:

$$2b\omega_0 \frac{dz}{dt} \cong -\frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (21)$$

czyli że:

$$z = -\frac{1}{2b\omega_0} \frac{dy}{dt}. \quad (22)$$

Sygnal wyjściowy z jest proporcjonalny do prędkości czujnika, czyli jest to czujnik prędkości. Takie czujniki są rzadko stosowane ze względu na małą czułość wynikającą z dużego tłumienia b .

3) masa m - mała, stała tłumienia B - mała, stała k_s - duża, otrzymujemy dużą wartość pulsacji rezonansowej ω_0 i małą wartość współczynnika tłumienia b . Wtedy dominuje składnik trzeci, a pomijamy pierwszy i drugi składnik:

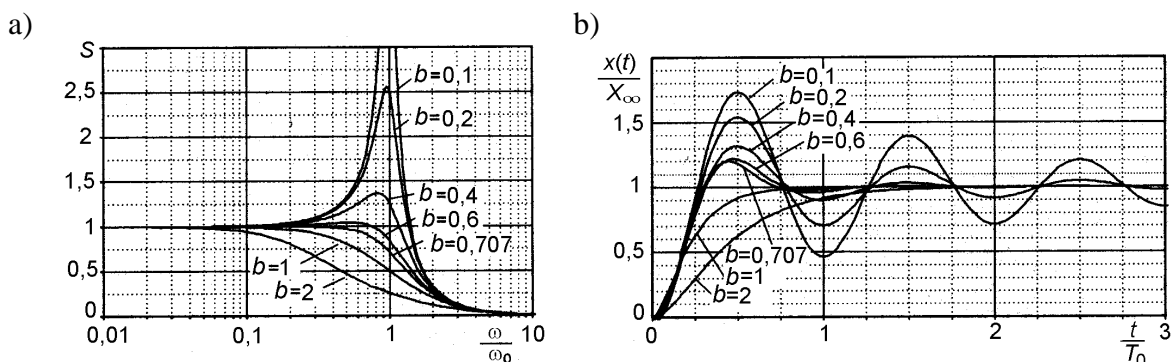
$$\omega_0^2 z = -\frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (23)$$

czyli że:

$$z = -\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 y}{dt^2}. \quad (24)$$

Sygnal wyjściowy z jest proporcjonalny do przyspieszenia obiektu drgającego, taki czujnik nazywamy **akcelerometrem** lub czujnikiem przyspieszenia. Jest to najbardziej popularny rodzaj czujnika do pomiarów parametrów drgań.

W rzeczywistych konstrukcjach czujników nie można uzyskać idealnych warunków opisanych powyżej. Dlatego konstruktorzy tak dobierają parametry czujnika: masę m , stałą sprężystości k_s oraz stałą tłumienia B , aby uzyskać możliwe dużą pulsację rezonansową ω_0 , szerokie pasmo przenoszenia i krótki czas odpowiedzi na skok jednostkowy. Wymaga to uzyskania optymalnej wartości współczynnika tłumienia b . Jak wynika z zależności (17) współczynnik tłumienia b jest wielkością bezwymiarową, zależną od masy m , stałej sprężystości k_s oraz stałej tłumienia B . Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe i skokowe dla różnych wartości współczynnika tłumienia przedstawiono na Rys.5. Wynika z nich, że optymalną wartością współczynnika tłumienia jest $b=0,707$. Zapewnia to najszersze pasmo przenoszenia czujnika oraz najszybsze ustalenie się odpowiedzi na skok jednostkowy.



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe (a) oraz charakterystyki skokowe (b) czujnika drgań w zależności od stopnia tłumienia b , optymalna wartość $b=0,707$

2. BUDOWA WSPÓŁCZESNYCH AKCELEROMETRÓW

2.1. Generowanie wyjściowego sygnału elektrycznego czujnika

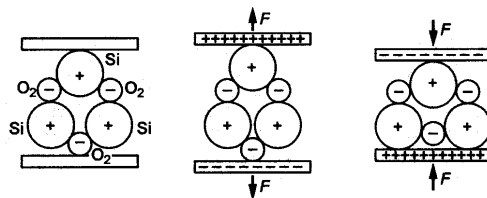
Jak wynika z konstrukcji mechanicznej akcelerometru przedstawionej na Rys. 3, sygnałem wyjściowym uzyskiwanym z czujnika jest przemieszczenie masy inercyjnej względem obudowy czujnika, czyli zgodnie z przyjętymi oznaczeniami jest to współrzędna z . Aby uzyskać z czujnika sygnał elektryczny należy więc współrzędna z zamienić na napięcie, prąd lub inną wielkość elektryczną. Wykorzystuje się w tym celu różnego rodzaju przetworniki przemieszczenia na sygnał elektryczny, z których najczęściej stosowane są:

- przetworniki piezoelektryczne,
- przetworniki pojemnościowe,
- przetworniki piezorezystancyjne,
- przetworniki magnetoelektryczne,
- przetworniki światłowodowe,
- przetworniki hallotronowe,
- przetworniki termiczne i inne.

Czujniki różnych producentów różnią się między sobą szczegółami konstrukcji mechanicznej przedstawionej na Rys. 3 oraz zastosowanym przetwornikiem przemieszczenia masy sejsmicznej na sygnał elektryczny.

2.2. Praktyczne konstrukcje czujników przyspieszenia

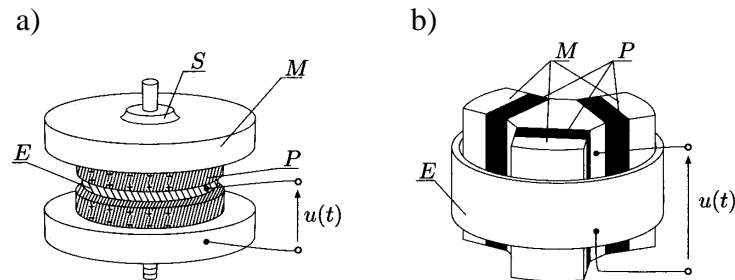
Do generowania elektrycznego sygnału wyjściowego akcelerometru z masą sejsmiczną często wykorzystywane jest zjawisko piezoelektryczne, polegające na pojawianiu się ładunków elektrycznych na powierzchni niektórych kryształów pod wpływem naprężenia mechanicznego. Kryształy w których zachodzi zjawisko piezoelektryczne charakteryzują się tym, że mają wiązania jonowe, a ich komórka elementarna nie ma środka symetrii. Pod wpływem przyłożonego naprężenia w takich kryształach dochodzi do różnego przesunięcia ładunku dodatniego i ujemnego, co powoduje polaryzację elektryczną kryształu. Pojawiający się na powierzchniach kryształu ładunek jest proporcjonalny do odkształcenia. Zmiana ładunku wymusza przepływ prądu w zewnętrznym obwodzie elektrycznym. Jednym z bardziej popularnych materiałów tego rodzaju jest kwarc (kryształ górski, SiO_2). Zasadę generowania ładunku w kryształach kwarcu pod wpływem naprężenia przedstawia Rys. 6. Kryształ bez zewnętrznych naprężeń jest elektrycznie obojętny ponieważ ujemne ładunki cząsteczek tlenu O_2 i dodatnie atomów krzemu Si wzajemnie się znoszą. Pod wpływem naprężenia mechanicznego ładunki te ulegają przemieszczeniu i na powierzchni kryształu pojawiają się ładunki o polaryzacji zależnej od znaku naprężenia (ściskanie lub rozciąganie).



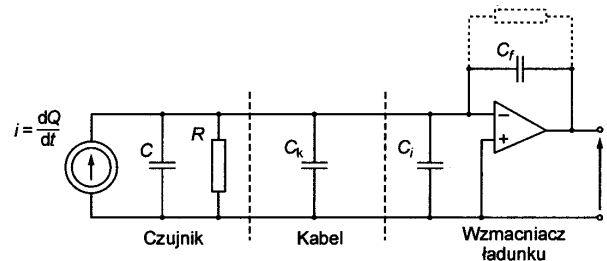
Rys. 6. Zjawisko piezoelektryczne w kryształach kwarcu

Na Rys. 7 przedstawiono przykładowe dwie konfiguracje pracy kryształu w czujniku piezoelektrycznym: z oddziaływaniem sił ściskających (a) i ścinających (b). Kryształ piezoelektryczny P z naniesionymi na przeciwległych powierzchniach elektrodami E jest umieszczony pomiędzy masą sejsmiczną M i obudową. Sygnał elektryczny $u(t)$ z elektrod E jest doprowadzany do układu pomiarowego przedstawionego na Rys. 8. Ze względu na bardzo

małą wartość ładunku generowanego w czujniku oraz negatywny wpływ pojemności kabli przyłączeniowych, wymagane jest zastosowanie specjalnych układów tzw. wzmacniaczy ładunku. Bardzo często odpowiedni wzmacniacz jest montowany od razu w obudowie czujnika, aby zminimalizować wpływ szkodliwych pojemności przewodów.

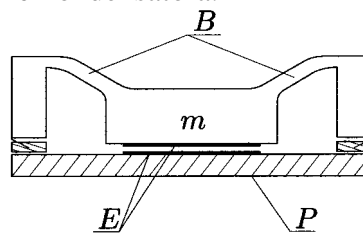


Rys. 7. Konstrukcja czujnika piezoelektrycznego z oddziaływaniem sił ściskających (a) oraz z oddziaływaniem sił ścinających (b): M - masa sejsmiczna, E - elektrody, P - krysztal piezoelektryczny, $u(t)$ - sygnał wyjściowy czujnika [2]



Rys. 8. Schemat zastępczy akcelerometru piezoelektrycznego i układ pomiarowy ze wzmacniaczem ładunku

Na Rys. 9 przedstawiono konstrukcję akcelerometru z pojemnościowym czujnikiem przemieszczenia. Masa sejsmiczna m jest zawieszona na sprężystych belkach B nad nieruchomym podłożem P . Dwie elektrody E stanowiące okładki kondensatora są umieszczone na ruchomej masie m i nieruchomym podłożu P . Zmiana położenia masy m względem podłoża (obudowy czujnika) powoduje zmianę odległości d pomiędzy elektrodami, co powoduje zmianę pojemności c kondensatora.



Rys. 9. Konstrukcja akcelerometru z czujnikiem pojemnościowym: m - masa sejsmiczna, B - sprężyste belki, E - elektrody (okładki) kondensatora, P - podłoże [2]

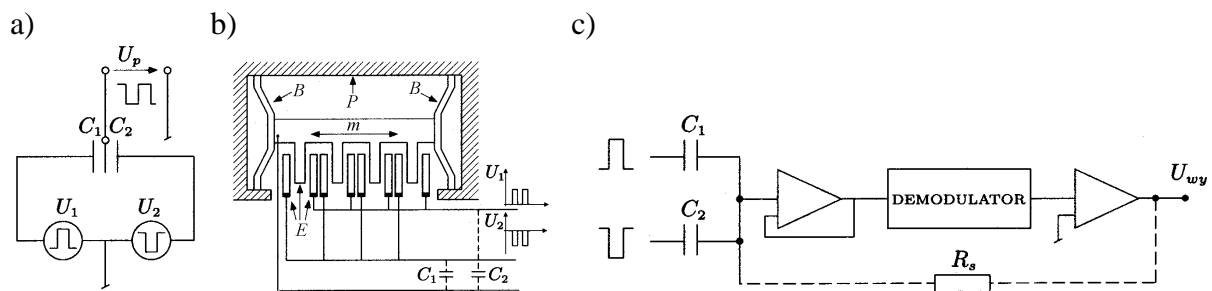
Pojemność c kondensatora zależy od powierzchni S elektrod, odległości d między elektrodami oraz przenikalności elektrycznej względnej dielektryka ϵ_r i przenikalności elektrycznej próżni ϵ_0 :

$$c = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}. \quad (25)$$

Ze wzoru (25) wynika, że zależność pojemności c od odległości d jest hiperboliczna, czyli silnie nieliniowa. Dla polepszenia liniowości stosuje się przetwornik pojemnościowy różnicowy przedstawiony na Rys. 10a. Przetwornik ten składa się z dwóch zewnętrznych

nieruchomych elektrod oraz jednej elektrody środkowej ruchomej, połączonej z ruchomą masą sejsmiczną m (Rys. 10b). W takim układzie powstają dwa kondensatory c_1 i c_2 z jedną wspólną okładką, dzięki czemu zmiany pojemności c_1 i c_2 mają przeciwny znak, co polepsza liniowość przetwornika. Zewnętrzne okładki obu kondensatorów zasila się dwoma napięciami U_1 i U_2 będącymi w przeciwnych fazach. Gdy środkowa elektroda jest w punkcie centralnym, obie pojemności są sobie równe $c_1=c_2$ i na środkowej elektrodzie napięcie jest równe zero. Jeśli środkowa elektroda przemieszcza się w kierunku jednej z elektrod zewnętrznych, pojawia się na niej napięcie, którego faza zależy od kierunku ruchu elektrody środkowej. Przedstawioną zasadę działania po raz pierwszy zastosowała firma Analog Devices i stosuje ją do dzisiaj w akcelerometrach z rodziny ADXL [16-18]. Na Rys. 10b przedstawiono uproszczoną konstrukcję wnętrza takiego czujnika. Masa sejsmiczna m w postaci belki zawieszona jest na sprężystych belkach B wewnątrz obudowy czujnika P . Do ruchomej belki zamocowane są elektrody E stanowiące wewnętrzne, ruchome okładki kondensatora. Dla zwiększenia pojemności zastosowano nie jeden zestaw elektrod jak na Rys. 10a, ale zestaw wielu elektrod połączonych równolegle, co zwiększa czułość przetwornika. Pomiędzy elektrodami ruchomymi umieszczone są dwa zestawy elektrod stanowiących zewnętrzne nieruchome okładki kondensatorów. Uproszczony schemat elektryczny czujnika przedstawiono na Rys. 10c. Na wyjściu demodulatora fazowego otrzymuje się napięcie, którego wartość i znak są proporcjonalne do przyspieszenia działającego na czujnik.

Bardziej szczegółowy opis czujnika ADXL202JE [1] zastosowanego w konstrukcji stanowiska laboratoryjnego przedstawiono w dalszej części instrukcji.

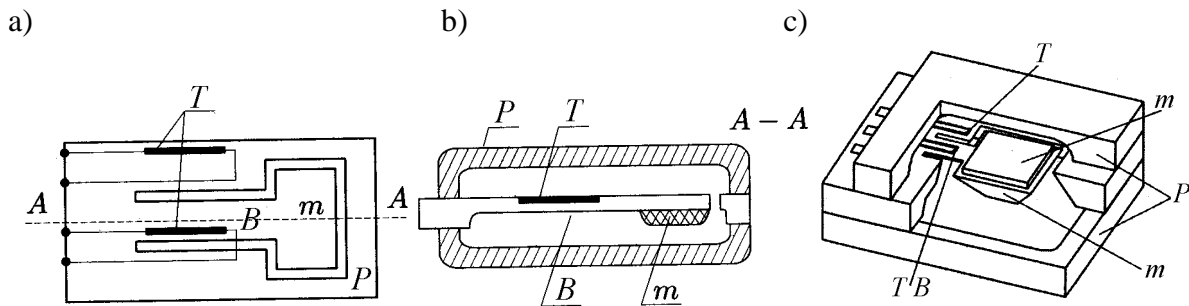


Rys. 10. Konstrukcja akcelerometru z czujnikiem pojemnościowym różnicowym, a) schemat kondensatora różnicowego, b) budowa czujnika z kondensatorem różnicowym, c) część elektroniczna przetwornika, m - masa sejsmiczna, c_1 , c_2 - kondensator różnicowy, u_1 , u_2 - napięcia zasilające kondensator różnicowy, B - sprężyste belki, E - elektrody (okładki) kondensatora, P - podłoże (obudowa czujnika) [2]

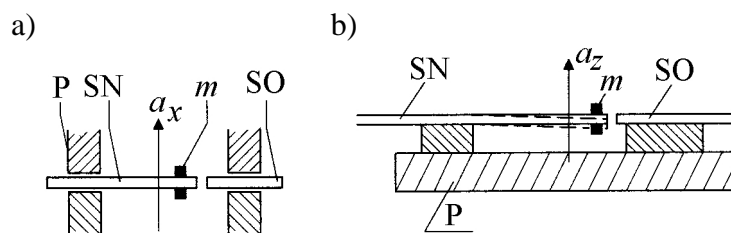
Na Rys. 11 przedstawiono konstrukcję akcelerometru piezorezystancyjnego wykonanego w technologii MEMS. Masa sejsmiczna m zawieszona jest na sprężystej belce B , która ulega odkształcaniu podczas ruchu masy m . Belka jest sztywno zamocowana jednym końcem do obudowy czujnika P . Do zamiany przemieszczenia masy sejsmicznej m na sygnał elektryczny stosuje się układ mostka tensometrycznego wykonanego z tensometrów półprzewodnikowych T , czyli z piezorezystorów. Jeden tensometr umieszczony jest na belce, a drugi na obudowie czujnika dla uzyskania kompensacji temperaturowej. Piezorezystory pracują w układzie mostka Wheatstone'a. Wszystkie elementy czujnika: belka B , masa m i piezorezystory T wykonane są w jednym kawałku krystalu krzemu metodą trawienia.

Na Rys. 12 przedstawiono konstrukcję akcelerometru z przetwornikiem światłowodowym. Światłowód nadawczy SN jest zarazem sprężystym elementem zawieszenia masy sejsmicznej m . Przemieszczenie masy m powoduje zmianę sprzężenia optycznego światłowodu nadawczego SN ze światłowodem odbiorczym SO. Fotodetektor dołączony do światłowodu odbiorczego SO wytwarza wyjściowy sygnał elektryczny czujnika. Należy

zauważyć, że taki czujnik reaguje jednocześnie na przyspieszenie a_x i a_z w kierunku poziomym i pionowym, czyli jednocześnie w dwóch prostopadłych osiach.

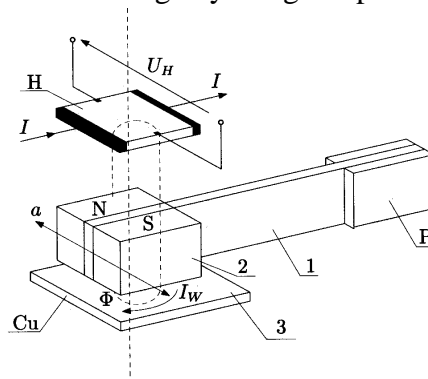


Rys. 11. Konstrukcja akcelometru z czujnikiem piezorezystancyjnym, a) widok z góry, b) przekrój poprzeczny, c) rzut ukośny, m - masa sejsmiczna, T - piezorezystory, B - sprężysta belka, P - podłoże (obudowa czujnika) [2]



Rys. 12. Konstrukcja akcelometru z czujnikiem światłowodowym, a) widok z góry, b) widok z boku, m - masa sejsmiczna, SN - światłowod nadawczy, SO - światłowod odbiorczy, P - podłoże (obudowa czujnika) [2]

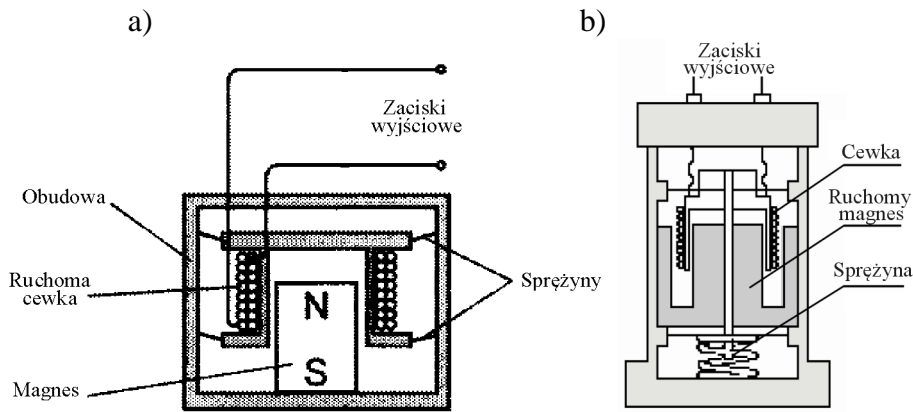
Na Rys. 13 przedstawiono konstrukcję akcelometru z przetwornikiem hallotronowym. Rolę masy sejsmicznej spełnia magnes trwały 2 zamocowany na sprężystej belce 1 umocowanej sztywno do podłoża P . Hallotron H zasilany prądem stałym I zamienia przemieszczenie magnesu 2 na sygnał elektryczny w postaci napięcia Halla U_H . Miedziana płytka 3 stanowi element tłumika, który działa na zasadzie indukowania się w niej prądów wirowych I_w od zmiennego strumienia magnetycznego Φ poruszającego się magnesu 2.



Rys. 13. Konstrukcja akcelometru z przetwornikiem hallotronowym, m - masa sejsmiczna, SN - światłowod nadawczy, SO - światłowod odbiorczy, P - podłoże [2]

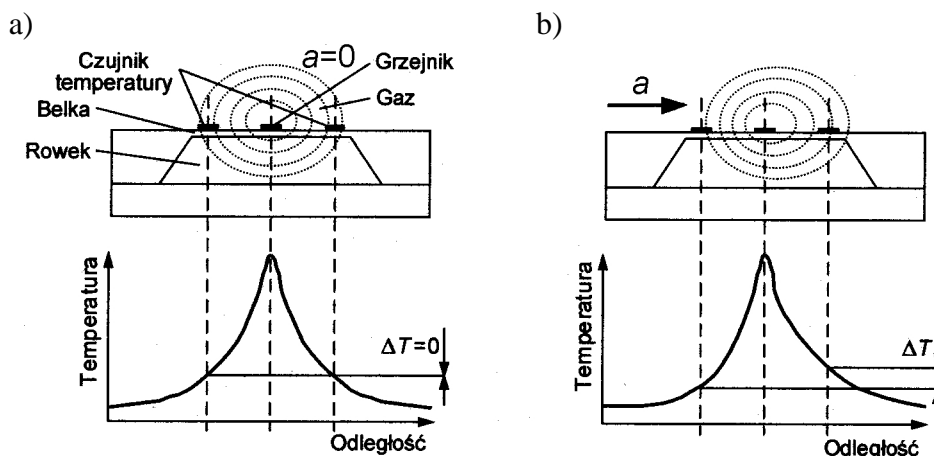
Magnesy trwałe wykorzystywane są również w akcelometrach z przetwornikami indukcyjnymi. Przykładowe dwie konstrukcje takich czujników przedstawiono na Rys. 14. Zasada działania polega na indukowaniu siły elektromotorycznej w cewce umieszczonej w zmiennym polu magnetycznym magnesu trwałego. Zmienne pole magnetyczne powstaje w wyniku przemieszczania się magnesu i cewki względem siebie, przy czym ruchoma może być

cewka (Rys. 14a) lub ruchomy może być magnes (Rys. 14b) Element ruchomy (magnes lub cewka) pełni rolę masy sejsmicznej i jest zawieszony sprężystości wewnątrz obudowy czujnika. Drugi z elementów zamocowany jest sztywno w obudowie i pozostaje nieruchomy. Efekt tłumiący uzyskuje się dołączając do cewki opornik o odpowiednio dobranej rezystancji. Prąd płynący w obwodzie obciążenia cewki oddziałuje z polem magnesu trwałego i wytwarza siłę tłumiącą ruch. Tłumienie można zmieniać poprzez dobór rezystancji obciążenia cewki.



Rys. 14. Konstrukcja akcelometru z przetwornikiem indukcyjnym, a) z ruchomą cewką, b) z ruchomym magnesem

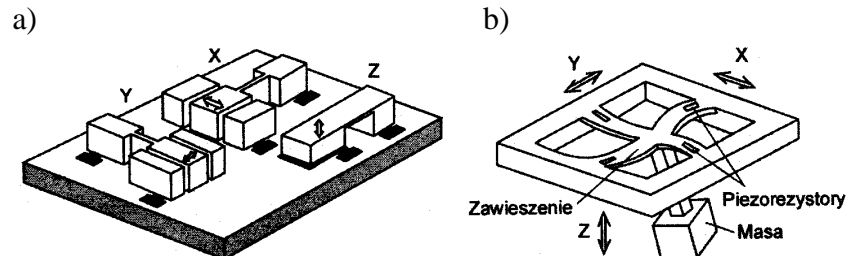
Rolę masy sejsmicznej może spełniać również gaz podgrzany do temperatury wyższej niż otoczenie. Na Rys. 15 przedstawiono konstrukcję akcelometru z przetwornikiem termicznym. Dwa czujniki temperatury umieszczone są po obu stronach grzejnika. Grzejnik ogrzewa niewielki „bąbel” gazu, który ma mniejszą gęstość niż pozostały gaz wypełniający wnętrze czujnika. W stanie statycznym temperatura ma rozkład symetryczny wokół grzejnika. Z chwilą pojawienia się przyspieszenia a , chłodniejszy i cięższy gaz siłą bezwładności przemieszcza się w kierunku przeciwnym do wektora przyspieszenia, a ogrzany i lżejszy „bąbel” gazu przemieszcza się w kierunku zgodnym do wektora przyspieszenia. Różnica temperatury ΔT zmierzona dwoma czujnikami pracującymi w układzie mostka Wheatstone'a generuje wyjściowy sygnał elektryczny akcelometru.



Rys. 15. Konstrukcja akcelometru z przetwornikiem termicznym, a) w stanie statycznym rozkład temperatur jest symetryczny, b) w stanie dynamicznym powstaje sygnał różnicowy ΔT [3]

Współcześnie często są stosowane czujniki wieloosiowe 2D lub 3D. Na Rys. 16a przedstawiono konstrukcję składającą się z trzech czujników jednoosiowych, z których każdy

mierzy przyspieszenie w jednej z osi X, Y, Z, a więc występują tu trzy niezależne masy sejsmiczne. Na Rys. 16b przedstawiono natomiast konstrukcję czujnika trzyosiowego zawierającego tylko jedną masę sejsmiczną zawieszoną sprężysto na czterech belkach z piezorezystorami. Odpowiednie przetwarzanie sygnału odkształcenia każdej z czterech belek umożliwi wyznaczenie przyspieszenia niezależnie w trzech osiach X, Y, Z.



Rys. 16. Konstrukcja akcelerometrów trzyosiowych 3D, a) konstrukcja złożona z trzech czujników jednoosiowych, b) konstrukcja pojedynczego czujnika trzyosiowego

2.3. Czujniki przyspieszeń statycznych i dynamicznych

Producenci czujników przyspieszenia rozróżniają pomiary przyspieszeń statycznych i dynamicznych, co wymaga pewnego dodatkowego wyjaśnienia. W fizyce pojęcie statyki oznacza badanie praw równowagi ciał materialnych znajdujących się pod działaniem sił zrównoważonych i jest z nim związana pierwsza zasada dynamiki Newtona: „jeżeli na dane ciało nie działa żadna siła lub działające siły równoważą się, to ciało porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym lub pozostaje w spoczynku”. Oznacza to, że w układzie będącym w stanie statycznym żadne przyspieszenia nie występują. Natomiast pojęcie dynamiki oznacza badanie praw ruchu ciał materialnych znajdujących się pod działaniem sił i jest z nim związana druga zasada dynamiki Newtona: „jeżeli na dane ciało działają niezrównoważone siły, to ciało porusza się ruchem zmiennym z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do działającej siły i odwrotnie proporcjonalnym do masy ciała’.

Ponieważ więc w stanie statycznym prędkość v jest stała lub równa zero, a przyspieszenie a zgodnie z zależnością (2) wynosi zero, to sformułowanie „przyspieszenie statyczne” należy uznać za klasyczny oksymoron. Jest ono jednak powszechnie stosowane przez producentów czujników przyspieszenia jako pewien skrót myślowy.

Przyspieszenie statyczne należy więc rozumieć jako przyspieszenie o stałej wartości, będące skutkiem działania na obiekt stałej siły wymuszającej jego przyspieszenie zgodnie z drugą zasadą mechaniki Newtona. Czujniki reagujące na tak rozumiane przyspieszenie statyczne reagują również na działanie siły grawitacji Ziemi, mimo że czujnik pozostaje w spoczynku (znajduje się w stanie statycznym) i nie występuje żadna zmiana prędkości, a przyspieszenie jest równe zero zgodnie z zależnością (2). Przyspieszenie dynamiczne jest natomiast przyspieszeniem zmiennym w czasie, będące skutkiem działania na ciało zmiennej w czasie siły, np. podczas badania drgań mechanicznych.

Analizując budowę akcelerometru przedstawioną na Rys. 3 należy zauważyć, że jego zasada działania opiera się na pomiarze siły bezwładności działającej na masę sejsmiczną m , wynikającej z przyspieszenia działającego na czujnik. Siła ta może mieć charakter dynamiczny (np. przy pomiarach drgań) lub statyczny (np. siła bezwładności podczas hamowania samochodu lub siła odśrodkowa w ruchu po okręgu). Na masę sejsmiczną czujnika m oddziałuje jednak również statyczna, stała w czasie siła grawitacji Ziemi. Efekt oddziaływania grawitacji Ziemi na czujnik przyspieszenia pozostający w spoczynku nazywany jest również przyspieszeniem statycznym. Przyspieszenie ciał wynikające z

przyciągania grawitacyjnego nazywane jest przyspieszeniem grawitacyjnym. W warunkach spadku swobodnego ciała jest ono równe przyspieszeniu jego ruchu. W sytuacji statycznej, gdy ciało spoczywa na poziomej powierzchni, przyspieszenie grawitacyjne odpowiada za jego ciężar. Przyspieszenie ziemskie wynosi w przybliżeniu $1g=9,81\text{m/s}^2$. Dokładne wartości przyspieszenia ziemskiego zależą od szerokości geograficznej, co wynika z kształtu globu (odległość środka ziemi od powierzchni jest inna na innych szerokościach geograficznych).

Czujniki reagujące na statyczne przyspieszenie ziemskie mają szerokie zastosowanie w pomiarach kąta pochylenia względem pionu lub poziomu oraz w utrzymywaniu różnych obiektów w określonej pozycji względem powierzchni ziemi (drony, autonomiczne roboty kroczące itp.). Nie wszystkie jednak akcelerometry reagują na przyspieszenie statyczne. Czujniki piezoelektryczne i indukcyjne wytwarzają sygnał tylko podczas ruchu masy sejsmicznej, a więc w stanie statycznym ich sygnał wyjściowy jest równy zero. Natomiast czujniki pojemnościowe, piezorezystancyjne, światłowodowe, hallotronowe i termiczne reagują poprawnie na przyspieszenie statyczne.

Należy również zauważyć, że czujnik reagujący poprawnie na przyspieszenie statyczne podczas swobodnego spadku w polu grawitacyjnym Ziemi pokaże przyspieszenie równe zero. W sytuacji swobodnego spadku czujnika jego masa sejsmiczna m i obudowa czujnika spadają z takim samym przyspieszeniem ziemskim, a więc czujnik zachowuje się tak, jakby znajdował się w stanie nieważkości w kosmosie. Znajduje to zastosowanie w układach chroniący delikatne urządzenia (np. dysk twardy w laptopie) przed skutkami upadku na twarde podłoże.

2.4. Zastosowania czujników przyspieszenia

Czujniki przyspieszenia mają współcześnie bardzo liczne zastosowania. Do najczęstszych i najbardziej popularnych można zaliczyć:

- pomiary wibracji maszyn i urządzeń [2],
- technika motoryzacyjna: układy poduszek powietrznych, nadzór parametrów trakcyjnych, układy antypoślizgowe, alarmy przeciwkradzieżowe itp [4-7].
- układy automatycznego poziomowania (telefony komórkowe, gry telewizyjne) [8-11],
- zabezpieczenie przed skutkami upadku (HDD), detektory swobodnego spadku [12],
- robotyka: samoczynne utrzymywanie pionu i poziomu, roboty kroczące, drony [13],
- przetworniki akustyczne (*ang. acoustic pickup*) do instrumentów muzycznych [14],
- sprzężenie zwrotne w głośnikach wysokiej klasy,
- nadzór nad przesyłkami pocztowymi i towarami podczas transportu,
- i wiele innych ... [15].

Pomiary wibracji maszyn i urządzeń są istotne ze względu na BHP, gdyż drgania o określonych częstotliwościach są bardzo szkodliwe dla organizmów żywych, w tym również dla ludzi. Zbyt długie oddziaływanie określonych drgań prowadzi u człowieka do groźnej choroby wibracyjnej. Nadzorowanie na bieżąco poziom drgań maszyn i urządzeń pozwala również obserwować zużycie elementów ruchomych (łożysk, przekładni itp.) i przeprowadzić z odpowiednim wyprzedzeniem remont. W szczególnie odpowiedzialnych zastosowaniach (śmigłowce, samoloty, platformy wiertnicze, mosty, wieżowce) czujniki drgań są zainstalowane na stałe i bez przerwy nadzorują poziom wibracji. Akcelerometry reagujące na statyczne przyspieszenie grawitacyjne pozwalają mierzyć pochylenie obiektu względem pionu lub poziomu. utrzymywać odpowiednią pozycję dronów, robotów kroczących lub obracać odpowiednio zawartość ekranu telefony komórkowego. Mogą one również wykrywać stan nieważkości, który pojawia się w swobodnie spadających obiektach (np. winda po urwaniu się z liny). W ten sposób można zabezpieczyć np. dysk twardy komputera przed skutkami upadku lub uruchomić hamulce w windzie. Bardzo wiele zastosowań akcelerometrów ma miejsce w technice motoryzacyjnej. Czujnik przyspieszenia może wykryć poślizg samochodu lub próbę

załadowania na lawetę w celu kradzieży samochodu. Bardzo ważnym zastosowaniem stanowiącym obecnie obowiązkowe wyposażenie każdego samochodu są systemy poduszek powietrznych. Bardzo duża wartość ujemnego przyspieszenia w chwili zderzenia samochodu z przeszkodą jest mierzona akcelerometrem, który inicjuje materiał wybuchowy poduszek powietrznych. Drgania instrumentów muzycznych zamieniane są na sygnał elektryczny za pomocą odpowiednio czułych akcelerometrów w układach tzw. *acoustic pickups*. Zastosowania akcelerometrów rosną z dnia na dzień, czemu sprzyja coraz niższa cena tych elementów. Również wielu elektroników amatorów stosuje je we własnych konstrukcjach. Stanowią również podstawę do wielu interesujących prac dyplomowych.

3. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

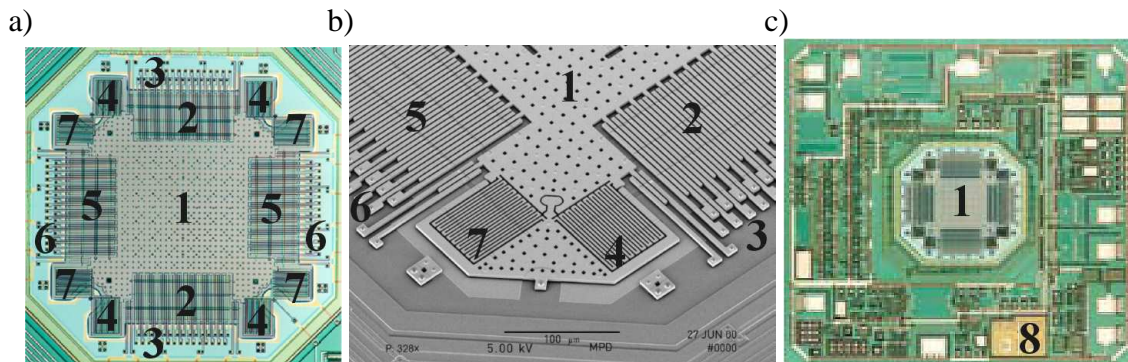
Stanowisko składa się z dwóch niezależnych części: stanowiska do pomiarów w stanie statycznym i stanowisko do pomiarów w stanie dynamicznym. Pomiary w stanie statycznym wykorzystują oddziaływanie grawitacyjne Ziemi na masę bezwładną czujnika, natomiast pomiary w stanie dynamicznym wykorzystują ruch harmoniczny membrany odpowiednio przystosowanego głośnika dużej mocy zasilanego napięciem sinusoidalnym. Na obu stanowiskach zastosowano ten sam typ czujnik: akcelerometr wykonany w technologii MEMS firmy Analog Devices typu ADXL 202EJ.

3.1. Akcelerometr *iMEMS*[®] typu ADXL202EJ Analog Devices

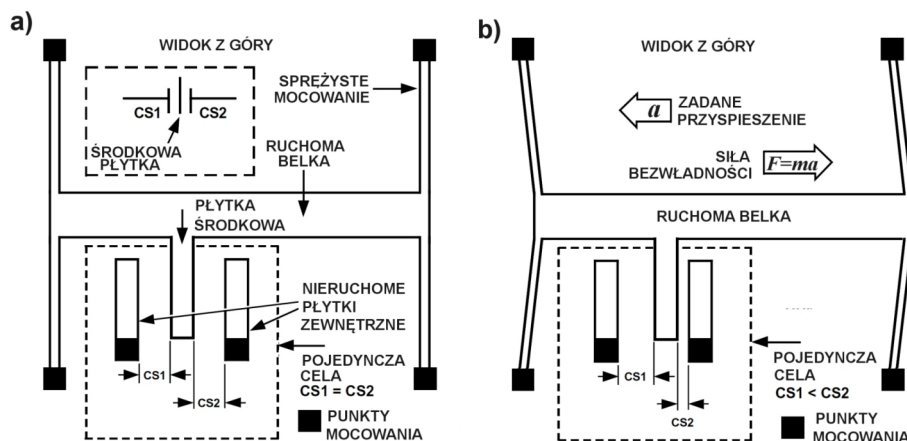
Akcelerometr typu ADXL 202EJ firmy Analog Devices wykonany jest w technologii *iMEMS*[®] (ang. *integrated micro-electro-mechanical system*) [1]. Symbol *iMEMS*[®] jest zastrzeżonym znakiem towarowym firmy Analog Devices [16], powszechnie jest jednak stosowany przez innych producentów skrót MEMS, czyli w tłumaczeniu na język polski: zintegrowane systemy mikro-elektro-mechaniczne. Układy realizowane w technologii MEMS zawierają pojedyncze elementy o rozmiarach od 1μm do 100μm, kompletne układy MEMS posiadają wymiary od 20 μm do kilku mm. Podstawową technologią stosowaną w produkcji układów MEMS jest głębokie trawienie krzemu. Stosuje się również litografię jonową, elektronową, promieniami X, epitaksję cienkich warstw i inne. Poza krzemem w układach MEMS stosuje się ceramikę, szkło, metale i polimery. Podstawową zaletą technologii MEMS jest możliwość integracji w jednym układzie, często na jednym kryształku krzemu, zarówno ruchomych elementów mechanicznych jak i układów elektronicznych: tranzystorów, wzmacniaczy itp. Dzięki temu można wyprodukować kompletny czujnik scalony razem z układami przetwarzania analogowego i cyfrowego [16-18].

Czujnik ADXL202JE jest akcelerometrem dwuosiowym o zakresie $\pm 2g$ w każdej osi. Uproszczoną konstrukcję czujnika ADXL202JE w jednej osi przedstawiono już wcześniej na Rys.10. Zastosowano koncepcję czujnika wieloosiowego z jedną masą sejsmiczną zgodnie z ideą przedstawioną na Rys. 16b. Szczegóły konstrukcji części mechanicznej czujnika ADXL202JE przedstawiono na Rys. 17. Masa sejsmiczna 1 ma kształt kwadratowej belki o boku 0,3mm i grubość 2μm, odległość między elektrodami kondensatora różnicowego 2 wynosi 1,3μm, długość elektrod kondensatora wynosi 125μm, całość części mechanicznej czujnika zajmuje obszar 0,8x0,8mm, kryształ krzemu na którym wykonany jest cały czujnik razem z częścią elektroniczną ma wymiary 2x2mm i jest zamknięty w ceramicznej obudowie o wielkości 5x5mm. Dzięki zawieszeniu belki 1 na niezależnych sprężynach 4 w osi X oraz 7 w osi Y, belka może jednocześnie przemieszczać się wzdłuż z każdej osi X, Y. Przesunięcie belki 1 jest mierzone w kierunku osi X kondensatorem różnicowym 2 i kierunku osi Y kondensatorem różnicowym 5. Zasadę działania pojedynczego kondensatora różnicowego przedstawiono na Rys. 18. Przy braku przyspieszenia belka zajmuje centralne położenie i obie

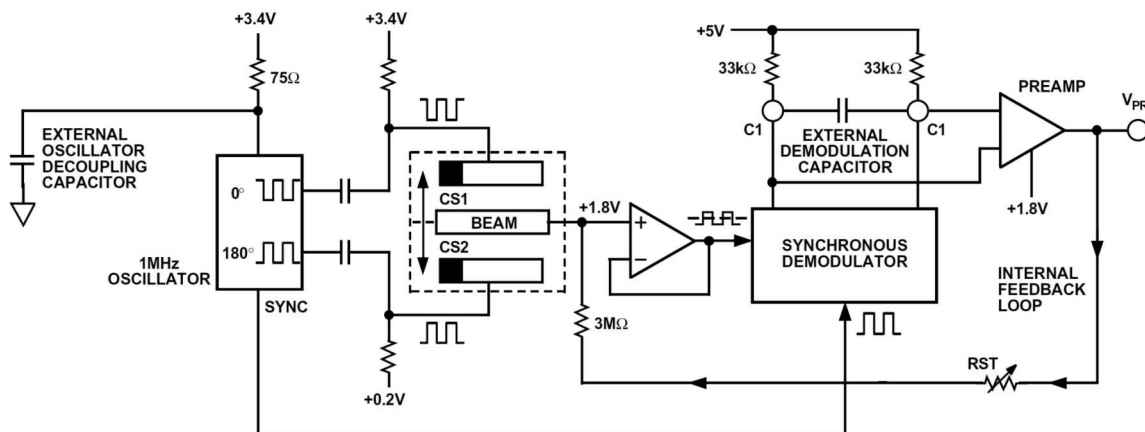
pojemności kondensatora różnicowego są sobie równe $cs_1=cs_2$, na środkowej elektrodzie napięcie jest równe zero. Siła bezwładności $F=ma$ proporcjonalna do przyspieszenia odkształca sprężyste zwieszenie i przesuwają belkę, co zmienia pojemności cs_1 i cs_2 kondensatora różnicowego i na wyjściu pojawia się napięcie przemienne. Schemat blokowy toru przetwarzania sygnału w jednym kanale czujnika przedstawiono na Rys. 19.



Rys. 17. Konstrukcja części mechanicznej akcelometru ADXL202JE, a) zdjęcie z mikroskopu optycznego całej części mechanicznej, b) zdjęcie z mikroskopu elektronowego kondensatorów różnicowych i sprężyn, c) zdjęcie całej struktury krzemowej czujnika, 1 - belka, 2 - kondensatory różnicowe w osi X, 3 - elektrody nieruchome w osi X, 4 - sprężyny w osi X, 5, 6, 7 - analogiczne elementy w osi Y, 8 - część elektroniczna czujnika

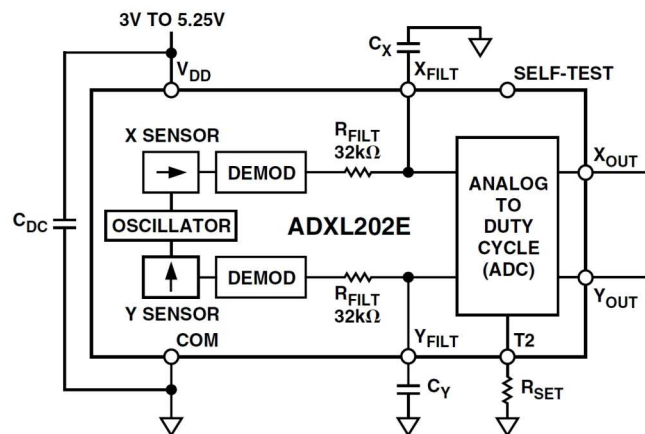


Rys. 18. Zasada działania pojedynczego kondensatora różnicowego akcelometru ADXL202JE dla jednej osi, łącznie w czujniku znajdują się cztery takie kondensatory



Rys. 19. Tor przetwarzania sygnału w jednej osi akcelometru ADXL202JE [16]

Na zewnętrzne nieruchome okładki kondensatora różnicowego podawane są przebiegi prostokątne przesunięte względem siebie o 180° . Napięcie z wewnętrznej ruchomej okładki kondensatora różnicowego po wzmocnieniu jest demodulowane synchronicznie w demodulatorze fazocułym, na wyjściu którego uzyskuje się napięcie proporcjonalne do przesunięcia belki. W czujniku ADXL202JE znajdują się dwa identyczne tory przetwarzania dla każdej z osi X, Y. Schemat blokowy czujnika przestawiono na Rys. 20. Wyjścia obu demodulatorów połączone są z wejściami modulatora PWM (ANALOG TO DUTY CYCLE – ADC) przez rezystory $32\text{k}\Omega$, których końce wyprowadzone są na zewnątrz układu. Dzięki takiemu rozwiązaniu, możliwe jest ograniczenie pasma pracy akcelerometru w zakresie $0,01\text{Hz}$ – 6kHz poprzez dołączenie do tych wyprowadzeń kondensatorów C_X i C_Y o odpowiedniej wartości pojemności. Ograniczenie pasma stosuje się w celu zwiększenia rozdzielczości pomiarowej i wyeliminowania zjawiska aliasingu. Na wyjściach X_{FILT} , Y_{FILT} dostępne są napięcia analogowe proporcjonalne do przyspieszenia w osiach X i Y. Dodatkowo napięcia te są zamieniane w modulatorze PWM na sygnały cyfrowe w standardzie TTL o wypełnieniu proporcjonalnym do przyspieszenia, które są dostępne na wyjściach X_{OUT} , Y_{OUT} . Możliwy jest dobór okresu przebiegu wyjściowego PWM w zakresie od $0,5\text{ms}$ do 10ms poprzez zmianę wartości rezystora R_{SET} , dołączonego do wyprowadzenia T2. Dzięki temu czujnik ADXL202JE można bardzo łatwo dołączyć praktycznie do dowolnego mikroprocesora wyposażonego w układ licznikowy [19].



Rys. 20. Schemat blokowy akcelerometru ADXL202JE [1]

W przypadku gdy na akcelerometr nie działa przyspieszenie, współczynnik wypełnienia przebiegu wyjściowego wynosi typowo 50%, a napięcie na wyjściach analogowych jest równe połowie napięcia zasilającego. Wartość przyspieszenia mierzona jest poprzez określenie aktualnego współczynnika wypełnienia sygnału PWM lub poprzez pomiar wartości napięcia sygnału analogowego na wyjściach X_{FILT} i Y_{FILT} , lub poprzez przetworzenie wyjściowego przebiegu PWM z wyjść X_{OUT} i Y_{OUT} na sygnał napięciowy, za pomocą dodatkowego dwójnika RC w układzie filtra dolnoprzepustowego.

Akcelerometr ADXL202JE może być zasilany napięciem o wartości od $+3\text{ V}$ do $+5,25\text{ V}$, pobierając przy tym prąd typowo o wartości $0,6\text{ mA}$. Nieliniowość charakterystyki przetwarzania wynosi typowo $0,2\%$ wartości zakresowej. Czułość sensora na wyjściach analogowych X_{FILT} i Y_{FILT} wynosi typowo 312 mV/g przy zasilaniu 5 V , a na wyjściach cyfrowych X_{OUT} i Y_{OUT} określana jest jako procent współczynnika wypełnienia i wynosi typowo $12,5\%/g$ przy zasilaniu 5 V . Pasma przenoszenia 3 dB czujnika wynosi 6 kHz , a częstotliwość rezonansowa sensora leży poza tym pasmem i wynosi 10 kHz . Podczas pracy czujnik wytrzymuje bez groźby uszkodzenia, przyspieszenia do $500g$ (wzdłuż dowolnej osi, o

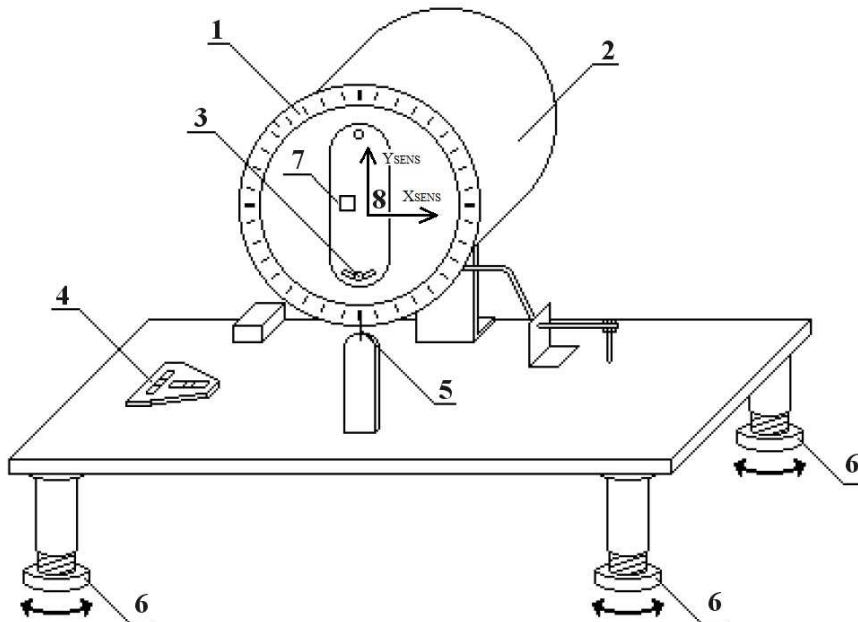
czasie działania krótszym, niż 0,5ms), a po odłączeniu zasilania maksymalnie do 1000g. Najważniejsze dane znamionowe czujnika ADXL202JE przestawiono w Tabeli A.

Tabela A. Dane znamionowe czujnika ADXL202JE [1]

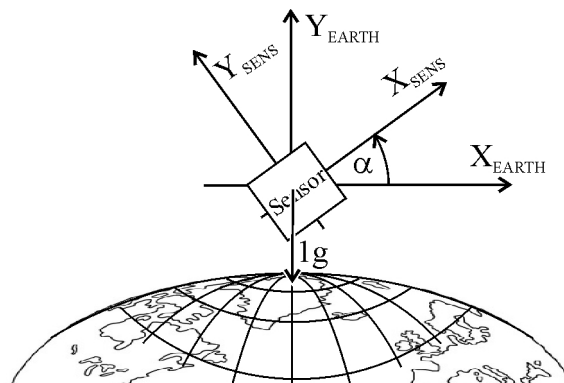
Parameter	Conditions	ADXL202JE			Unit
		Min	Typ	Max	
SENSOR INPUT	Each Axis				
Measurement Range ²		±2			g
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.2		% of FS
Alignment Error ³			±1		Degrees
Alignment Error	X Sensor to Y Sensor		0.01		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ⁴			±2		%
SENSITIVITY	Each Axis				
Duty Cycle per g	T1/T2, V _{DD} = 5 V	10.5	12.5	14.5	%/g
Duty Cycle per g	T1/T2, V _{DD} = 3 V	9.0	11	13.0	%/g
Sensitivity X _{FILT} , Y _{FILT}	V _{DD} = 5 V	265	312	360	mV/g
Sensitivity X _{FILT} , Y _{FILT}	V _{DD} = 3 V	140	167	195	mV/g
Temperature Drift ⁵	Delta from 25°C		±0.5		%
ZERO g BIAS LEVEL	Each Axis				
0 g Duty Cycle	T1/T2, V _{DD} = 5 V	34	50	66	%
0 g Duty Cycle	T1/T2, V _{DD} = 3 V	31	50	69	%
0 g Voltage X _{FILT} , Y _{FILT}	V _{DD} = 5 V	2.1	2.5	2.9	V
0 g Voltage X _{FILT} , Y _{FILT}	V _{DD} = 3 V	1.2	1.5	1.8	V
0 g Duty Cycle vs. Supply			1.0	4.0	%/V
0 g Offset vs. Temperature ⁵	Delta from 25°C		2.0		mg/°C
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density	@ 25°C		200		µg√Hz rms
FREQUENCY RESPONSE					
3 dB Bandwidth	At Pins X _{FILT} , Y _{FILT}		6		kHz
Sensor Resonant Frequency			10		kHz
FILTER					
R _{FILT} Tolerance	32 kΩ Nominal		±15		%
Minimum Capacitance	At Pins X _{FILT} , Y _{FILT}	1000			pF
SELF-TEST					
Duty Cycle Change	Self-Test "0" to "1"		10		%
DUTY CYCLE OUTPUT STAGE					
F _{SET}	R _{SET} = 125 kΩ	0.7		1.3	kHz
Output High Voltage	I = 25 µA	V _S - 200 mV			V
Output Low Voltage	I = 25 µA			200	mV
T2 Drift vs. Temperature			50		ppm/°C
Rise/Fall Time			200		ns
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range		3		5.25	V
Quiescent Supply Current			0.6	1.0	mA
Turn-On Time	C _{FILT} in µF		160 × C _{FILT} + 0.3		ms
TEMPERATURE RANGE					
Specified Performance AE					°C
Operating Range		0		70	°C

3.2. Stanowisko do pomiarów w stanie statycznym

Widok stanowiska do badania akcelometru w stanie statycznym przedstawiony jest na Rysunku 21. Badany czujnik 7 zamocowany jest na płytce PCB mocowanej nakrętką 3 wewnątrz bębna 2. Czujnik zasilany jest napięciem 5V z zasilacza sieciowego. Obracając bębnem 2 można regulować położenie osi X_{SENS} Y_{SENS} czujnika względem grawitacji Ziemi. Położenie osi X_{SENS} Y_{SENS} czujnika względem bębna 2 można ustalić na oznakowaniu 8. Kąt pochylenia czujnika α względem grawitacji Ziemi odczytuje się na skali kątomierza 1 przy pomocy wskazówki 5. Należy zwrócić uwagę na wykorzystanie odpowiedniej skali na kątomierzu. Kąt α jest zdefiniowany jako kąt mierzony od poziomej osi X_{EARTH} równoległej do horyzontu Ziemi w kierunku do osi X_{SENS} czujnika, zgodnie z zasadą przedstawioną na Rysunku 22. Przed pomiarami należy uzyskać poziome i stabilne ustawienie stanowiska regulując nóżkami 6 oraz posługując się poziomnicami 4. Część elektroniczna stanowiska wraz gniazdami przyłączeniowymi i zasilaczem sieciowym znajduje się w oddzielnej obudowie nie pokazanej na rysunku.



Rys. 21. Konstrukcja stanowiska do badania akcelometru w stanie statycznym: 1- skala kątomierza, 2- obrotowy bęben; 3- nakrętka motylkowa dociskająca płytkę PCB z akcelometrem, 4- poziomica dwukierunkowa, 5- wskazówka kątomierza, 6- regulowane nóżki podstawy, 7- akcelometr ADXL202JE, 8- oznakowanie osi X, Y akcelometru



Rys. 22. Zasada określania kąta pochylenia czujnika α względem grawitacji Ziemi

Wartości przyspieszenia a_X w działającego w kierunku osi X czujnika obliczamy według zależności funkcji sinus:

$$a_X = 1g \cdot \sin \alpha, \quad (26)$$

a wartości przyspieszenia a_Y w działającego w kierunku osi Y czujnika obliczamy według zależności funkcji cosinus:

$$a_Y = 1g \cdot \cos \alpha. \quad (27)$$

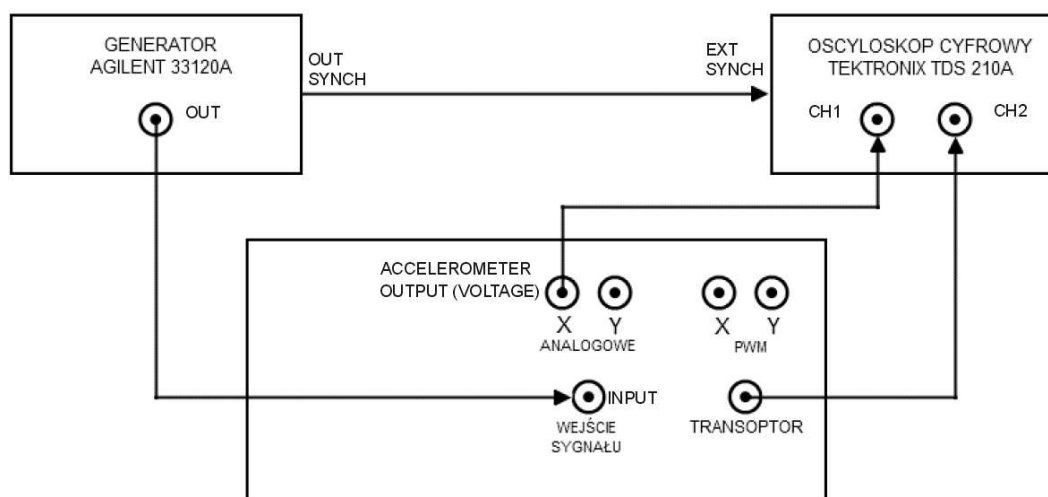
W celu obliczenia wartości przyspieszenia ziemskiego $1g$ panującego w laboratorium należy na podstawie mapy ustalić szerokość geograficzną oraz wysokość nad poziomem morza miejsca w którym wykonywane są pomiary. Wartość przyspieszenie ziemskiego $1g$ oblicza się ze wzoru:

$$1g \approx 9,780318(1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} h, \quad (28)$$

gdzie: φ - szerokość geograficzna, h - wysokość nad poziomem morza w metrach. Wynik obliczeń otrzymujemy w $m \cdot s^{-2}$.

3.3. Stanowisko do pomiarów w stanie dynamicznym

Widok stanowiska do badania akcelerometru w stanie dynamicznym przedstawiona jest na Rysunku 21. Wewnątrz widocznej na rysunku obudowy zainstalowany jest poziomo głośnik o mocy 10 W i impedancji 4 Ω , który jest zasilany jest ze wzmacniacza akustycznego odpowiedniej mocy. Badany akcelerometr ADXL202JE zamocowany jest pionowo na membranie głośnika. Oś X_{SENS} czujnika skierowana jest pionowo wzdłuż kierunku ruchu membrany. Wychylenie membrany zależy od amplitudy sygnału podanego na wejście wzmacniacza z dołączonego generatora sygnałowego. Aby nie przeciążyć głośnika nie należy przekraczać wartości sygnału z generatora 700mV. Do kontroli wychylenia membrany zastosowano transoptor szczelinowy. Sygnał wyjściowy z transoptora, zależny od wychylenia membrany, dostępny jest na gniazdku BNC zainstalowanym na obudowie stanowiska.



Rys. 23. Stanowisko do badania akcelerometru w stanie dynamicznym

W celu obliczenia amplitudy drgań membrany głośnika należy przyjąć stałą przetwarzania transoptora $k_t=0,2 \cdot 10^{-3} m/V$. W układzie pomiarowym dostępne są wyjścia sygnałów analogowych napięcia odpowiadające przyspieszeniu odpowiednio w osiach X i Y

oraz wyjścia PWM, na których wraz ze zmianą przyspieszenia można obserwować zmianę współczynnika wypełnienia sygnału. Dla przyspieszenia $0g$ napięcie na wyjściach analogowych wynosi katalogowo $2,5V$ a współczynnik wypełnienia sygnału PWM osiąga wartość 50% . Przy zmianie przyspieszenia o $1g$ napięcie ulega zmianie typowo o 322 mV a współczynnik wypełnienia o $12,5\%$ [1]. Do wyjścia napięciowego U_X czujnika w kanale X dołączony jest kanał CH1 oscyloskopu cyfrowego. Do wyjścia transoptora szczelinowego U_t mierzącego położenie membrany głośnika dołączony jest kanał CH2 oscyloskopu cyfrowego. Oscyloskop cyfrowy umożliwia pomiar napięć wyjściowych U_X z akcelerometru i U_t z transoptora szczelinowego. Dla zapewnienia stabilnej pracy oscyloskopu należy zastosować wyzwalanie zewnętrzny sygnałem synchronizacyjnym z generatora sygnałowego.

4. PROGRAM ĆWICZENIA

Program ćwiczenia obejmuje wykonanie następujących pomiarów:

1. wyznaczenie charakterystyki statycznej akcelerometru ADXL202JE w osi X,
2. wyznaczenie charakterystyki statycznej akcelerometru ADXL202JE w osi Y,
3. badanie akcelerometru ADXL202JE w osiach X, Y jako czujnika pochylenia,
4. badanie akcelerometru ADXL202JE w stanie dynamicznym przy stałej częstotliwości,
5. badanie akcelerometru ADXL202JE w stanie dynamicznym przy zmiennej częstotliwości.

4.1. Obliczenie przyspieszenia ziemskiego

Na podstawie mapy ustalić położenie geograficzne w miejscu wykonywania pomiarów oraz obliczyć wartość przyspieszenia ziemskiego $1g$ według zależności (28):

szerokość geograficzna	$\varphi = \dots\dots\dots$ stopni
długość geograficzna	$\lambda = \dots\dots\dots$ stopni
wysokość nad poziomem morza	$h = \dots\dots\dots$ m <i>n.p.m.</i>
przyspieszenie ziemskie	$1g = \dots\dots\dots$ $m \cdot s^{-2}$

4.2. Zestawienie wybranych parametrów badanego akcelerometru i aparatury

2.1. Na podstawie dokumentacji czujnika [1] oraz instrukcji do ćwiczenia ustalić (Tab. A) wybrane parametry czujnika i zapisać je w lewej części Tabeli 1. Prawą część tabeli należy uzupełnić po wykonaniu pomiarów. W polu Uwagi krótko skomentować parametry uzyskane z pomiarów w porównaniu do danych katalogowych. Zapisać odpowiednie wnioski w sprawozdaniu.

2.2. Zanotować typ i wykorzystywane zakresy przyrządów pomiarowych.

Multimetr cyfrowy typ:

Wybrany zakres pomiarowy:

Oscyloskop cyfrowy typ:

Podstawa czasu:

Czułość odchylenia pionowego:

Tabela 1. Wybrane dane katalogowe akcelerometru ADXL202JE i porównanie z wynikami pomiarów

Parametr		Dane katalogowe			Wartości zmierzone		Uwagi
Nazwa	Jed.	Min	Typ	Max	Kanał X	Kanał Y	
Napięcie zasilania	V						
Zakres pomiarów	$m \cdot s^{-2}$						
Czułość wyjścia napięciowego <i>Sensitivity</i> = $a_{1UX, Y}$	$mV/m \cdot s^{-2}$	---	---	---			
	$mV/1g$						
Poziom odniesienia dla przyspieszenia 0g <i>BiasLevel</i> = $a_{0UX, Y}$	mV						
Czułość wyjścia cyfrowego <i>Sensitivity</i> = $a_{1WX, Y}$	$\%/m \cdot s^{-2}$	---	---	---			
	$\%/1g$						
Poziom odniesienia dla przyspieszenia 0g <i>BiasLevel</i> = $a_{0WX, Y}$	%						
Błąd nieliniowości odniesiony do zakresu	%						
Błąd położenia osi XY	o						

4.3. Pomiary charakterystyki statycznej czujnika w kanale X

4.3.1. Zapoznać się z konstrukcją stanowiska do badania akcelerometru w stanie statycznym przedstawioną na Rysunku 21. Regulując nóżkami 6 uzyskać poziome ustawienie stanowiska posługując się poziomiami 4. Badany czujnik zamocowany jest na płytce 3 wewnątrz bębna 2. Obracając bębniem 2 sprawdzić położenie osi X_{SENS} Y_{SENS} czujnika względem grawitacji Ziemi odczytując kąt pochylenia czujnika α na kątomierzu przy pomocy wskazówki 5. Zwrócić uwagę na wykorzystanie odpowiedniej skali na kątomierzu. Kąt α jest zdefiniowany jako kąt mierzony od poziomej osi X_{EARTH} równoległej do horyzontu Ziemi w kierunku do osi X_{SENS} czujnika, zgodnie z zasadą przedstawioną na Rysunku 22.

4.3.2. Włączyć zasilanie stanowiska i przyrządów pomiarowych. Do wyjścia napięciowego U_X czujnika w kanale X dołączyć woltomierz napięcia stałego. Do wyjścia cyfrowego w kanale X dołączyć oscyloskop cyfrowy skonfigurowany do pomiaru czasu trwania stanu wysokiego T_{HX} sygnału cyfrowego oraz okresu tego sygnału T_X .

4.3.3. Wykonać pomiary napięcia wyjściowego czujnika U_X , czasu trwania stanu wysokiego T_{HX} sygnału cyfrowego oraz okresu tego sygnału T_X dla kąta pochylenia czujnika α w zakresie od -180° do $+180^\circ$ z krokiem 10° . Wyniki pomiarów notować w Tabeli 2.

4.3.4. Obliczyć w Tabeli 2 wartości przyspieszenia a_X w kierunku osi X czujnika według (29) oraz wypełnienie sygnału cyfrowego W_X według (30). Przedstawić na wykresach zależności $U_X=f(\alpha)$ oraz $W_X=f(\alpha)$, ocenić kształt uzyskanych wykresów i zapisać wnioski, czy są one zgodne z funkcją sinus.

$$a_X = 1g \cdot \sin \alpha \quad (29)$$

$$W_X = \frac{T_{HX}}{T_X} \cdot 100\% \quad (30)$$

4.3.5. Przedstawić na wykresach zależności $U_X=f(a_X)$ oraz $W_X=f(a_X)$, ocenić kształt uzyskanych wykresów i zapisać wnioski, czy przedstawiają one zależności liniowe. Na wykresach dodać linię trendu (linię prostą) z wyświetlaniem równania na wykresie. Odczytać z wykresów i zapisać w Tabeli 2 współczynnik kierunkowy a_{1UX} (uwaga na znak) i wyraz wolny a_{0UX} linii prostej aproksymującej napięcie wyjściowe U_X czujnika oraz współczynnik kierunkowy a_{1WX} i wyraz wolny a_{0WX} linii prostej aproksymującej współczynnik wypełnienia W_X sygnału cyfrowego czujnika.

4.3.6. Skopiować z Tabeli 2 do Tabeli 3 wartości a_X , U_X , W_X , a_{0UX} , a_{1UX} , a_{0WX} , a_{1WX} . Obliczyć zlinearyzowane wartości napięcia $U_{X \text{ LIN}}$ i wypełnienia $W_{X \text{ LIN}}$ według (31) i (32). Obliczyć względne błędy nieliniowości dla wyjścia napięciowego δU_X i dla wyjścia cyfrowego δW_X odniesione do pełnego zakresu pomiarowego według (33) i (34). Przedstawić obliczone błędy na wykresach $\delta U_X=f(a_X)$ oraz $\delta W_X=f(a_X)$.

$$U_{X \text{ LIN}} = a_{1UX} \cdot a_X + a_{0UX} \quad (31)$$

$$W_{X \text{ LIN}} = a_{1WX} \cdot a_X + a_{0WX} \quad (32)$$

$$\delta U_{X \text{ LIN}} = \frac{U_X - U_{X \text{ LIN}}}{|2g \cdot a_{1UX}|} \cdot 100\% \quad (33)$$

$$\delta W_{X \text{ LIN}} = \frac{W_X - W_{X \text{ LIN}}}{|2g \cdot a_{1WX}|} \cdot 100\% \quad (34)$$

4.3.7. Uzupełnić odpowiednie komórki Tabeli 1 wynikami obliczeń otrzymanymi na podstawie pomiarów w kanale X i porównać je z danymi katalogowymi czujnika.

4.4. Pomiary charakterystyki statycznej czujnika w kanale Y

4.4.1. Do wyjścia napięciowego U_Y czujnika w kanale Y dołączyć woltomierz napięcia stałego. Do wyjścia cyfrowego w kanale Y dołączyć oscyloskop cyfrowy skonfigurowany do pomiaru czasu trwania stanu wysokiego T_{HY} sygnału cyfrowego oraz okresu tego sygnału T_Y .

4.4.2. Wykonać pomiary napięcia wyjściowego czujnika U_Y , czasu trwania stanu wysokiego T_{HY} sygnału cyfrowego oraz okresu tego sygnału T_Y dla kąta pochylenia czujnika α w zakresie od -180° do $+180^\circ$ z krokiem 10° . Wyniki pomiarów notować w Tabeli 4.

4.4.3. Obliczyć w Tabeli 4 wartości przyspieszenia a_Y w kierunku osi Y czujnika według (35) oraz wypełnienie sygnału cyfrowego W_X według (36). Przedstawić na wykresach zależności $U_Y=f(\alpha)$ oraz $W_Y=f(\alpha)$, ocenić kształt uzyskanych wykresów i zapisać wnioski, czy są one zgodne z funkcją cosinus.

$$a_Y = 1g \cdot \cos \alpha \quad (35)$$

$$W_Y = \frac{T_{HY}}{T_Y} \cdot 100\% \quad (36)$$

4.4.4. Przedstawić na wykresach zależności $U_Y=f(a_Y)$ oraz $W_Y=f(a_Y)$, ocenić kształt uzyskanych wykresów i zapisać wnioski, czy przedstawiają one zależności liniowe. Na wykresach dodać linię trendu (linię prostą) z wyświetlaniem równania na wykresie. Odczytać z wykresów i zapisać w Tabeli 4 współczynnik kierunkowy a_{1UY} (uwaga na znak) i wyraz wolny a_{0UY} linii prostej aproksymującej napięcie wyjściowe U_Y czujnika oraz współczynnik kierunkowy a_{1WY} i wyraz wolny a_{0WY} linii prostej aproksymującej współczynnik wypełnienia W_Y sygnału cyfrowego czujnika.

4.4.5. Skopiować z Tabeli 4 do Tabeli 5 wartości a_Y , U_Y , W_Y , a_{0UY} , a_{1UY} , a_{0WY} , a_{1WY} . Obliczyć zlinearyzowane wartości napięcia $U_{Y\text{ LIN}}$ i wypełnienia $W_{Y\text{ LIN}}$ według (37) i (38). Obliczyć względne błędy nieliniowości dla wyjścia napięciowego δU_Y i dla wyjścia cyfrowego δW_Y odniesione do pełnego zakresu pomiarowego według (39) i (40). Przedstawić obliczone błędy na wykresach $\delta U_Y=f(a_Y)$ oraz $\delta W_Y=f(a_Y)$.

$$U_{Y\text{ LIN}} = a_{1UY} \cdot a_Y + a_{0UY} \quad (37)$$

$$W_{Y\text{ LIN}} = a_{1WY} \cdot a_Y + a_{0WY} \quad (38)$$

$$\delta U_{Y\text{ LIN}} = \frac{U_Y - U_{Y\text{ LIN}}}{|2g \cdot a_{1UY}|} \cdot 100\% \quad (39)$$

$$\delta W_{Y\text{ LIN}} = \frac{W_Y - W_{Y\text{ LIN}}}{|2g \cdot a_{1WY}|} \cdot 100\% \quad (40)$$

4.4.6. Uzupełnić odpowiednie komórki Tabeli 1 wynikami obliczeń otrzymanymi na podstawie pomiarów w kanale Y i porównać je z danymi katalogowymi czujnika.

4.5. Badanie akcelerometru w kanałach XY jako czujnika pochylenia

4.5.1. Do wyjść cyfrowych czujnika w kanałach X, Y dołączyć dwukanałowy oscyloskop cyfrowy skonfigurowany do pomiaru współczynników wypełnienia W_X i W_Y sygnałów cyfrowych.

4.5.2. Wykonać pomiary współczynników wypełnienia W_X i W_Y wyjściowych sygnałów cyfrowych czujnika dla kąta pochylenia czujnika α w zakresie od -180° do $+180^\circ$ z krokiem 10° . Wyniki pomiarów notować w Tabeli 6. Pomiary współczynników wypełnienia W_X i W_Y należy wykonywać jednocześnie dla każdej kolejnej ustawionej wartości kąta pochylenia α .

4.5.3. Na podstawie zmierzonych współczynników wypełnienia W_X , W_Y obliczyć w Tabeli 6 wartości przyspieszeń a_{WX} , a_{WY} według (41), (42) oraz wartość zmierzonego przyspieszenia ziemskiego g_{XY} (43). Przedstawić na wykresach zależności $a_{WX}=f(\alpha)$ oraz $a_{WY}=f(\alpha)$, ocenić kształt uzyskanych wykresów i zapisać wnioski, czy są one zgodne odpowiednio z funkcjami sinus i cosinus według zależności (29) i (35).

$$a_{WX} = \frac{W_X - a_{0WX}}{a_{1WX}} \quad (41)$$

$$a_{WY} = \frac{W_Y - a_{0WY}}{a_{1WY}} \quad (42)$$

$$g_{XY} = \sqrt{a_{WX}^2 + a_{WY}^2} \quad (43)$$

4.5.4. Wykonać wykres $a_{WY}=f(a_{WX})$. Zwrócić uwagę, aby obie osie miały ten sam zakres wartości $\pm 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ oraz taką samą długość geometryczną. Ocenić, czy wyniki pomiarów leżą na okręgu o promieniu równym $1g$. Zapisać odpowiedni wniosek do sprawozdania.

4.5.5. Na podstawie zmierzonych przyspieszeń a_{WX} , a_{WY} obliczyć w Tabeli 6 zmierzony czujnikiem w kanale X kąt pochylenia α_X według (44) oraz w kanale Y kąt α_Y według (45). Obliczyć błędy bezwzględne $\Delta\alpha_X$, $\Delta\alpha_Y$ (w stopniach) zmierzonych czujnikiem kątów pochylenia z kanałów X i Y według (46), (47). Zwrócić uwagę, w jakim zakresie kątów α otrzymuje się małe błędy dla kanału X, a jakim zakresie dla kanału Y? Wyjaśnić, dlaczego uzyskuje się w pewnych przedziałach kątów bardzo duże wartości błędów? Zapisać odpowiednie wnioski w sprawozdaniu.

$$\alpha_X = \arcsin \frac{a_{WX}}{g_{XY}} \quad (44)$$

$$\alpha_Y = \arccos \frac{a_{WY}}{g_{XY}} \quad (45)$$

$$\Delta\alpha_X = \alpha_X - \alpha \quad (46)$$

$$\Delta\alpha_Y = \alpha_Y - \alpha \quad (47)$$

4.5.6. Przedstawić obliczone błędy $\Delta\alpha_X$, $\Delta\alpha_Y$ na wykresach $\Delta\alpha_X=f(\alpha)$ dla kątów $-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ$ oraz $\Delta\alpha_Y=f(\alpha)$ dla kątów $0^\circ \leq \alpha \leq +180^\circ$. Uzupełnić odpowiednie komórki Tabeli 1 wynikami obliczeń błędów otrzymanymi na podstawie pomiarów w kanałach X i Y i porównać je z danymi katalogowymi czujnika.

4.5.7. Przedstawić obliczone błędy $\Delta\alpha_X$, $\Delta\alpha_Y$ na wspólnym wykresie $\Delta\alpha_X=f(\alpha)$, $\Delta\alpha_Y=f(\alpha)$ dla kątów $-180^\circ \leq \alpha \leq +180^\circ$. Zwrócić uwagę w jakich przedziałach kątów α błędy $\Delta\alpha_X$, $\Delta\alpha_Y$ osiągają małe wartości i dlaczego? Zapisać odpowiednie wnioski w sprawozdaniu.

4.6. Badania akcelerometru w stanie dynamicznym przy stałej częstotliwości

4.4.6.1. Zapoznać się z konstrukcją stanowiska do badania akcelerometru w stanie dynamicznym przedstawioną na Rysunku 23. Włączyć zasilanie stanowiska i przyrządów pomiarowych. Do wyjścia napięciowego U_X czujnika w kanale X dołączyć kanał CH1 oscyloskopu cyfrowego. Do wyjścia transoptora szczelinowego U_t mierzącego położenie membrany głośnika dołączyć kanał CH2 oscyloskopu cyfrowego. Ustawić na generatorze sygnał sinusoidalny o częstotliwości $f_g=50\text{Hz}$ i amplitudzie $U_{gmax}=100\text{mV}$. Oscyloskop cyfrowy skonfigurować w obu kanałach do pomiaru wartości skutecznej napięć U_X i U_t .

4.6.2. Dla stałej częstotliwości $f_g=50\text{Hz}$ zmierzyć wartość skuteczną napięcia wyjściowego czujnika U_X i transoptora U_t dla amplitudy napięcia z generatora U_{gmax} od 50mV do 700mV z krokiem 50mV . Wyniki notować w Tabeli 7.

4.6.3. Obliczyć w Tabeli 7 amplitudę drgań membrany głośnika X_{max} według (48) oraz amplitudę przyspieszenia A_{max} (49), przyjmując stałą przetwarzania transoptora $k_t=0,2 \cdot 10^{-3}\text{m/V}$. Należy zwrócić uwagę, że dla wygody, w Tabeli 7 napięcia są zapisywane w mV , amplituda drgań w milimetrach, a przyspieszenie w m/s^2 , natomiast do wzorów wszystkie wartości należy podstawiać w jednostkach układu SI. Należy koniecznie oceniać na bieżąco sensowność otrzymywanych wyników obliczeń!

$$X_{\max} = \sqrt{2} \cdot k_t \cdot U_t \quad (48)$$

$$A_{\max} = \omega_g^2 X_{\max} = (2 \pi f_g)^2 X_{\max} \quad (49)$$

4.6.4. Na podstawie zmierzonego napięcia wyjściowego czujnika U_X obliczyć amplitudę przyspieszenia $A_{X_{\max}}$ według (50). Wartość współczynnika a_{1U_X} pobrać z Tabeli 2. Obliczyć względny błąd δA (w procentach) zmierzonej amplitudy przyspieszenia $A_{X_{\max}}$ według (51).

$$A_{X_{\max}} = \sqrt{2} \frac{U_X}{|a_{1U_X}|} \quad (50)$$

$$\delta A = \frac{A_{X_{\max}} - A_{\max}}{A_{\max}} \cdot 100\% \quad (51)$$

4.6.5. Wykonać wykres $X_{\max}=f(U_g)$, dodać do wykresu linię trendu i ocenić liniowość zależności amplitudy drgań X_{\max} od napięcia z generatora U_g . Wykonać wykres $A_{X_{\max}}=f(X_{\max})$, dodać do wykresu linię trendu i ocenić liniowość zależności amplitudy przyspieszenia $A_{X_{\max}}$ od amplitudy drgań X_{\max} . Porównać zmierzoną czujnikiem wartość amplitudy przyspieszenia $A_{X_{\max}}$ (50) z wartością obliczoną A_{\max} (49). Zapisać wnioski do sprawozdania.

4.7. Badania akcelerometru przy stałej amplitudzie drgań

4.7.1. W układzie jak punkcie 4.6 zmierzyć wartość skuteczną napięcia wyjściowego czujnika U_X dla stałej amplitudy drgań, zmieniając częstotliwości f_g od 20Hz do 50Hz co 5Hz i dalej co 10Hz aż do 130Hz. Dla każdej ustawionej częstotliwości f_g dobrać tak napięcie na generatorze, aby utrzymywać stałą wartość napięcia wyjściowego z transoptora $U_t=100\text{mV}$. Zwrócić uwagę na zjawisko rezonansu przy częstotliwości ok. 35Hz. Wyniki notować w Tabeli 8.

4.7.2. Podobnie jak w punkcie 4.6, obliczyć w Tabeli 8 amplitudę drgań membrany głośnika X_{\max} według (48) oraz amplitudę przyspieszenia A_{\max} (49), przyjmując stałą przetwarzania transoptora $k_t=0,2 \cdot 10^{-3}\text{m/V}$. Na podstawie zmierzonego napięcia wyjściowego czujnika U_X obliczyć amplitudę przyspieszenia $A_{X_{\max}}$ według (50). Wartość współczynnika a_{1U_X} pobrać z Tabeli 2.

4.7.3. Wykonać wykres $A_{X_{\max}}=f(f_g)$ i ocenić czy uzyskano kwadratową zależność przyspieszenia od częstotliwości, zgodnie z zależnościami (8), (9), (49). Aby lepiej ocenić zgodność z teoretyczną zależnością wykonać wykres $A_{X_{\max}}=f(f_g^2)$, dodać do wykresu linię trendu i ocenić liniowość otrzymanej zależności przyspieszenia od kwadratu częstotliwości. Porównać zmierzoną czujnikiem wartość amplitudy przyspieszenia $A_{X_{\max}}$ (50) z wartością obliczoną A_{\max} (49). Zapisać wnioski do sprawozdania.

Tabela 2. Charakterystyka przetwarzania akcelerometru ADXL202JE w kanale X

lp.	α	a_X	U_X	T_{HX}	T_X	W_X
	°	$m \cdot s^{-2}$	mV	μs	μs	%
1	-180					
2	-170					
3	-160					
4	-150					
5	-140					
6	-130					
7	-120					
8	-110					
9	-100					
10	-90					
11	-80					
12	-70					
13	-60					
14	-50					
15	-40					
16	-30					
17	-20					
18	-10					
19	0					
20	10					
21	20					
22	30					
23	40					
24	50					
25	60					
26	70					
27	80					
28	90					
29	100					
30	110					
31	120					
32	130					
33	140					
34	150					
35	160					
36	170					
37	180					

a_{0UX}		mV	a_{0WX}		%
a_{1UX}		$mV/m \cdot s^{-2}$	a_{1WX}		$\%/m \cdot s^{-2}$

Tabela 3. Błędy nieliniowości akcelerometru ADXL202JE w kanale X

lp.	a_X $m \cdot s^{-2}$	U_X mV	$U_{X\text{LIN}}$ mV	δU_X %	W_X %	$W_{X\text{LIN}}$ %	δW_X %
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							

a_{0UX}		mV	a_{0WX}		%
a_{1UX}		$mV/m \cdot s^{-2}$	a_{1WX}		$\%/m \cdot s^{-2}$

Tabela 4. Charakterystyka przetwarzania akcelerometru ADXL202JE w kanale Y

lp.	α	a_Y	U_Y	T_{HY}	T_Y	W_Y
	$^\circ$	$m \cdot s^{-2}$	mV	μs	μs	%
1	-180					
2	-170					
3	-160					
4	-150					
5	-140					
6	-130					
7	-120					
8	-110					
9	-100					
10	-90					
11	-80					
12	-70					
13	-60					
14	-50					
15	-40					
16	-30					
17	-20					
18	-10					
19	0					
20	10					
21	20					
22	30					
23	40					
24	50					
25	60					
26	70					
27	80					
28	90					
29	100					
30	110					
31	120					
32	130					
33	140					
34	150					
35	160					
36	170					
37	180					

a_{0UY}		mV	a_{0WY}		%
a_{1UY}		$mV/m \cdot s^{-2}$	a_{1WY}		$\%/m \cdot s^{-2}$

Tabela 5. Błędy nieliniowości akcelerometru ADXL202JE w kanale Y

lp.	a_Y $m \cdot s^{-2}$	U_Y mV	$U_{Y\text{LIN}}$ mV	δU_Y %	W_Y %	$W_{Y\text{LIN}}$ %	δW_Y %
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							

a_{0UY}		mV	a_{0WY}		%
a_{1UY}		$mV/m \cdot s^{-2}$	a_{1WY}		$\%/m \cdot s^{-2}$

Tabela 6. Badanie akcelerometru ADXL202JE w kanałach X-Y jako czujnika kąta pochylenia

lp.	α	W_X	W_Y	a_{WX}	a_{WY}	g_{XY}	α_X	α_Y	$\Delta\alpha_X$	$\Delta\alpha_Y$
	°	%	%	$m \cdot s^{-2}$	$m \cdot s^{-2}$	$m \cdot s^{-2}$	°	°	°	°
1	-180									
2	-170									
3	-160									
4	-150									
5	-140									
6	-130									
7	-120									
8	-110									
9	-100									
10	-90									
11	-80									
12	-70									
13	-60									
14	-50									
15	-40									
16	-30									
17	-20									
18	-10									
19	0									
20	10									
21	20									
22	30									
23	40									
24	50									
25	60									
26	70									
27	80									
28	90									
29	100									
30	110									
31	120									
32	130									
33	140									
34	150									
35	160									
36	170									
37	180									

a_{0WX}		%	a_{0WY}		%
a_{1WX}		$\%/m \cdot s^{-2}$	a_{1WY}		$\%/m \cdot s^{-2}$

Tabela 7. Badanie akcelerometru ADXL202JE w stanie dynamicznym przy stałej częstotliwości drgań $f_g=50\text{Hz}$

lp.	U_g	U_t	X_{\max}	A_{\max}	U_X	$A_{X\max}$	δA
	mV	mV	mm	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	mV	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	%
1	50						
2	100						
3	150						
4	200						
5	250						
6	300						
7	350						
8	400						
9	450						
10	500						
11	550						
12	600						
13	650						
14	700						

a_{1UX}		$\text{mV}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	k_t	$0,2\cdot 10^{-3}$	m/V
-----------	--	----------------------------------------	-------	--------------------	-----

Tabela 8. Badanie akcelerometru ADXL202JE w stanie dynamicznym przy stałej amplitudzie drgań

lp.	f_g	f_g^2	U_t	X_{\max}	A_{\max}	U_X	$A_{X\max}$
	Hz	Hz^2	mV	mm	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	mV	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
1	20						
2	25						
3	30						
4	35						
5	45						
6	50						
7	60						
8	70						
9	80						
10	90						
11	100						
12	110						
13	120						
14	130						

a_{1UX}		$\text{mV}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	k_t	$0,2\cdot 10^{-3}$	m/V
-----------	--	----------------------------------------	-------	--------------------	-----

4.5. Opracowanie wyników i przygotowanie sprawozdania

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- tabele z wynikami pomiarów i obliczeń,
- wzory obliczeniowe i przykładowe obliczenia,
- wykresy wyznaczonych charakterystyk przetwarzania i błędów,
- zestawienie parametrów katalogowych i zmierzonych badanych przetworników,

- wnioski z przeprowadzonych pomiarów, szczególnie należy zwrócić uwagę na porównanie uzyskanych wyników z informacjami podanymi w dokumentacji producentów. Porównać i skomentować wartości zapisane w Tab. 1.

6. LITERATURA

1. ADXL202E Data Sheet, Low-Cost 2 g Dual-Axis Accelerometer with Duty Cycle Output, Analog Devices, Inc., (2000).
2. Miłek M.: Metrologia elektryczne wielkości nieelektrycznych, Wyd. Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2006.
3. Joydeep Basu, Pradip Mandal, Prasanta Kumar Guha, A Review of Micromachined Thermal Accelerometers Rahul Mukherjee, Journal of Micromechanics and Microengineering 27 (12), November (2017).
4. Harvey Weinberg and Christophe Lemaire, Using the ADXL202 accelerometer as a multifunction sensor (tilt, vibration, and shock) in car alarms, Technical 8/27/98 Rev. A, Analog Devices, Inc. (1998.)
5. Peter Shih, Harvey Weinberg, A Useful Role for the ADXL202 Dual-Axis Accelerometer in Speedometer-Independent Car-Navigation Systems, Analog Dialogue 35-04 (2001).
6. Bosch R.: Czujniki w pojazdach samochodowych, WkiŁ2009.
7. Gajek a., Juda Z.: Czujniki, WkiŁ, Warszawa 2009.
8. Adam S. Champy, Elements of Motion: 3D Sensors in Intuitive Game Design, Analog Dialogue Volume 41 Number 2 (2007).
9. Christopher J. Fisher, Using an Accelerometer for Inclination Sensing, AN-1057 Application Note, Analog Devices, Inc. (2010).
10. Rodger Richey, Measure Tilt Using PIC16F84A & ADXL202, AN715 Application Note, Microchip Technology Inc., (1999).
11. Mark Pedley, Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer, AN3461 Application Note, Freescale Semiconductor, Inc., Rev. 6, 03/2013.
12. Wenshuai Liao, Yiming Zhao, Using Dual-Axis Accelerometers to Protect Hard Disk Drives, Analog Dialogue 39-11, November (2005).
13. Harvey Weinberg, Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications, AN-602 Application Note, Analog Devices, Inc. (2002).
14. Rob O'Reilly, Alex Khenkin, and Kieran Harney, Sonic Nirvana: Using MEMS Accelerometers as Acoustic Pickups in Musical Instruments, Analog Dialogue 43-02, February (2009).
15. Klub Konstruktorów: Półprzewodnikowe czujniki przyspieszenia część 1, część 2, Elektronika dla Wszystkich, nr 2/99, 3/99, Wyd. AVT, (1999).
16. Bill Riedel, A surface-micromachined, monolithic accelerometer, Analog Dialogue Volume 27 Number 2 (1993).
17. Howard Samuels, Single- and Dual-Axis Micromachined Accelerometers , Analog Dialogue 30 Number 4 (1996).
18. Harvey Weinberg, Dual Axis, Low g, Fully Integrated Accelerometers, Analog Dialogue 33 Number 1 (1999).dsw
19. Harvey Weinberg, Using the ADXL202 Duty Cycle Output, AN-604 Application Note, Analog Devices, Inc.