

Sensory w Aplikacjach Wbudowanych

Przegląd nowoczesnych czujników:
1- cz. pojemnościowe,
cz. przyspieszenia liniowego i kąтового

dr hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH

(na bazie materiałów dra inż. Wojciech Maziarz)

Wydział IET, Instytut Elektroniki

Kontakt: worek@agh.edu.pl

Przegląd czujników

Cz. 1

Czujniki pojemnościowe

Czujniki przyspieszenia (akcelerometry)

Cz.2

Czujniki żyroskopowe

Cz. 3

Czujniki ciśnienia

Czujniki gazu

Mikrofony półprzewodnikowe

Czujniki magnetyczne

Czujnik pojemnościowy

Czujniki tego typu mogą wykrywać wiele wielkości:

- bezpośrednio: ruch, skład chemiczny, pole elektryczne
- pośrednio: wiele innych wielkości, które można zamienić na ruch lub zmiany stałej dielektrycznej, np. ciśnienie, przyspieszenie, poziom płynu, skład płynu, itp.

Są zbudowane z elektrod przewodzących oraz dielektryka.

Obwód detekcyjny przetwarza zmiany C na U , f lub wypełnienie sygnału (PWM).

Mają ogromną ilość zastosowań w czujnikach różnych wielkości.

Nowoczesne czujniki pojemnościowe

Zastosowania do pomiaru:

- **ciśnienia** – membrana o określonym ugięciu zmienia swoją pojemność
- **przepływu** – po konwersji na ciśnienie lub przemieszczenie – pomiar strumienia objętości (np. ze zwężką) lub masy (efekt Coriolisa) - czujnik pojemnościowy mierzy wynikowe przemieszczenie
- **poziomu płynów** – poprzez pomiar zmian pojemności płyt przewodzących zanurzonych w cieczy
- **zbliżenia/odległości/przemieszczenia**
- **matrycowy czujnik położenia** – zbudowany z wielu „adresowalnych” czujników; można mierzyć powierzchnie przewodzące i dielektryczne
- **grubość** - dla znanej stałej dielektrycznej (ew. pomiar stałej dielektrycznej, gdy znana grubość)
- **oblodzenie** – na skrzydłach samolotu zamontowane izolowane, metalowe paski
- **pomiar kąta i pozycji**
- **ściemniacze**
- **wyłączniki /styczniki blokujące** (wykorzystanie pojemności między palcami)
- **ekrany dotykowe** itd.

Nowoczesne czujniki pojemnościowe

- **Detektory ruchu:** wykrywanie przemieszczeń rzędu 10^{-14} m z dobrą stabilnością, szybkością, w różnych środowiskach;
- czujniki z dużymi elektrodami mogą wykrywać np. pojazdy i określać ich prędkość

Technologia pojemnościowa wypiera czujniki piezorezystancyjne w krzemowych wykonaniach **czujników przyspieszenia i ciśnienia**.

Nowoczesne zastosowania czujników - **czujniki odcisków palców i podczerwieni** – wymiar C rzędu μm , pojemność 10 fF, rozdzielczość do 5 aF (10^{-18} F)

Inne ciekawe zastosowania:

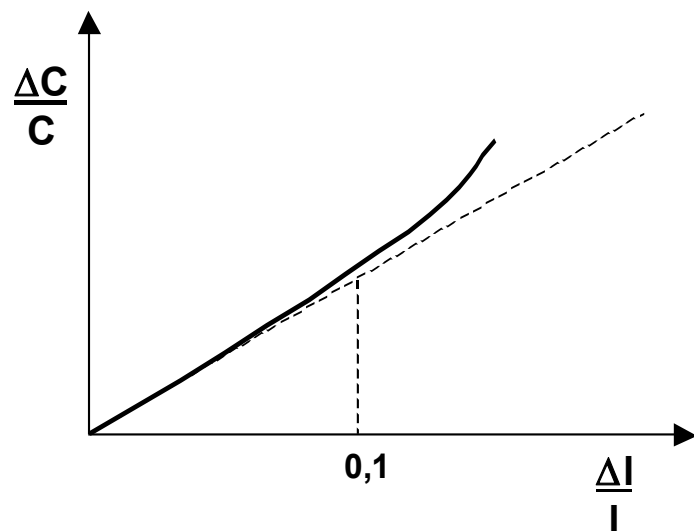
- w rafineriach olejów do pomiaru zawartości wody w oleju,
- w silosach do pomiaru wilgotności zboża,
- kontrola położenia kursora w laptopach (2D),
- matryce pojemnościowe na wyświetlaczach/ekranach dotykowych

Czujnik pojemnościowy



Kondensator płaski

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A / l$$



$$\epsilon_r = k$$

- w próżni 1
- w powietrzu 1,0006
- oleje, plastiki 3-6
- ciecze polarne >50

Przykład:

- $A = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$
- $l = 1 \text{ mm}$
- próżnia ($\epsilon_r = 1$)
- $C = 88.54 \text{ pF}$

Czułość:

$$dC/dl = - \epsilon_0 \epsilon_r A / l^2, \text{ zmienia się wraz z } l$$

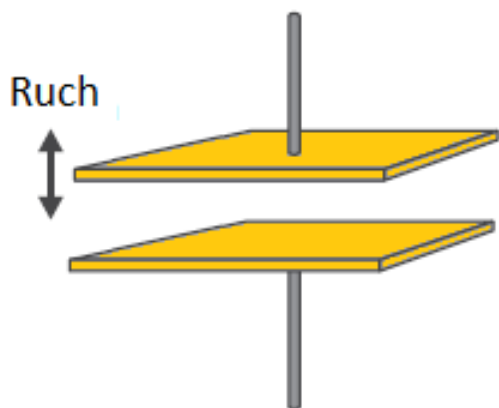
$$dC/C = - dl/l, \text{ duża czułość wzgl. dla małych } l$$

Stąd konieczność małych l aż do przebicia...

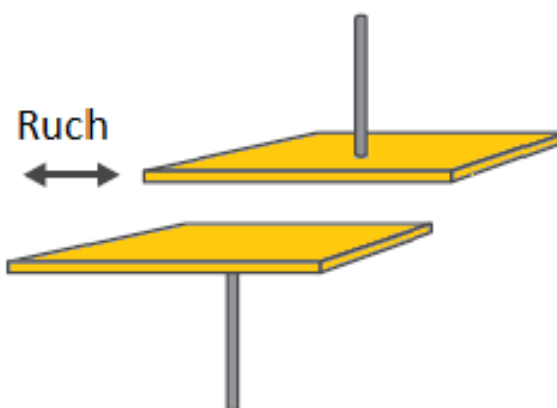
→ nadają się technologie MEMS

Czujnik pojemnościowy – konfiguracje pracy

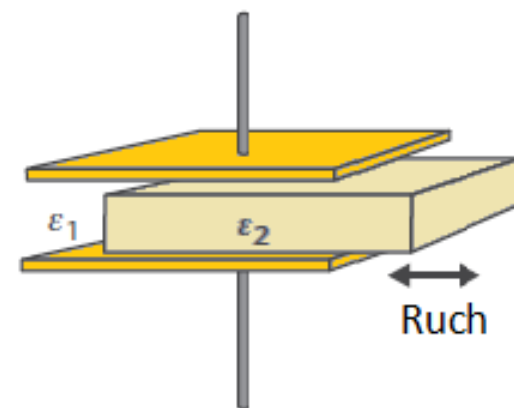
ZASADA DZIAŁANIA: przemieszczenie ruchomej masy pod wpływem przyśpieszenia → zmiana C (cz. pojemnościowe)



Ruchoma
okładzina (zmiana l)



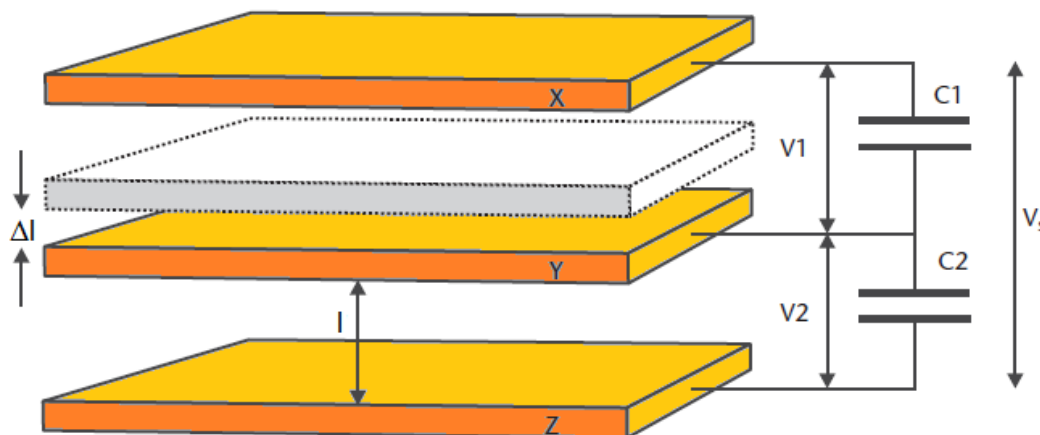
Zmienna
powierzchnia
(zmiana A)



Ruchomy
dielektryk (zmiana ϵ)

Konfiguracje pracy prostych czujników pojemnościowych

Czujnik pojemnościowy wykorzystujący kondensator różnicowy



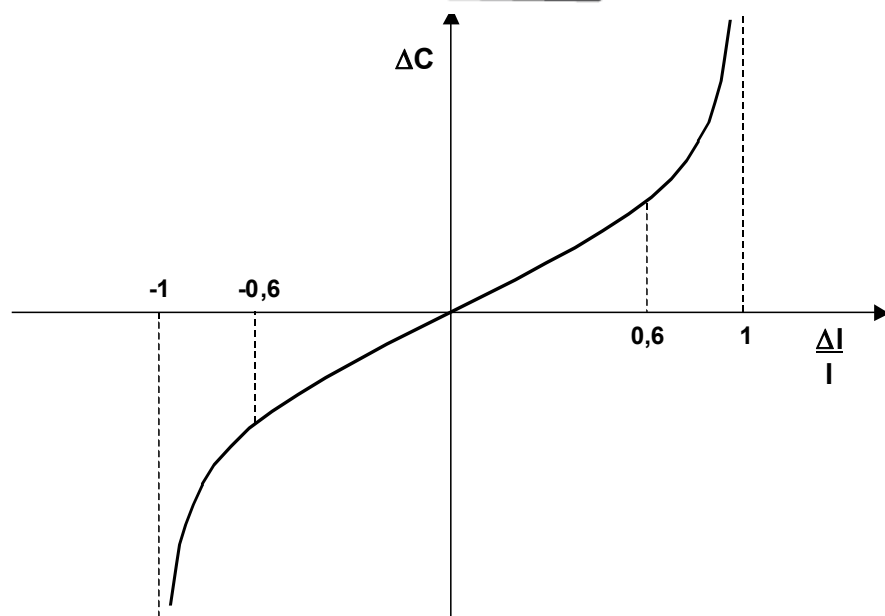
$$\Delta C = C_2 - C_1 = \epsilon_0 \epsilon_r A \cdot 2\Delta l / (l^2 - \Delta l^2)$$

dla $\Delta l \ll l$

$$\Delta C = \epsilon_0 \epsilon_r A \cdot 2\Delta l / l^2, \text{ stąd}$$

$$\Delta C / C = 2\Delta l / l$$

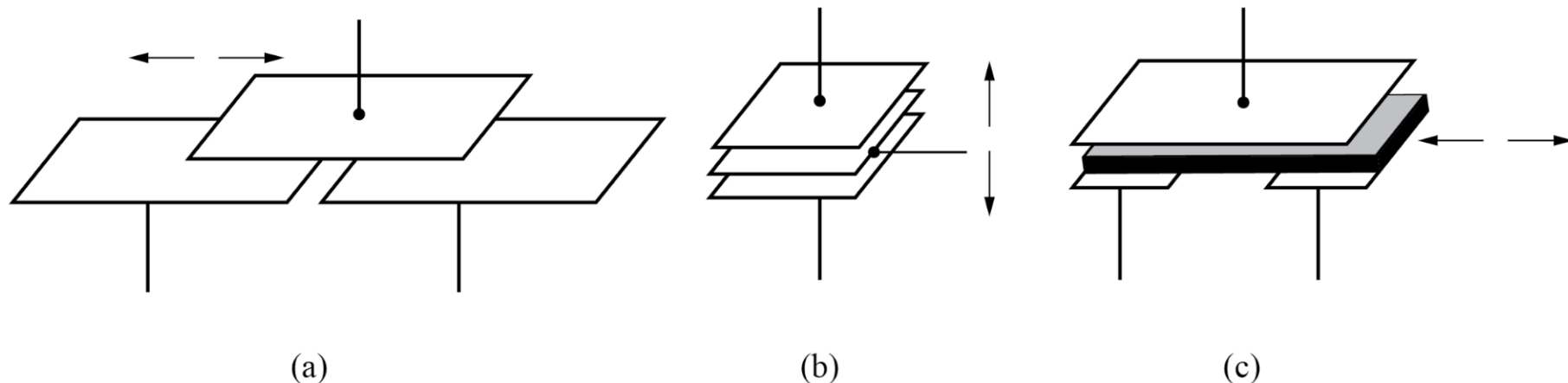
$$V_2 - V_1 = V_s (\Delta l / l)$$



Uzyskuje się zwiększoną
czułość i liniowość.

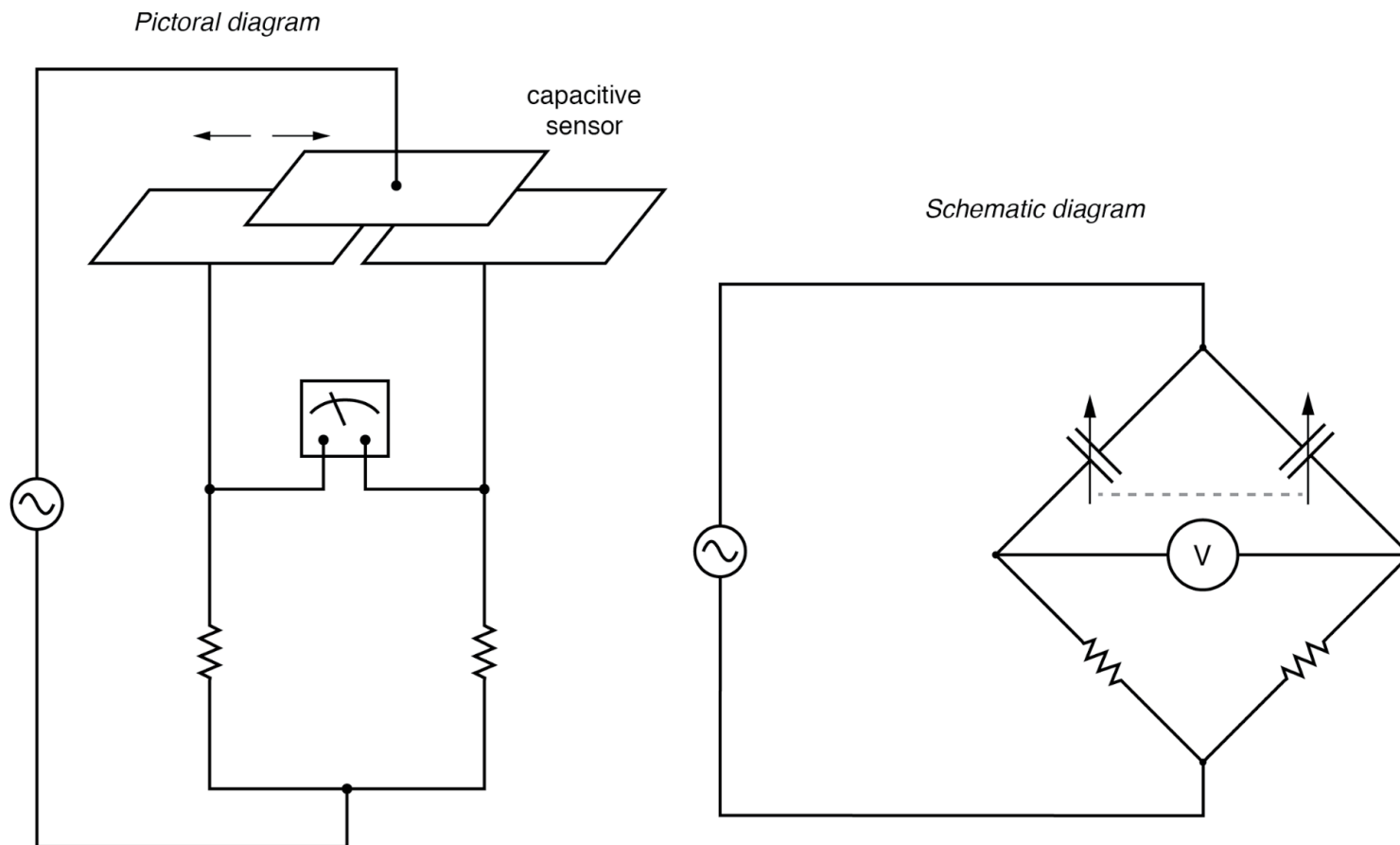
Ponadto różnicowy tryb pracy
zapewnia zmniejszenie uchybu
temperaturowego i
spowodowanego zmianą ϵ .

Czujnik pojemnościowy wykorzystujący kondensator różnicowy



*Differential capacitive transducer varies capacitance ratio by changing:
(a) area of overlap, (b) distance between plates, (c) dielectric between
plates.*

Czujnik pojemnościowy wykorzystujący kondensator różnicowy



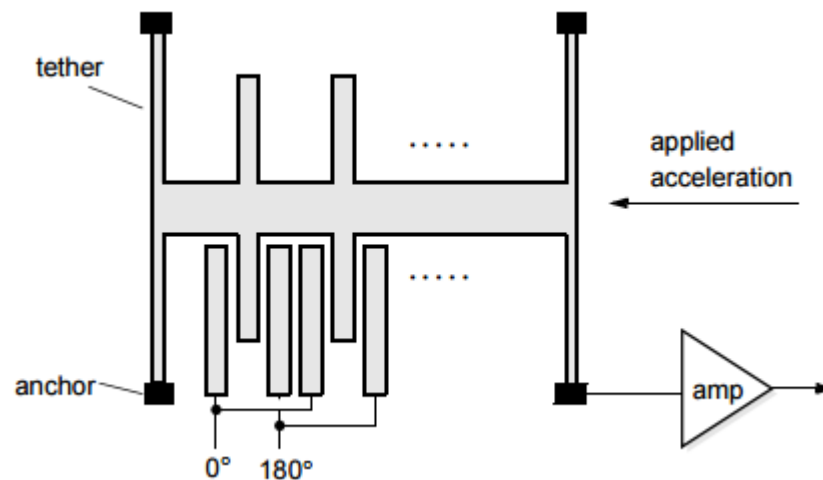
Differential capacitive transducer bridge measurement circuit.

Czujnik pojemnościowy – systemy wielookładowkowe

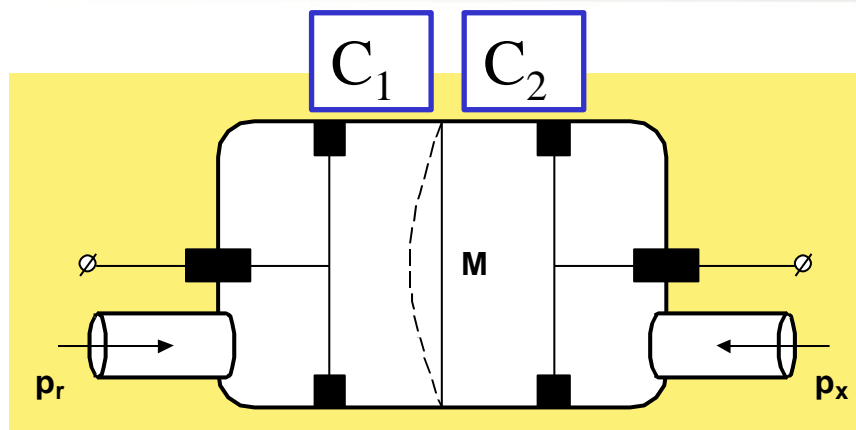
Zwiększenie C przy zachowaniu małej objętości

Analog Devices MEMS:
ADXL50

- Rozmiar całkowity 500 x 625 μm .
- 42 palce Si: 100 μm długości, 2 μm przerwa
- Całkowita pojemność 0.1 pF
- Przesunięcie w osi X wpływa na niewielką zmianę C
- Wzmacniacz wykrywa zmianę rzędu 20×10^{-18} F
- Możliwy pomiar przesunięcia rzędu 20×10^{-12} m



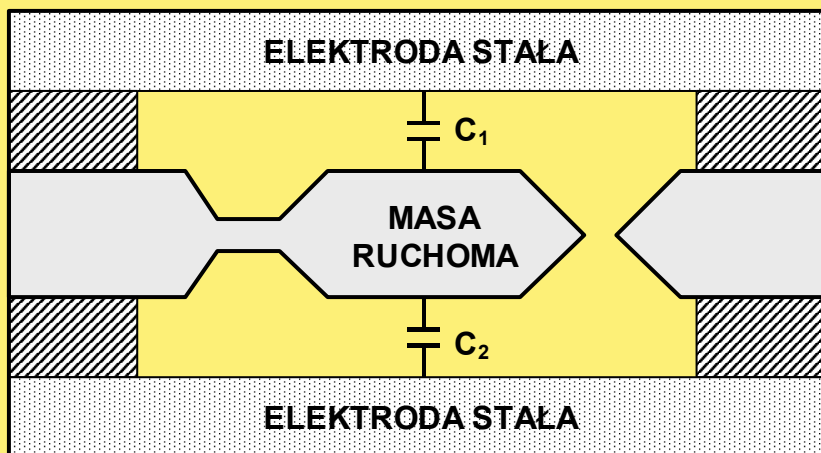
Czujnik pojemnościowy wykorzystujący kondensator różnicowy



Czujnik pojemnościowy do pomiaru ciśnienia w wersji różnicowej

$$10^{-4} < p < 10^3 \text{ Tr}$$

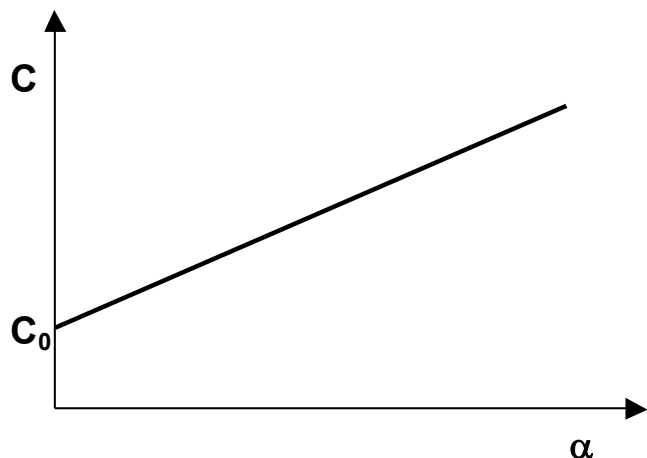
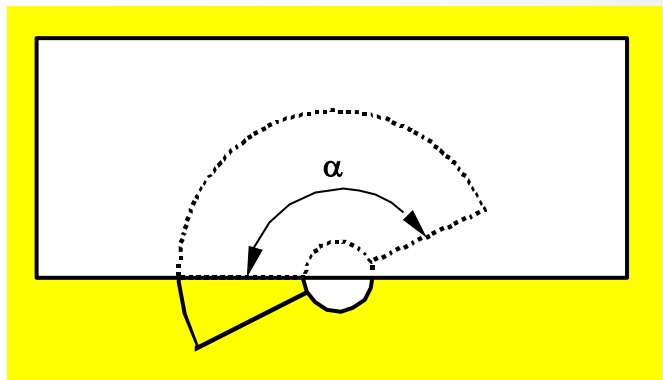
$$\Delta C_{\min} = 10^{-5} \text{ pF } (\Delta d \sim \text{nm})$$



Akcelerometr pojemnościowy

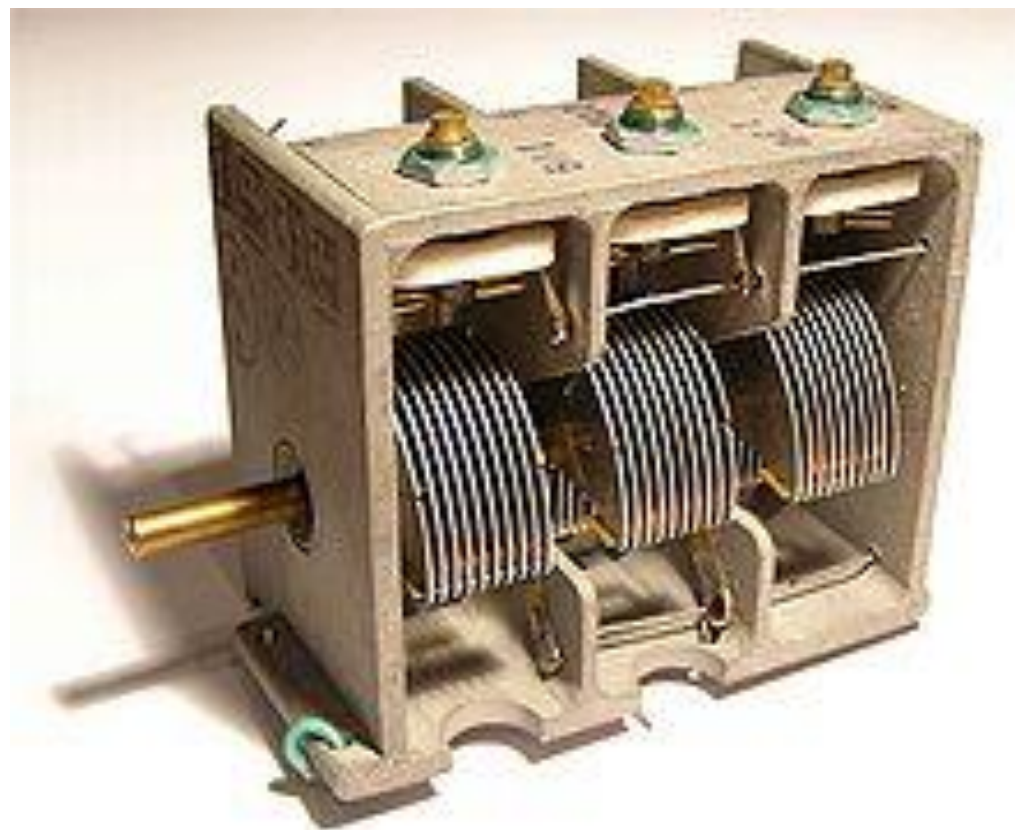
$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\Delta d}{d_0}$$

Czujnik przemieszczenia kątownego



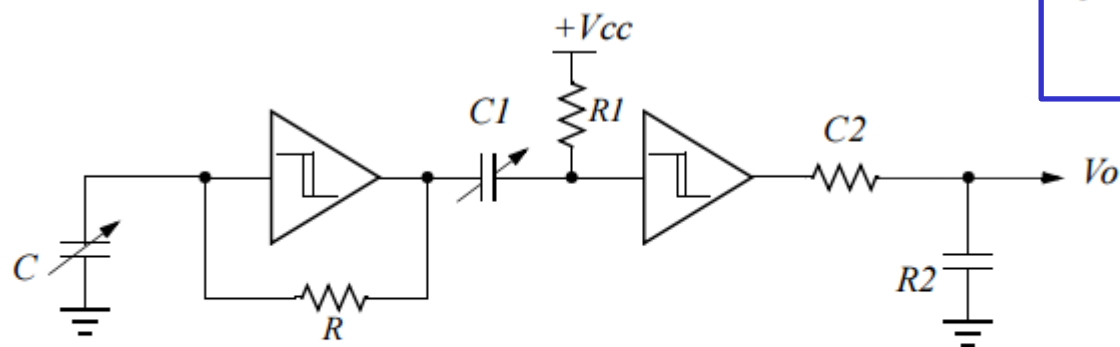
$$C = C_0 + \alpha \Delta C_\alpha$$

Kondensator obrotowy

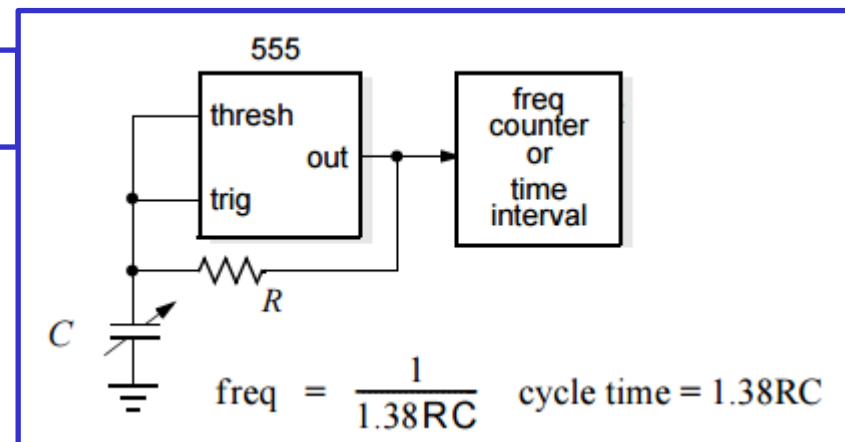


Jak mierzyć pojemność?

Generator o zmiennej częstotliwości



$$V_o = V_{cc} \cdot \frac{K \cdot R_1 \cdot C_1}{R \cdot C}$$



Więcej o praktycznych zastosowaniach i układach:

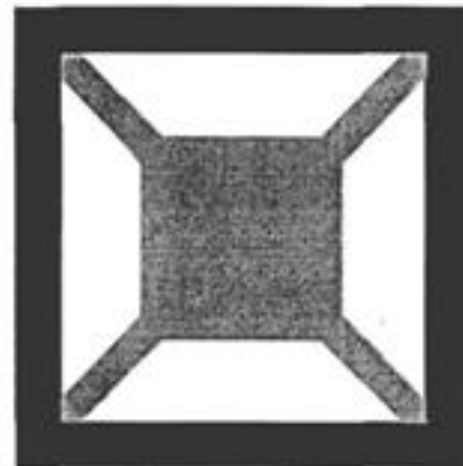
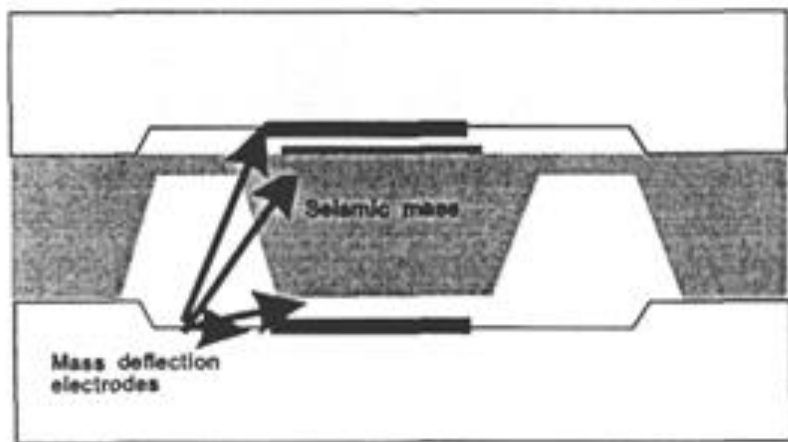
„Capacitive sensors”, L.K. Baxter: <http://www.capsense.com/capsense-wp.pdf>

Czujniki przyśpieszenia (MEMS)

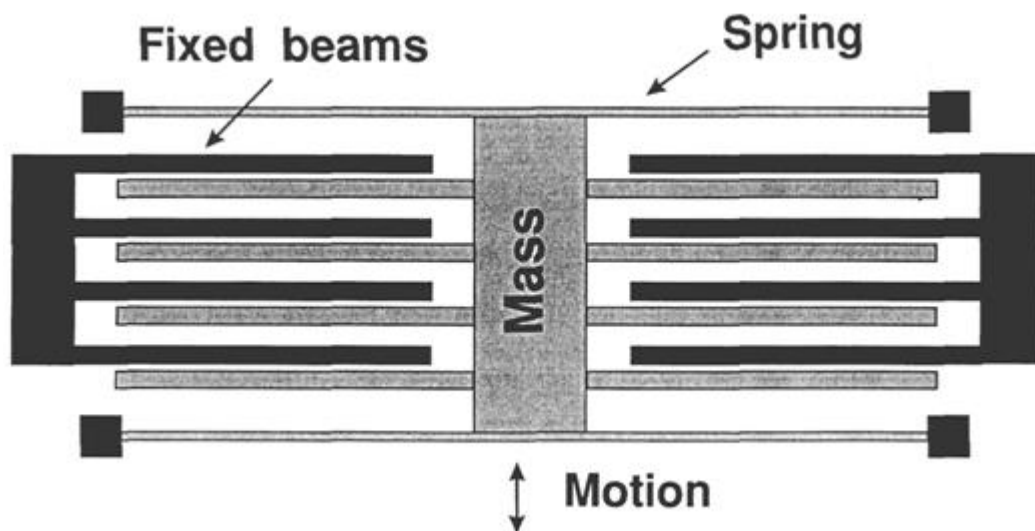
Zastosowania:

- sterowniki poduszek powietrznych
- napinacze pasów bezpieczeństwa
- stabilizacja obrazu kamer i aparatów fotograficznych
- dyski pamięci – wykrywanie wstrząsów, upadku itd.
- jako czujniki położenia (zmiana orientacji ekranu) w telefonie, mp4
- funkcje aktywowane ruchem
- wykrywanie spadku swobodnego
- inteligentne oszczędzanie mocy w urządzeniach przenośnych
- krokomierze
- urządzenia wejściowe dla konsol do gier i VR
- wykrywanie i kompensacja wibracji

Czujnik przyśpieszenia

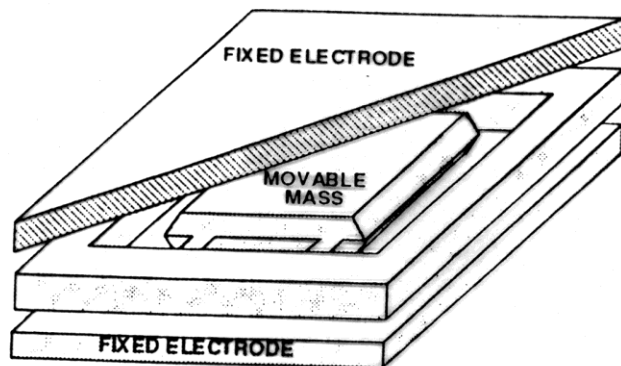


Struktura pionowa

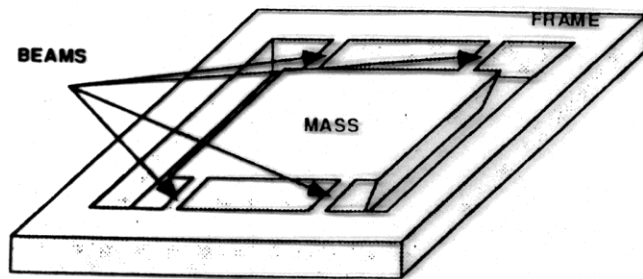


Struktura boczna

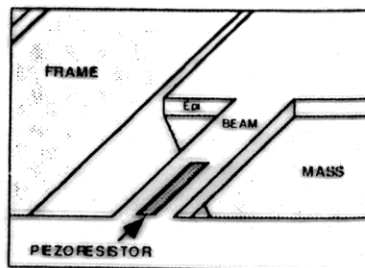
Czujnik przyśpieszenia



Pojemnościowy czujnik przyśpieszenia

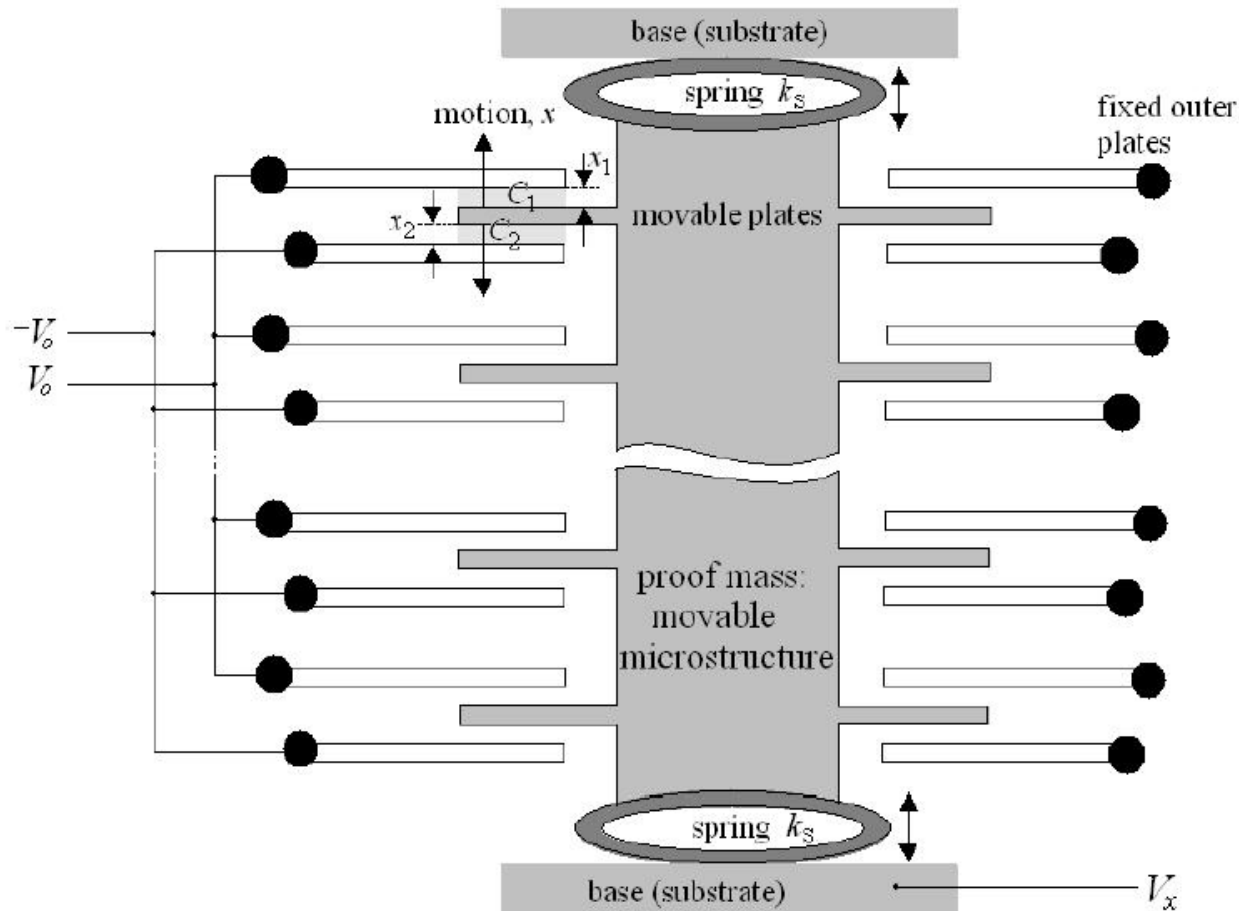


Piezorezystywny czujnik przyśpieszenia



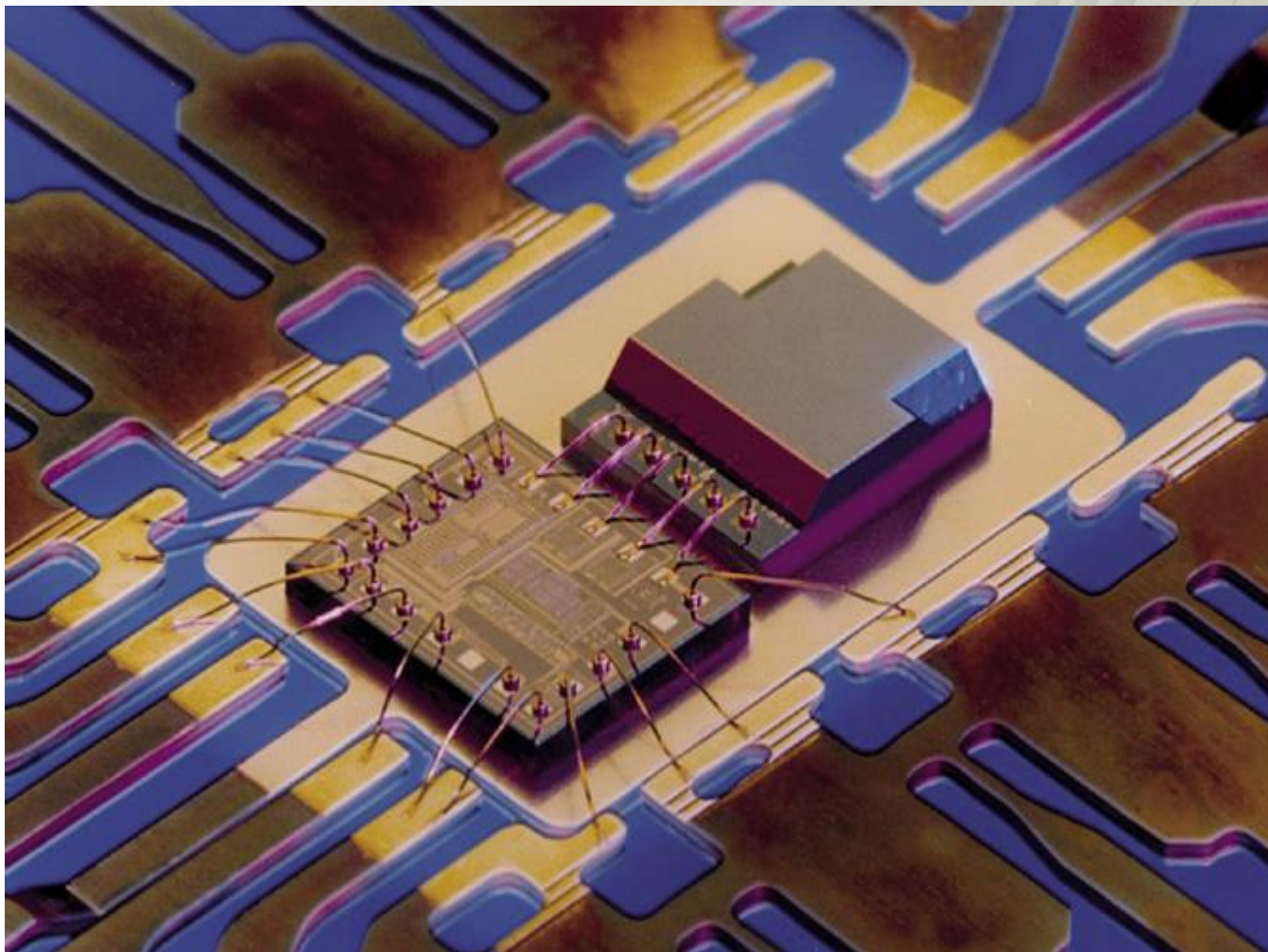
Szczegóły belki

Pojemnościowy czujnik przyśpieszenia MEMS - budowa



Budowa akcelerometru serii ADXL

Czujniki przyśpieszenia MEMS

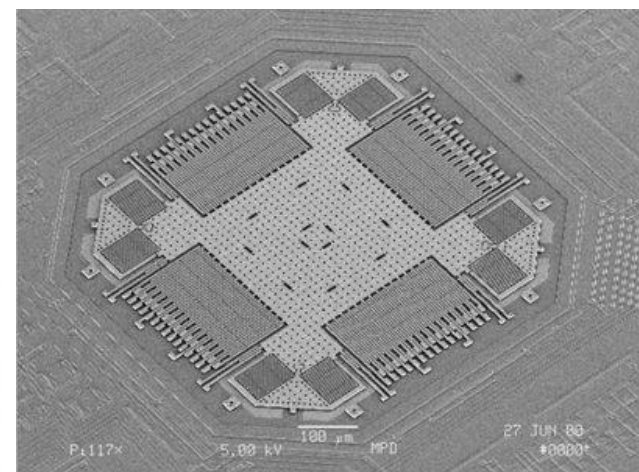
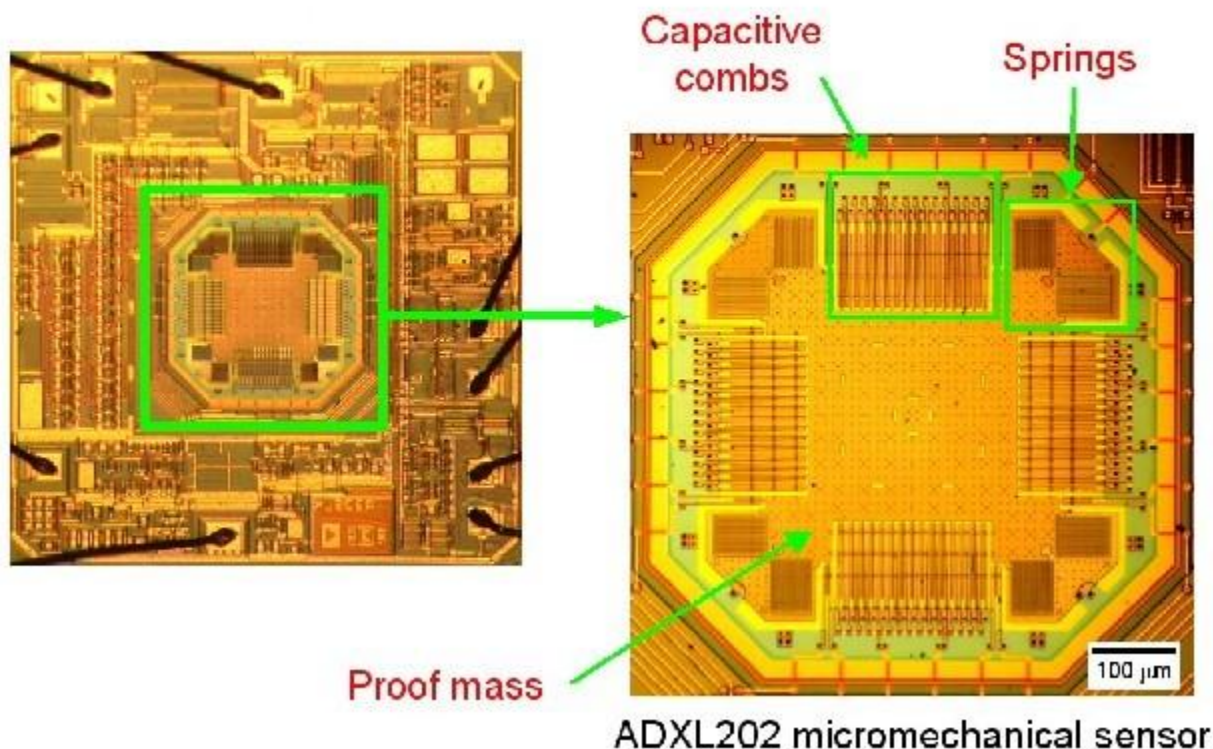


Wnętrze układu zintegrowanego akcelerometru (Analog Devices)

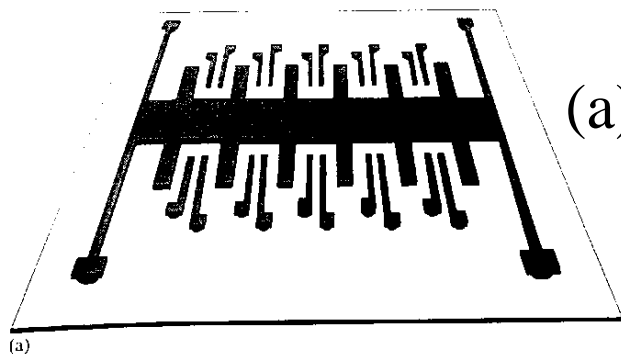
Pojemnościowy czujnik przyśpieszenia - technologia wykonania

MEMS – Micro Electro Mechanical Systems

Dual- axes MEMS accelerometers: ADXL202



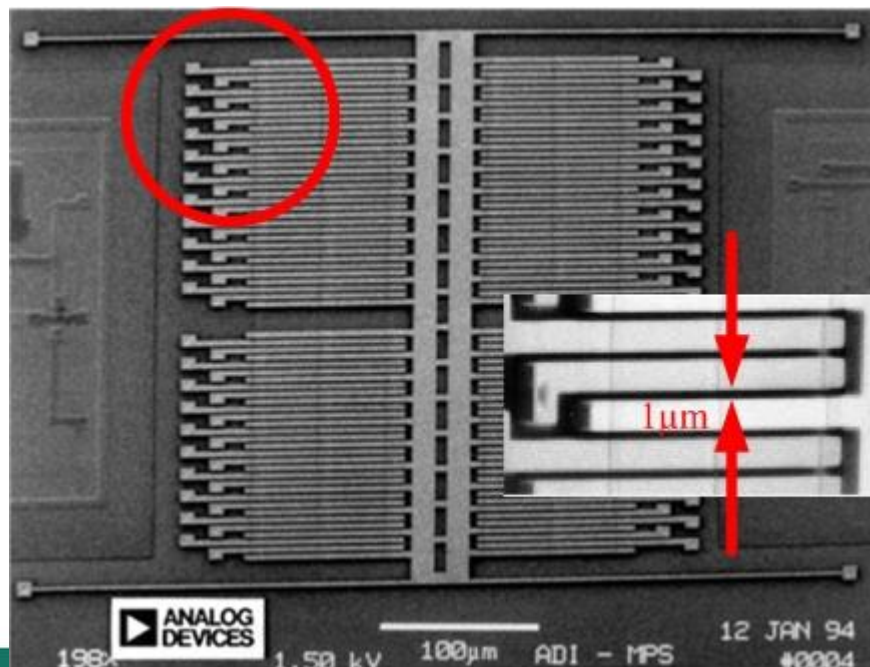
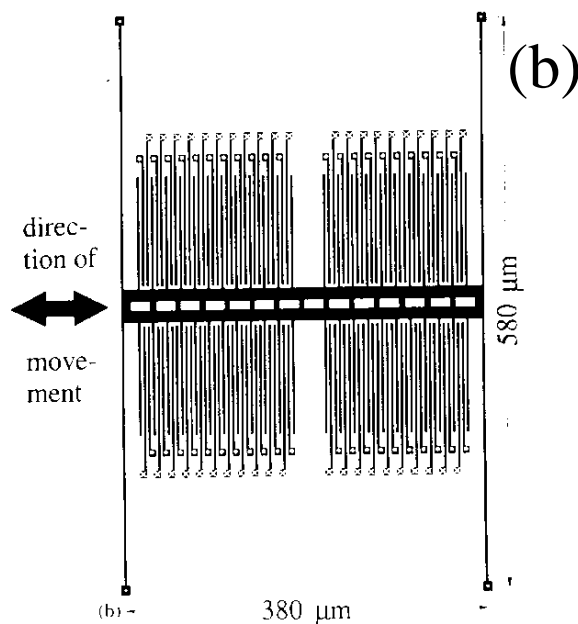
Pojemnościowy czujnik pochylenia na bazie akcelometru



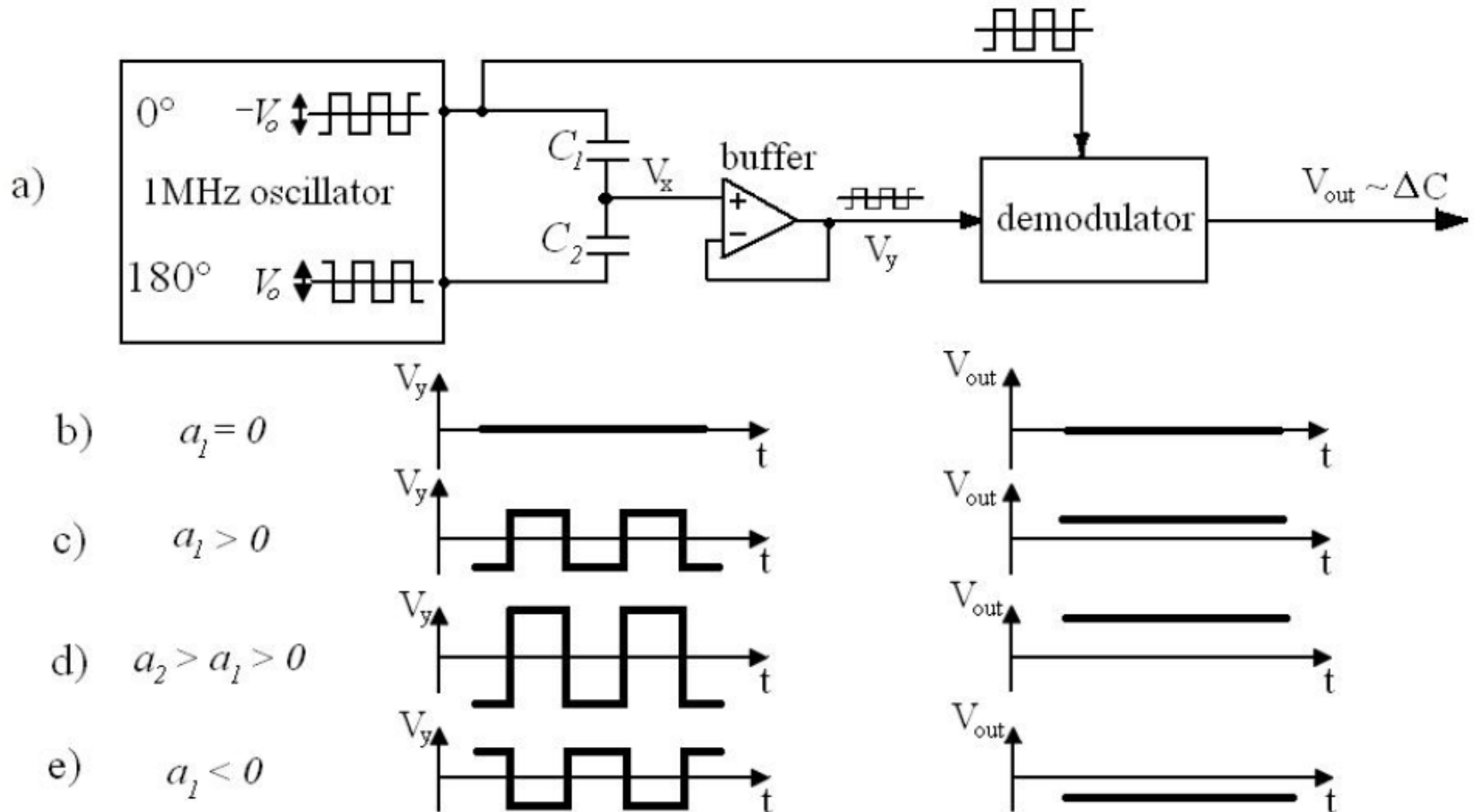
Konstrukcja **jednoosiowego** scalonego akcelometru Analog Devices – seria ADXL :

(a) schemat międzypalczystego kondensatora różnicowego,

(b) element sensorowy widziany z góry.



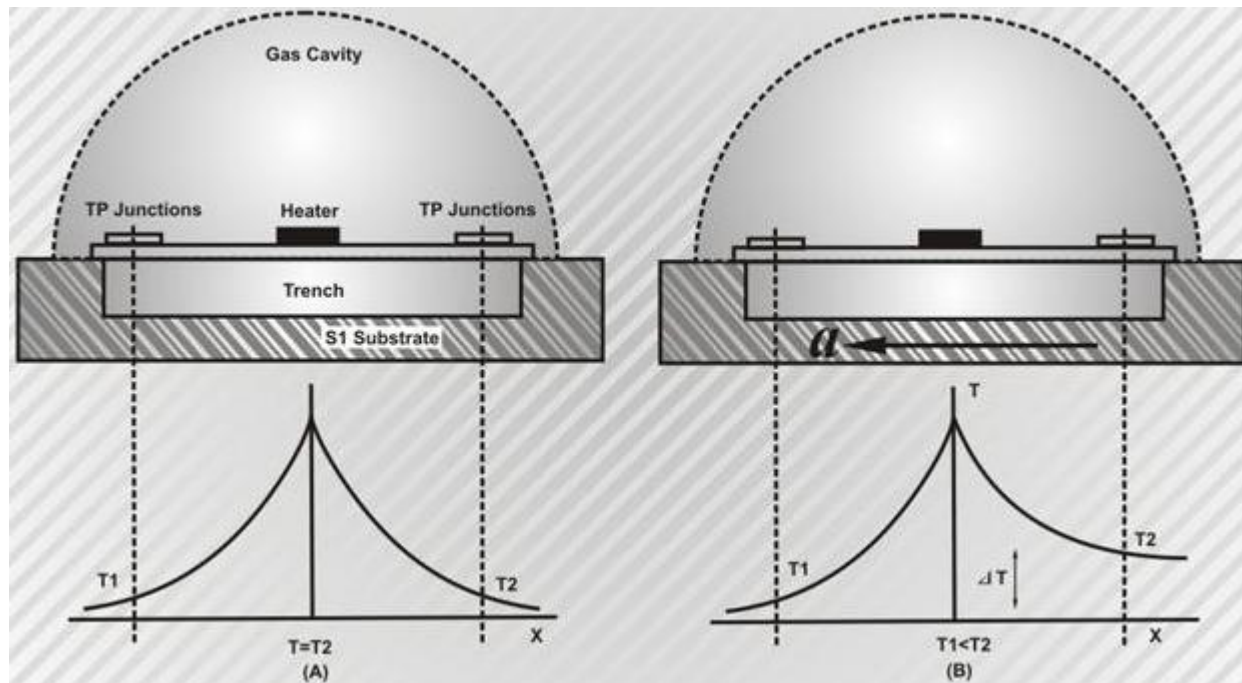
Pojemnościowy czujnik przyśpieszenia MEMS - zasada działania ADXL 202



Akcelerometry – inne rozwiązania

Pomiar przepływu ciepła pod wpływem przyspieszenia.

Masa bezwładna =
gaz

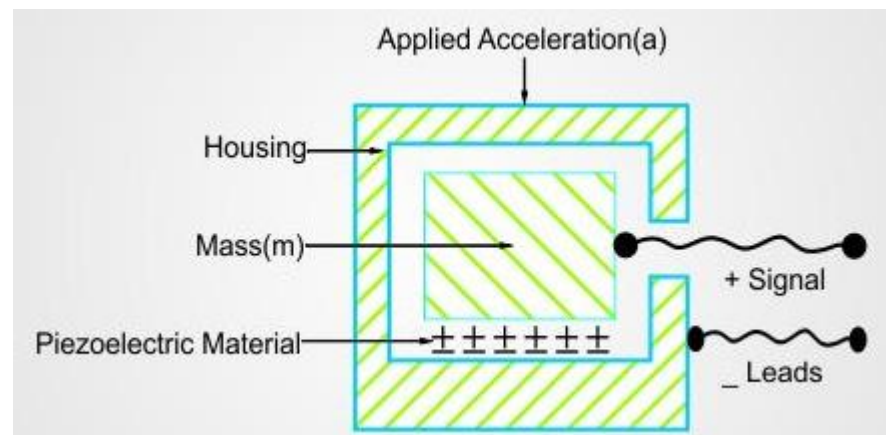
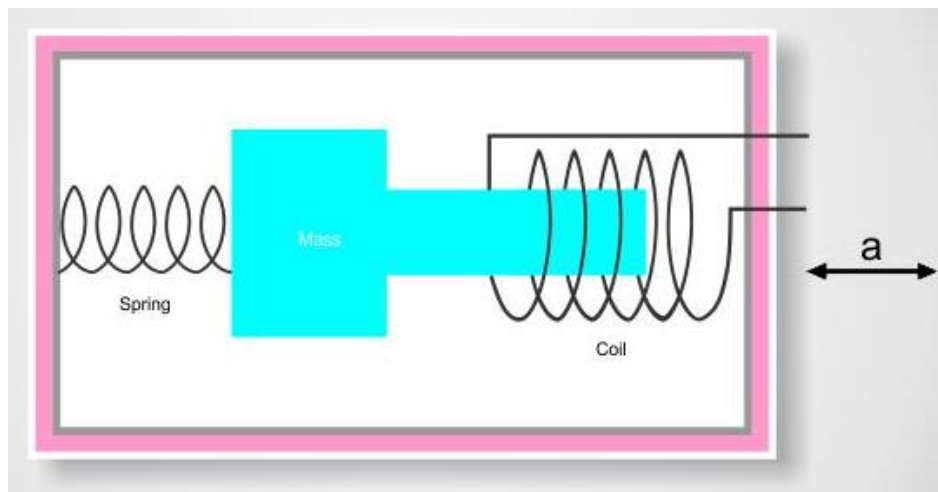
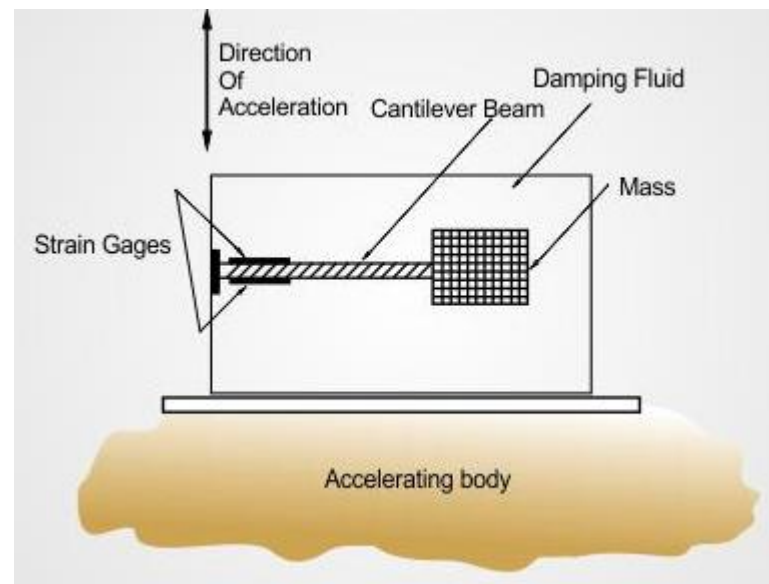
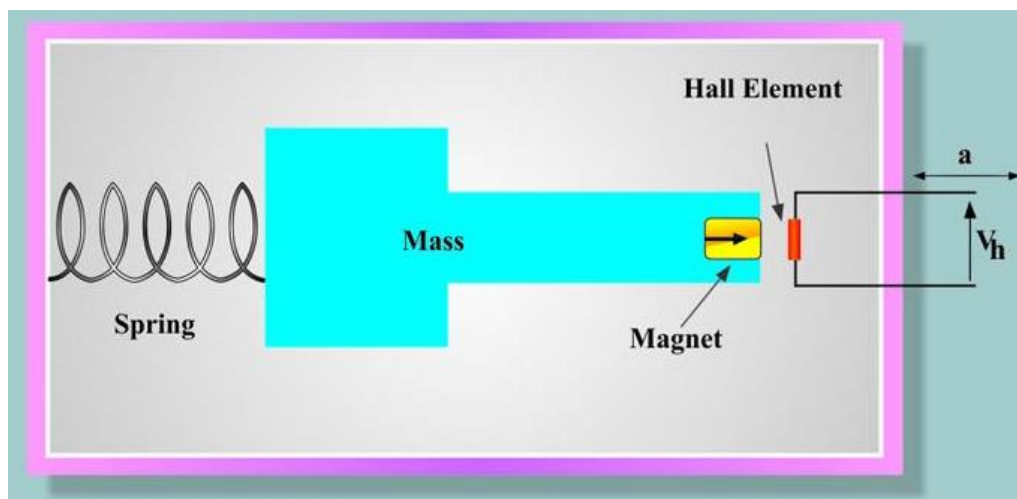


Gradient ciepła symetryczny – temperatura TP ta sama

Gradient ciepła asymetryczny – z powodu przepływu ciepła przez konwekcję; gaz przesuwa się w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu – wywołuje gradient temperatury.

Wielkość gradientu T wskazuje na wartość przyspieszenia.

Akcelerometry – inne rozwiązania



Kalibracja czujnika przyspieszenia

- Sygnał wzorcowy (kalibracyjny) - przyspieszenie ziemskie g (najłatwiej dostępny, dokładny wzorzec).
- Procedura kalibracji polega na pomiarze - osobno dla wszystkich osi - sygnału wyjściowego (współczynnik wypełnienia, napięcie itd.) przy przyspieszeniu $+1\text{ g}$, -1 g oraz 0 g .
- Duże znaczenie ma odpowiednie ustawienie czujnika względem pionu - oś poddawana kalibracji powinna być ustawiona dokładnie pionowo. **Niedokładność na tym etapie jest głównym źródłem błędu pomiaru.**
- Pomiar wykonuje się wielokrotnie, a potem uśrednia.

Czujniki przyśpieszenia MEMS

- 1-, 2- oraz 3-osiowe,
- wyposażone w zintegrowane układy kondycjonujące i kompensujące wpływ warunków zewnętrznych na uzyskane wyniki (zmiany temperatury, zmiany wartości napięć zasilających, niedokładności montażu).
- często zintegrowane z przetwornikami A/C (rozdzielczość do 24 bitów, zazwyczaj 10...13 bitów),
- dane w postaci cyfrowej (interfejs SPI lub I²C) i/lub analogowej,
- z wyjściem PWM (ADXL202E, ADXL212, ADXL213 firmy Analog Devices)
- interfejs DSI (*Distributed System Interface*) (np. seria MMA26xx firmy Freescale) – do aplikacji samochodowych.

Czujniki przyśpieszenia MEMS

Typowe pasmo (3 dB):

nie przekracza 400 Hz, ale dostępne są sensory pracujące prawidłowo nawet do 22 (32) kHz (np. ADXL001 z oferty Analog Devices).

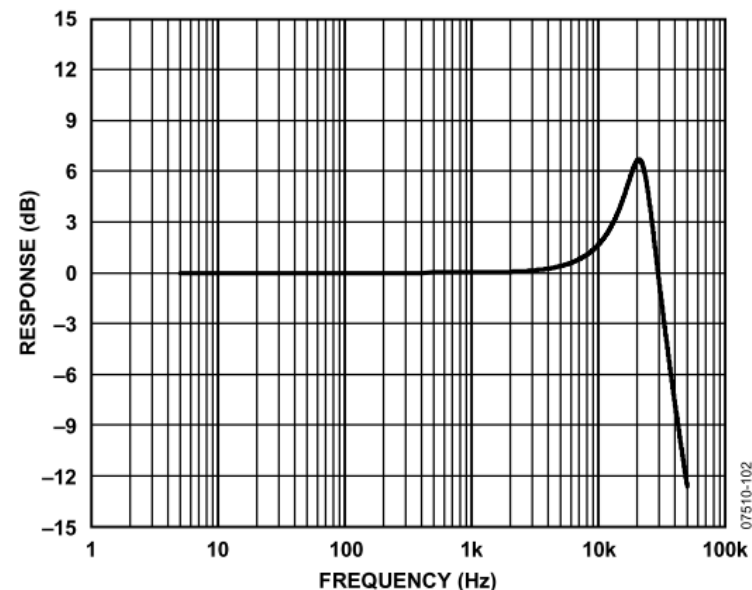


Figure 1. Sensor Frequency Response

Typowe szумы / gęstość widmowa szumu:

(ADXL001 z oferty Analog Devices).

NOISE					
Noise	10 Hz to 400 Hz	85	95	105	mg rms
Noise Density	10 Hz to 400 Hz	3.3	3.65	4.25	mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Czujniki przyśpieszenia MEMS

Typowe pasmo (3 dB):

nie przekracza 400 Hz, ale dostępne są sensory pracujące prawidłowo nawet do 22 (32) kHz (np. ADXL001 z oferty Analog Devices).

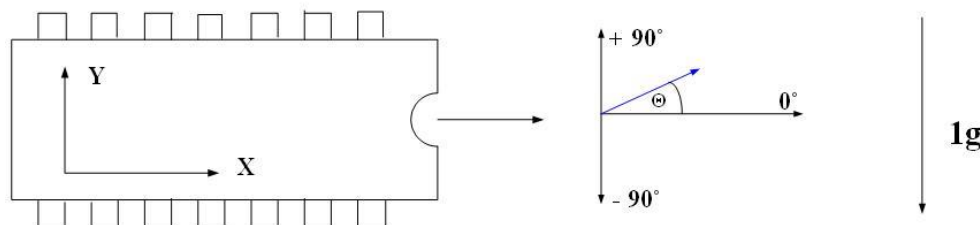
Typowy zakres pomiarowy: $\pm 2g$, $\pm 5g$, $\pm 10g$, ale też $\pm 250g$ (MMA2300KEG, Freescale), $\pm 312,5g$ (m.in. MMA1631NKW, Freescale, interfejs DSI).

Maks. czułość: do 1200 mV/g, zwykle kilkaset mV/g (analogowe)
ALBO np. 100 LSB/g (cyfrowe)

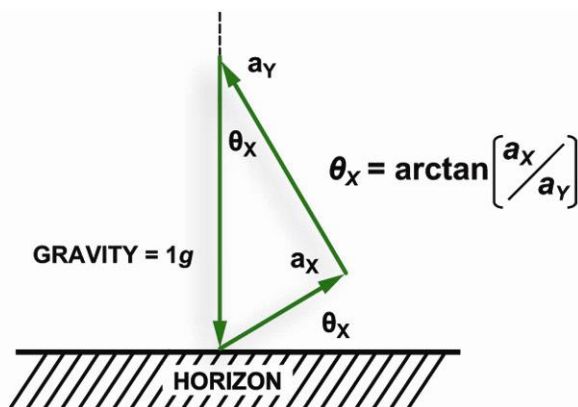
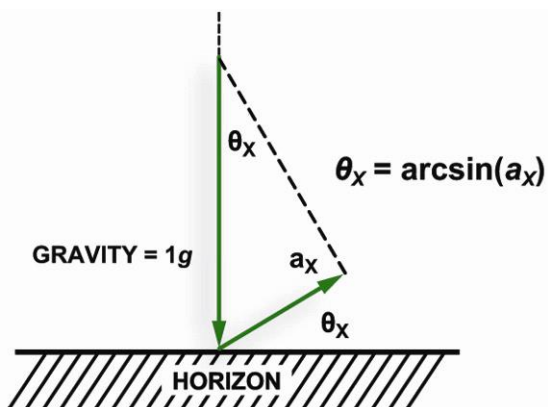
Dodatkowe funkcje:

- układy przełączania zakresów pomiarowych,
- systemy zarządzania energią
- programowane detektory swobodnego upadku (*free fall*),
- komparatory progowe sygnalizujące przekroczenie zadanej wartości przyspieszenia przerwaniem,
- wykrywacze wstrząsów/puknięć,
- programowane timery okresowo inicjujące monitorowanie drgań/przechyłów.

Pojemnościowy czujnik pochylenia (inklinometr) na bazie akcelerometru



Określanie kąta pochylenia θ
z pomiaru przyspieszenia
ziemskiego



Czujnik kąta pochylenia w
wersji jedno- i dwuosiowej
($g = 1$)

W wersji jednoosiowej czułość spada ze wzrostem θ

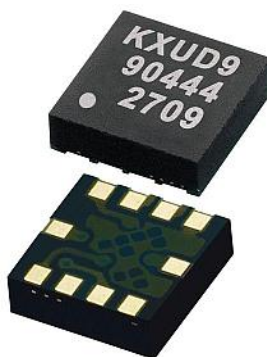
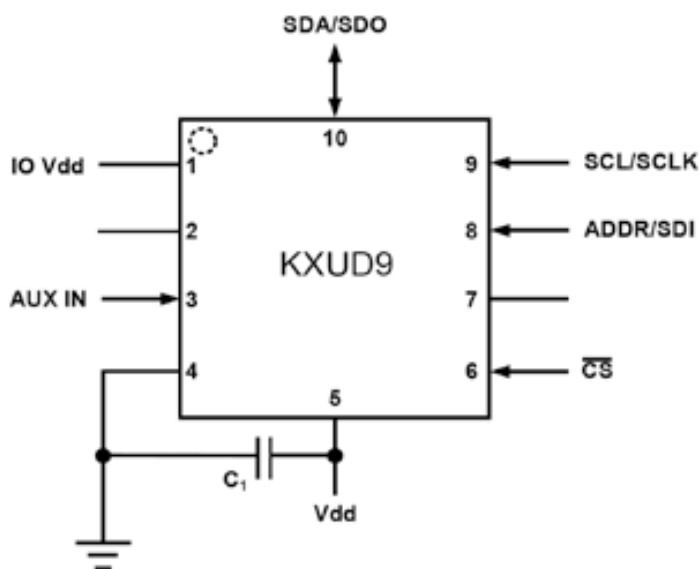
$$\theta_x = \arcsin(a_x) \Rightarrow a_x = \sin(\theta_x)$$

$$\frac{da_x}{d\theta_x} = \cos(\theta_x) \Rightarrow \cos(90^\circ) = 0$$

Konieczność kalibracji
czujnika!

Czujniki przyśpieszenia MEMS

KXUD9 firmy Kionix



Schemat aplikacyjny akcelerometru KXUD9 firmy Kionix

Zawiera ASIC do kondycjonowania, autotestowania, kompensacji temp.,

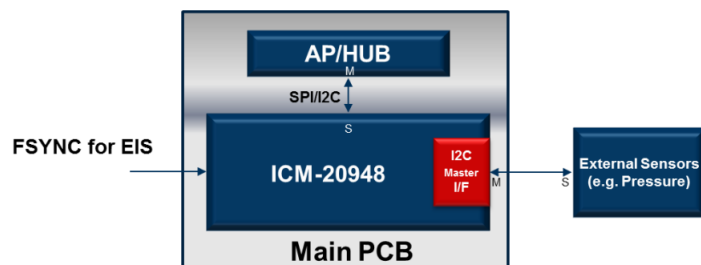
- 3-osiowy , +/- 2,4,6,8 g (programowalne!)
- wejście A/C: może spełniać także rolę pokładowego, jednowejściowego przetwornika A/C o rozdzielczości 16 bitów
- programowalny filtr DP
- niskomocowy (220 uA praca, 0.3 uA standby)
- wyjścia SPI oraz I²C
- Cena ok. 20 zł (Kamami)

Czujniki przyśpieszenia MEMS

TDK Corporation InvenSense

ICM-20948-World's Lowest Power 9-Axis MEMS MotionTracking Device

BLOCK DIAGRAM



ICM-20948-World's Lowest Power 9-Axis MEMS MotionTracking Device

Zawiera ASIC do kondycjonowania, autotestowania, kompensacji temp.,

4.5 BLOCK DIAGRAM

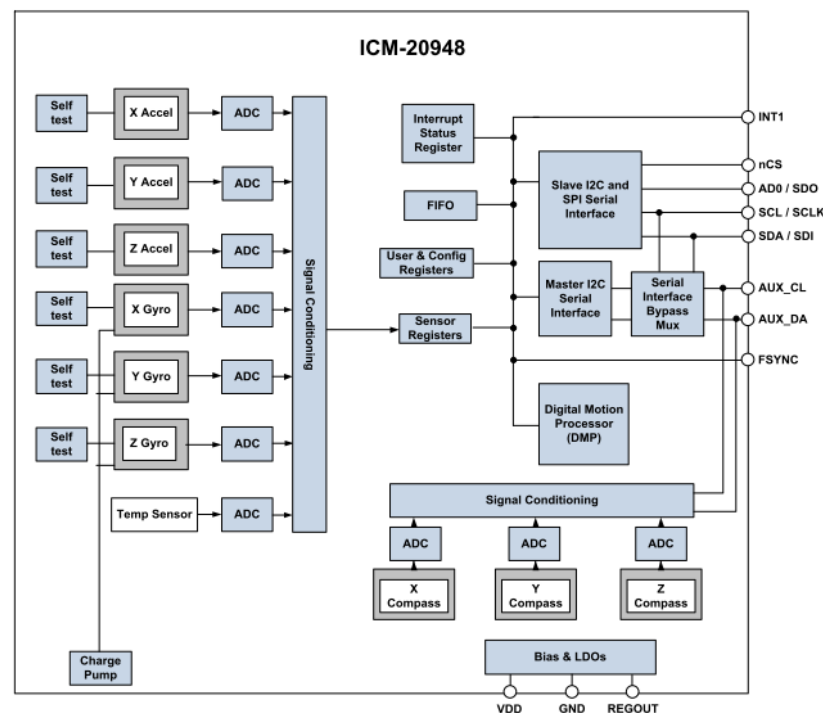
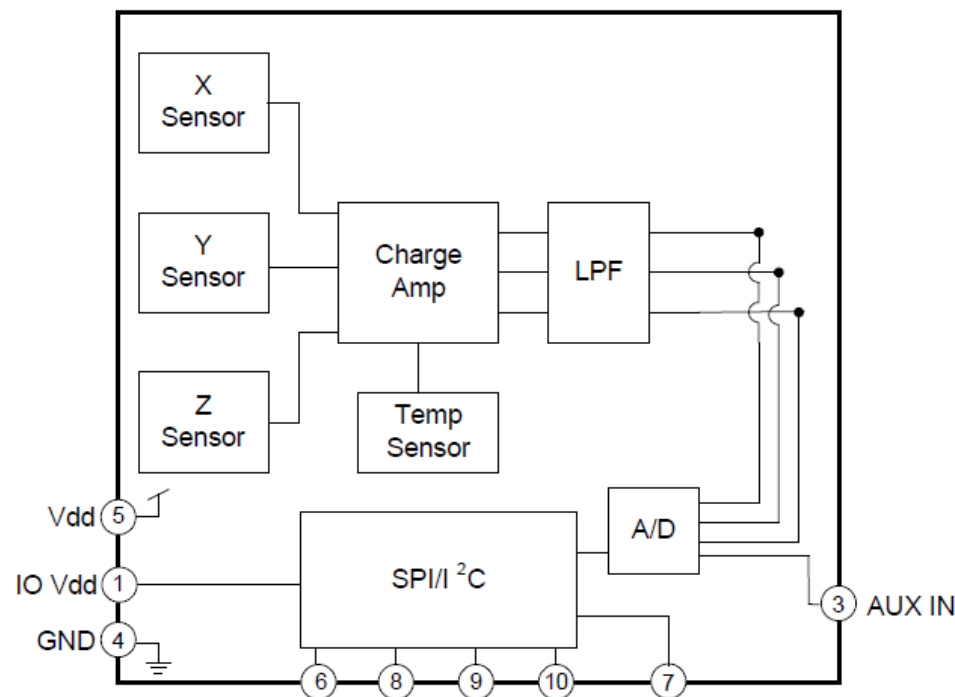


Figure 5. ICM-20948 Block Diagram

Czujniki przyśpieszenia MEMS

KXUD9 firmy Kionix



Konieczny uC do komunikacji

MARKETS

APPLICATIONS

Cell Phones and Handheld PDAs

Gesture Recognition and User Interface Function

Game Controllers & Computer Peripherals

Inclination and Tilt Sensing

Ultra-Mobile PCs/Laptops/Hard Disk Drives

Free-fall Detection

Cameras and Video Equipment

Image Stabilization

Sports Diagnostic Equipment/Pedometers

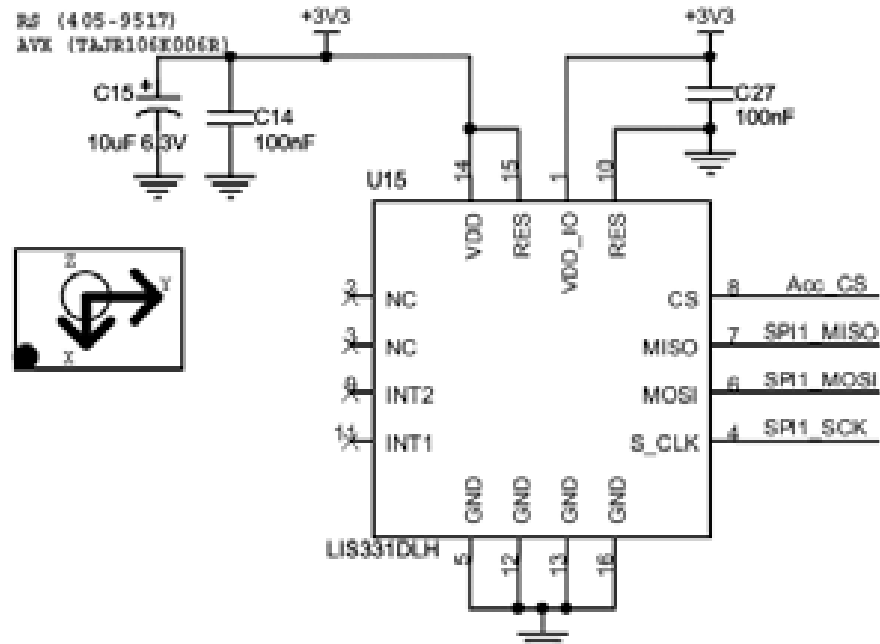
Static or Dynamic Acceleration

Czujniki przyśpieszenia MEMS

LIS331DLH firmy STMicroelectronics



LGA 16 (3x3x1 mm)



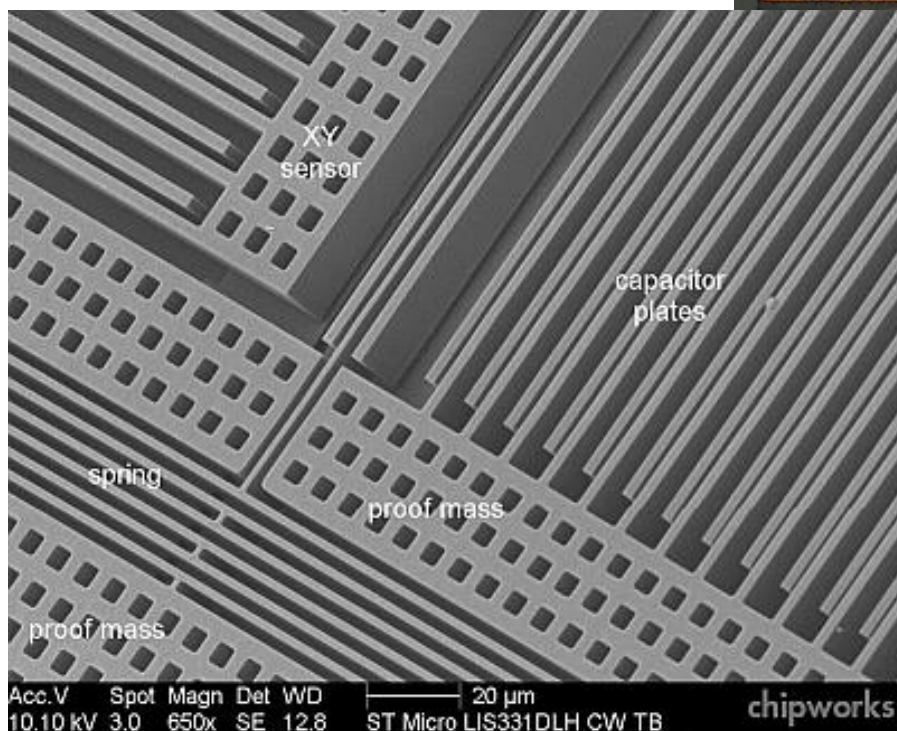
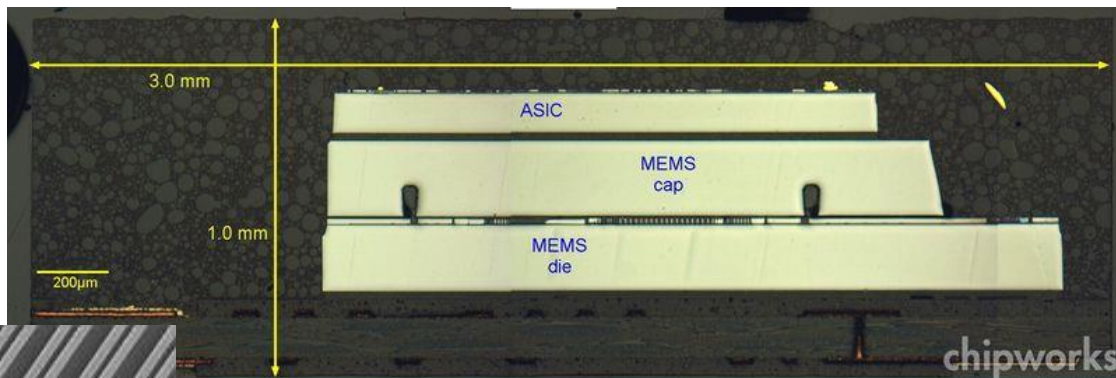
Schemat aplikacyjny czujnika
LIS331DLH firmy STMicroelectronics
(z interfejsem SPI)

Konieczny uC do komunikacji

- $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$ (do wyboru)
- 0.5 Hz to 1 kHz
- Acceleration noise density 218 $\mu g/\sqrt{Hz}$
- Interfejs I²C/SPI
- Niskomocowy – do 10 μA
- Autotestowanie
- Wykorzystany w iPhone 3GS, 4

Czujniki przyśpieszenia MEMS

LIS331DLH – c.d.



Czujniki przyśpieszenia MEMS

LIS331DLH – programowanie szer. pasma

HPCF[1:0]. These bits are used to configure high-pass filter cut-off frequency f_t which is given by:

$$f_t = \ln\left(1 - \frac{1}{\text{HPC}}\right) \cdot \frac{f_s}{2\pi}$$

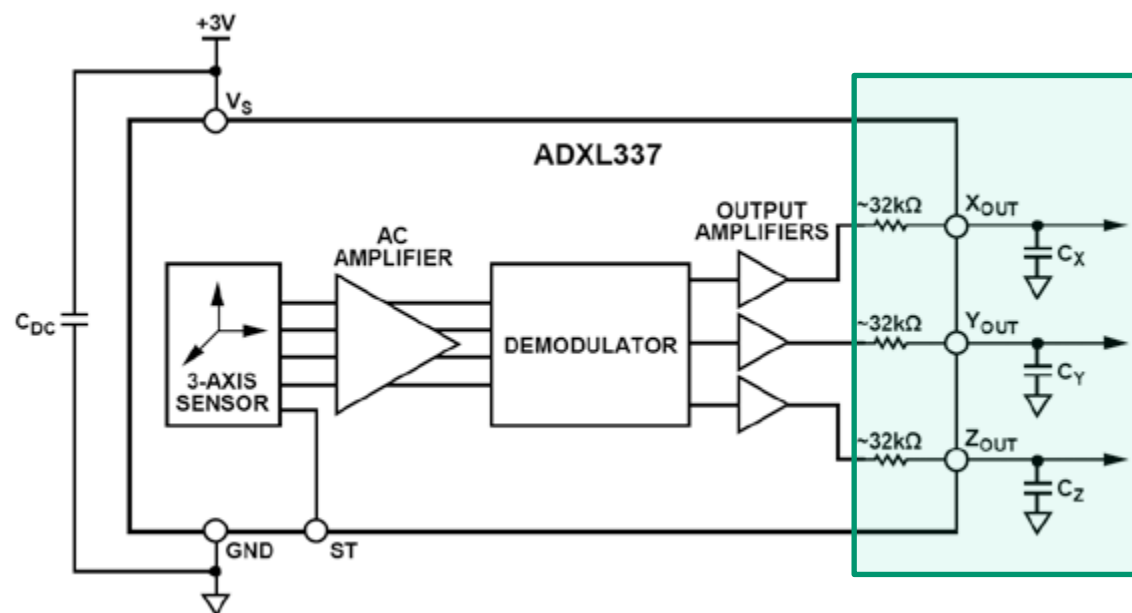
The equation can be simplified to the following approximated equation:

$$f_t = \frac{f_s}{6 \cdot \text{HPC}}$$

Table 24. High-pass filter cut-off frequency configuration

HPcoeff2,1	f_t [Hz] Data rate = 50 Hz	f_t [Hz] Data rate = 100 Hz	f_t [Hz] Data rate = 400 Hz	f_t [Hz] Data rate = 1000 Hz
00	1	2	8	20
01	0.5	1	4	10
10	0.25	0.5	2	5
11	0.125	0.25	1	2.5

Czujniki przyśpieszenia



Schemat blokowy akcelerometru 3D
ADXL337 (Analog Devices) z wyjściami
analogowymi

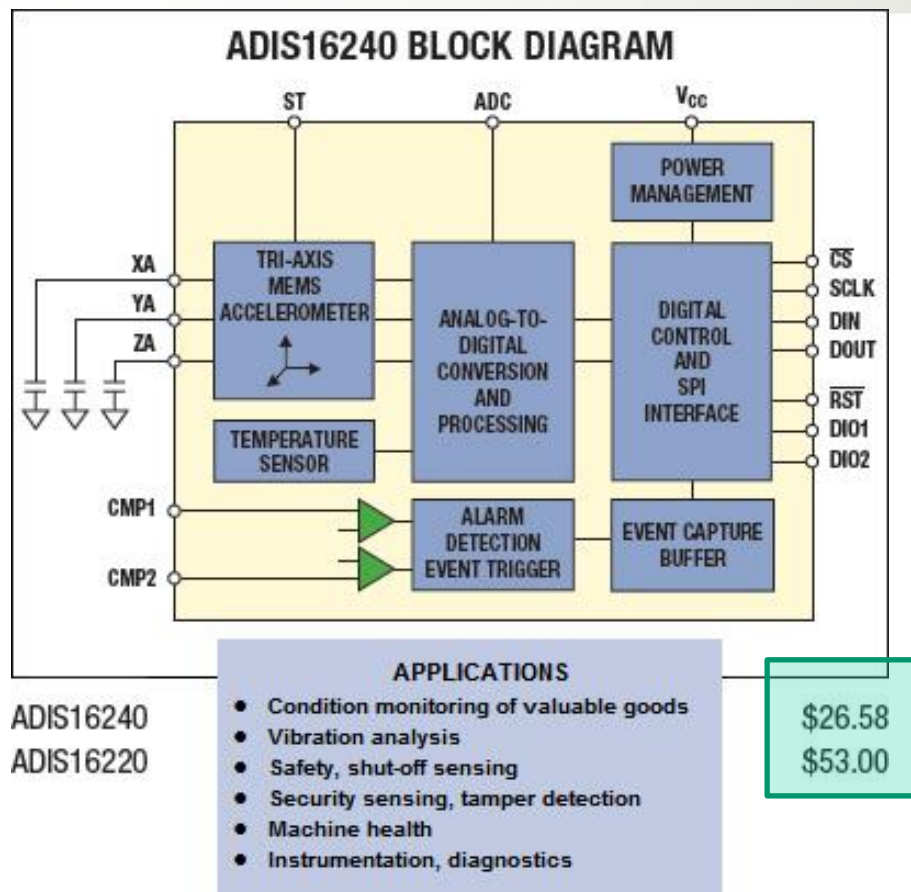
Mogą być wyposażane:

- w **filtry dolnoprzepustowe** Bessela o konfigurowanych (cyfrowo lub za pomocą zewnętrznych elem. RC) charakterystykach i rzędzie dobieranym przez użytkownika. Przykład: **ADXL 202E** (Analog Devices).

- w konfigurowalne **filtry górnoprzepustowe**; odcinają składową stałą pomiaru (uniknięcie wpływu offsetu mechanicznego na wyniki pomiarów).

Przykład: **LIS331DLH**
(STMicroelectronics)

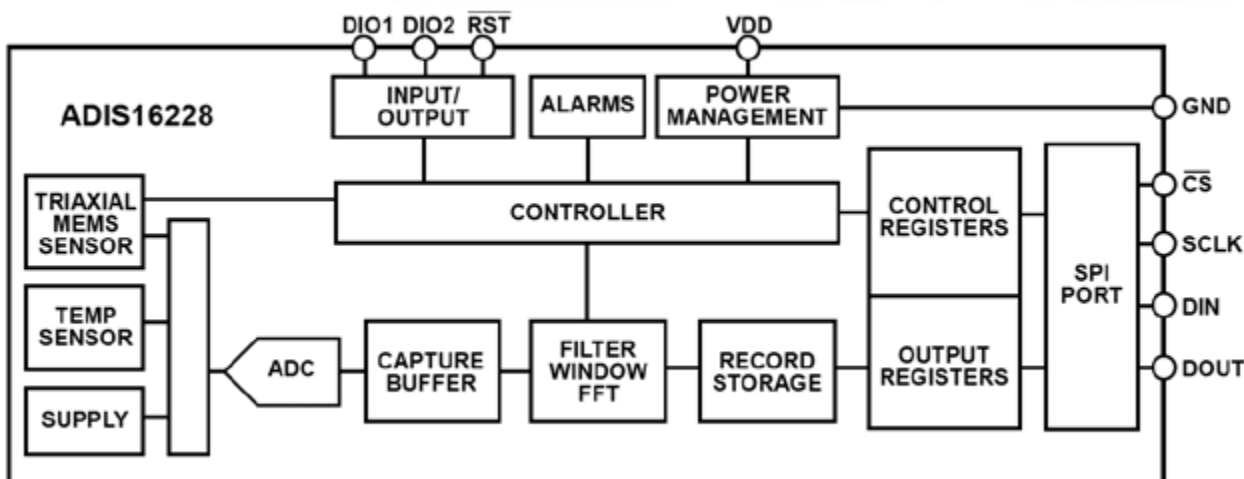
Czujniki przyspieszenia



- Wyposażony w pamięć zdarzeń (organizacja 3×8 kb)
- rejestracja zdarzeń zdefiniowanych przez użytkownika (w nagłówku informacje o godzinie, dacie, temperaturze i napięciu zasilania).
- Wymuszenie zapisu rekordu:
 - automatycznie (po przekroczeniu zadanego progu w którymś kanale akcelerometru),
 - wyzwalane z zewnątrz za pomocą dwóch dedykowanych do tego celu wejść.

Schemat blokowy 3-osowego akcelerometru **ADIS16240** (Analog) ze zintegrowanym rejestratorem wyników pomiarów

Czujniki przyśpieszenia



Wbudowany sprzętowy system obliczania FFT z 512 próbek dla sygnałów z 3 osi).

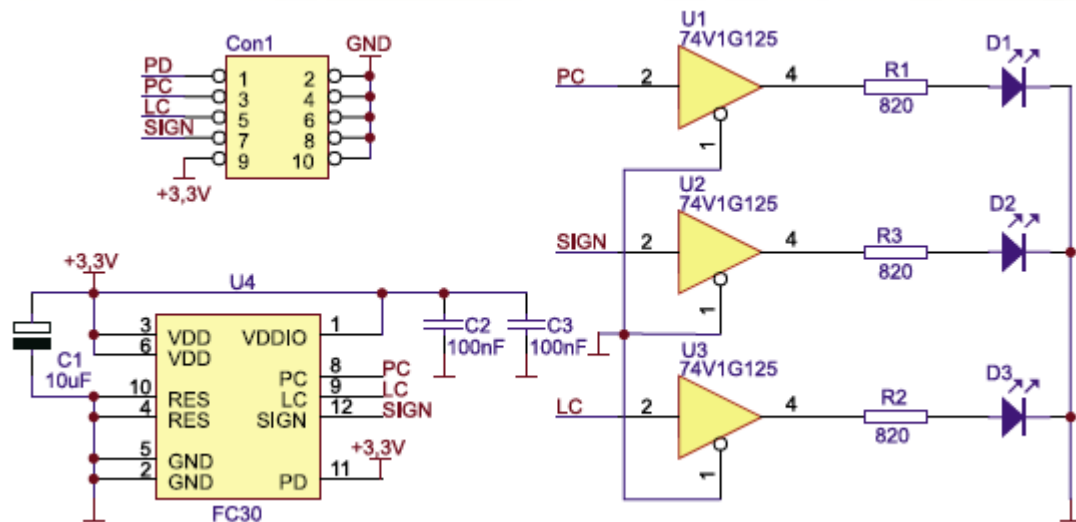
Cena ADIS16228
~270\$ (~870zł)

Schemat blokowy akcelerometru **ADIS16228** ze zintegrowanym analizatorem FFT i rejestratorem wyników pomiarów



- Wybór okna próbkowania (prostokątne, Hanninga, flat top)
- Sprzętowe uśrednianie wyników FFT (do 255 próbek)
- Generowanie alarmów po wystąpieniu zadanych drgań lub wibracji
- Pamięć FLASH (np. do przechowywania nastaw konfiguracyjnych oraz rejestrowania wybranych wyników)

Czujniki przyśpieszenia



Cena FC30
~9 zł (Mouser)

Schemat aplikacyjny sensora funkcjonalnego MEMS – FC30

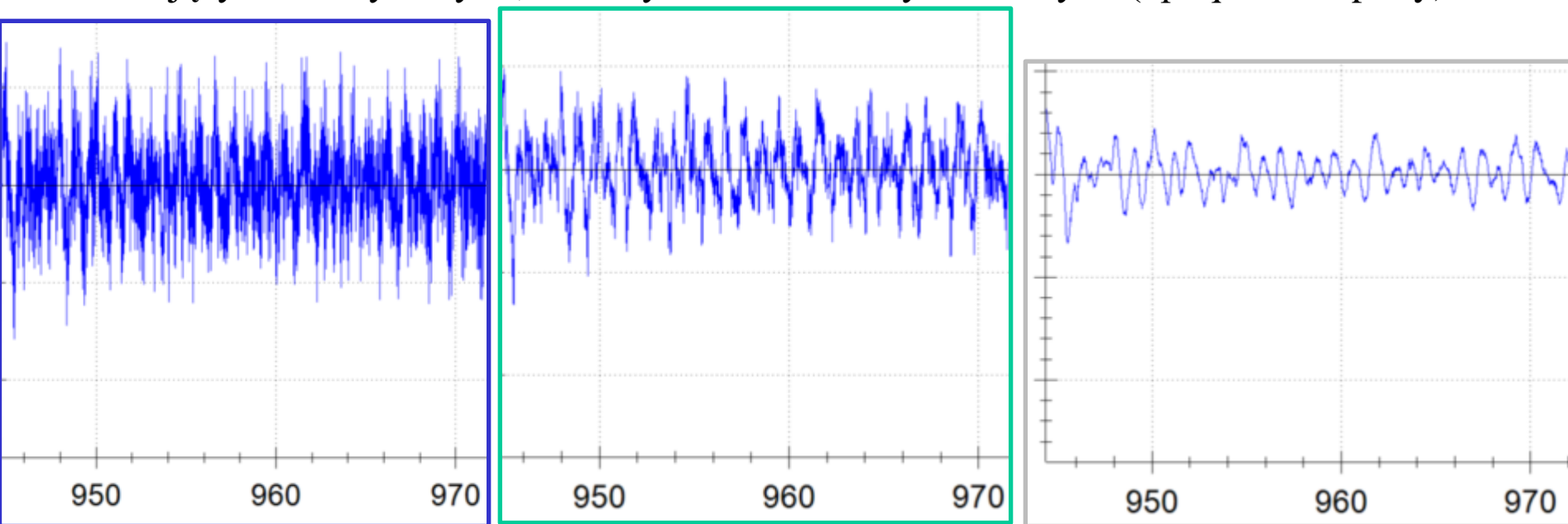
Służy do pomiaru położenia czujnika względem powierzchni Ziemi, bez dokładnego pomiaru kąta nachylenia - czujnik funkcjonalny, jak np.: **FC30** firmy STMicroelectronics.

- układ o trzech cyfrowych wyjściach, ich stany logiczne określają swoją kombinacją aktualne położenie sensora – sygnalizowana jest 1 z 8 możliwych, intuicyjnych pozycji (typu: *portrait/landscape itp.*).

Czujniki przyspieszenia

Biblioteki dla użytkowników STMicroelectronics - programowy filtr Kalmana

- ułatwiają stosowanie sensorów przyspieszenia i żyroskopów w konkretnych aplikacjach, sterujących rzeczywistymi, złożonymi obiektami dynamicznymi (np. quadrokoptery).



Dane oryginalne

Po filtrze FIR

Po filtrze Kalmana

Filtr Kalmana – algorytm rekurencyjnego wyznaczania minimalno-wariancyjnej estymaty wektora stanu modelu liniowego dyskretnego układu dynamicznego na podstawie pomiarów wyjścia oraz wejścia tego układu. Przyjmuje się założenie, że zarówno pomiar, jak i proces przetwarzania wewnątrz układu jest obarczony błędem o rozkładzie gaussowskim. (https://pl.wikipedia.org/wiki/Filtr_Kalmana)

Czujniki przyśpieszenia

iNEMO Engine : Lite (<https://www.st.com/en/mems-and-sensors/inemo-inertial-modules.html#tools-software>)

C-Driver-MEMS - Standard C platform-independent drivers for MEMS motion and environmental sensors

Niezależne od platformy sterowniki dla czujników ruchu i czujników środowiskowych MEMS firmy STMicroelectronics, oparte na standardowym języku programowania C, są dostępne w kodzie źródłowym w publicznym repozytorium GitHub firmy STMicroelectronics.

Repozytorium zawiera sterowniki i przykłady dla czujników MEMS firmy STMicroelectronics.

Sterowniki czujników i przykłady są wymienione według numeru części. Sterowniki czujników obsługują interfejsy SPI i I²C.

Szczegóły integracji są dostępne w sekcji README repozytorium GitHub.

Wszystkie funkcje

- *Standardowe sterowniki niezależne od platformy C*
- *Obsługiwane interfejsy SPI i I²C*
- *Dostępne w publicznym repozytorium GitHub firmy STMicroelectronics*