

POMIARY WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI
Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Prezentacja do wykładu dla EMST

Semestr letni

Wykład nr 12



Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał ten udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Pomiar Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane tą tematyką. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Pomiary Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności samodzielnego sporządzania **notatek z wykładów** ani też nie zastępuje studiowania obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na kolokwium zaliczeniowym.

Obowiązujący jest **zakres materiału wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

Tematyka wykładu

Parametry ruchu drgającego

Czujnik z masą inercyjną – podstawowe właściwości

Odmiany czujników : wibrometr, czujnik prędkości, akcelerometr

Konstrukcje czujników przyśpieszenia - akcelerometrów

Zastosowania czujników przyśpieszenia

Podstawowe pojęcia: oscylacje i drgania

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.

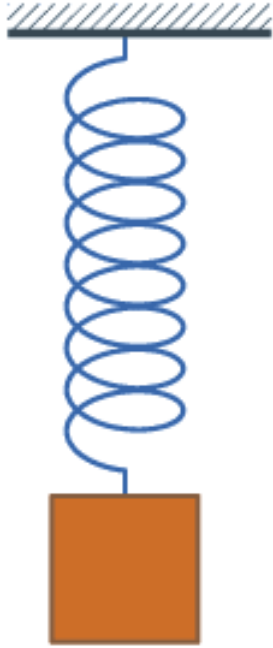
Drgania - oscylacje zachodzące w układach fizycznych. Możemy wyróżnić: drgania elektryczne, elektromagnetyczne, magnetyczne, mechaniczne i inne.

Podstawowe pojęcia: drgania mechaniczne i wibracje

Drgania mechaniczne - okresowe zmiany położenia ciała fizycznego względem położenia równowagi, np.: drgania wahadła matematycznego, wahadła fizycznego, masy zawieszonyj na sprężynie, 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.

Parametry ruchu drgającego



Przemieszczenie $x(t)$ - położenie drgającego ciała względem punktu równowagi wyrażane w [m]

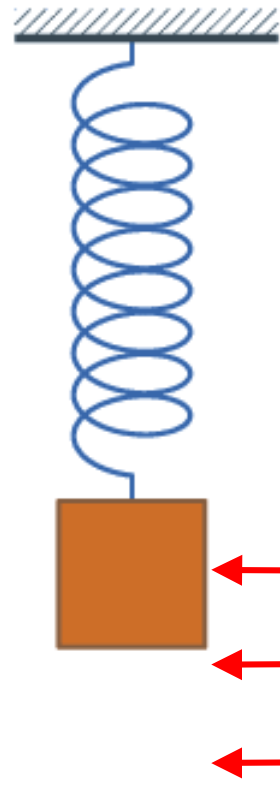
Prędkość $v(t)$ - pochodna położenia $x(t)$ względem czasu

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

Przyspieszenie $a(t)$ - pochodna prędkości $v(t)$ względem czasu

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

Częsty przypadek – drgania harmoniczne



amplituda [m]

pulsacja [rad/s]

$$x(t) = X_m \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi f$$

częstotliwość [Hz=1/s]

$$T = \frac{1}{f}$$

okres [s]

Drgania harmoniczne – zależności

Przemieszczenie $x(t)$

$$x(t) = X_m \sin(\omega t) \qquad \omega = 2\pi f$$

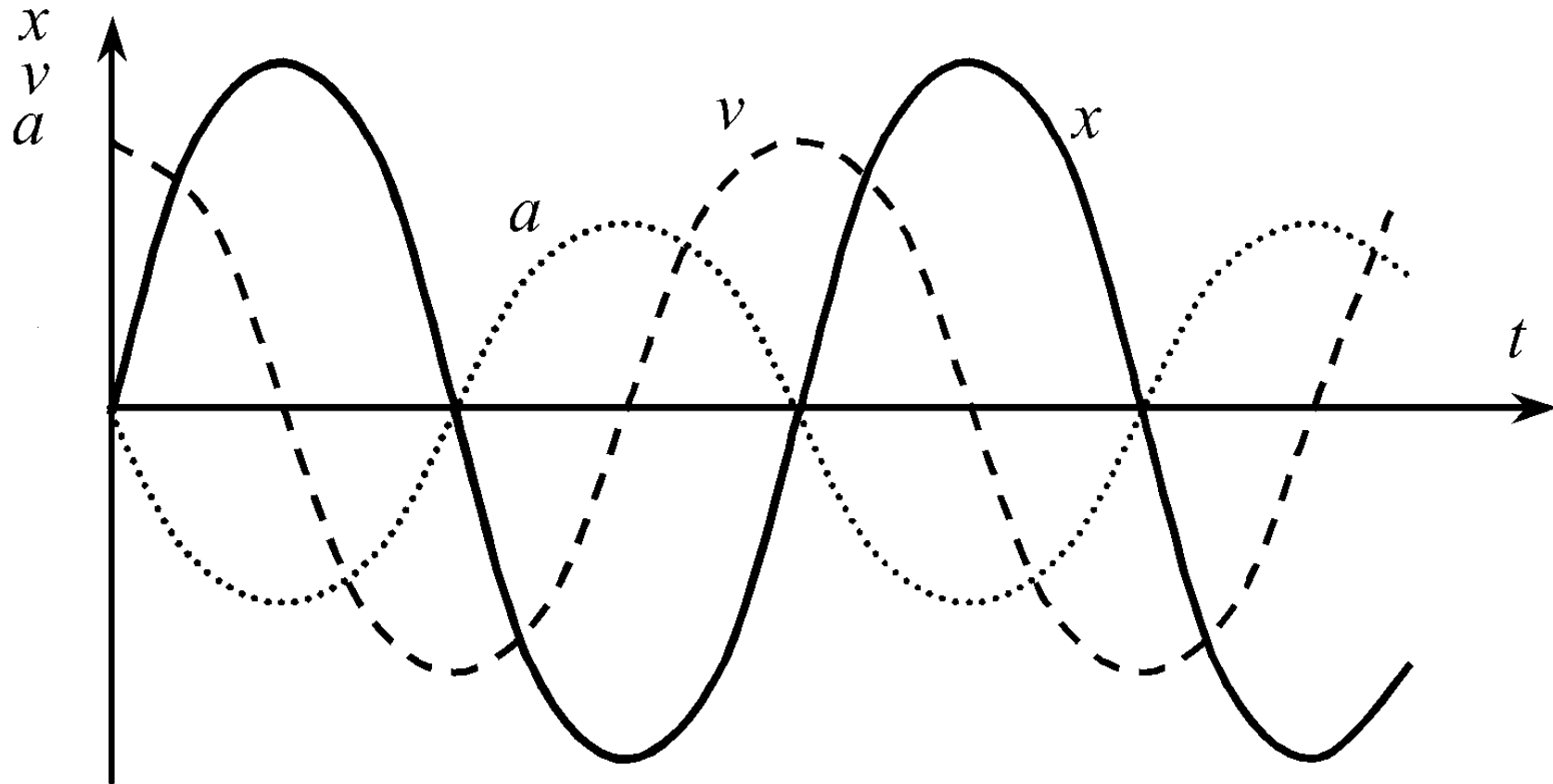
Prędkość $v(t)$

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

Przyspieszenie $a(t)$

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

Drgania harmoniczne – przebiegi czasowe



Zasada działania czujnika przyspieszenia

Podstawowym rodzajem czujnika do pomiarów przyspieszeń jest przetwornik z **masą inercyjną (masą sejsmiczną)** połączoną z obudową, a tym samym również z obiektem drgającym poprzez **element sprężysty i układ tłumiący**.

Masa m , stała k_s elementu sprężystego oraz stopień tłumienia B decydują o właściwościach przetwornika z masą inercyjną.

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.

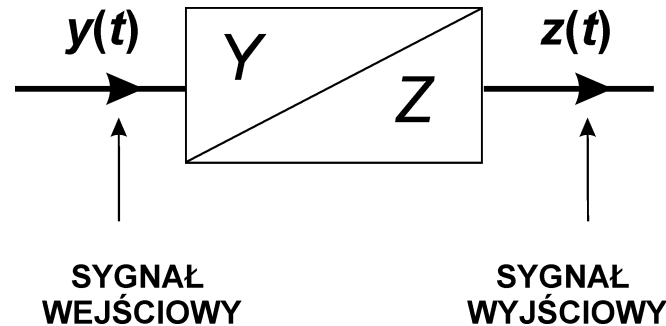
Współrzędne x, y, z

Ruch masy inercyjnej opisuje się za pomocą trzech współrzędnych:

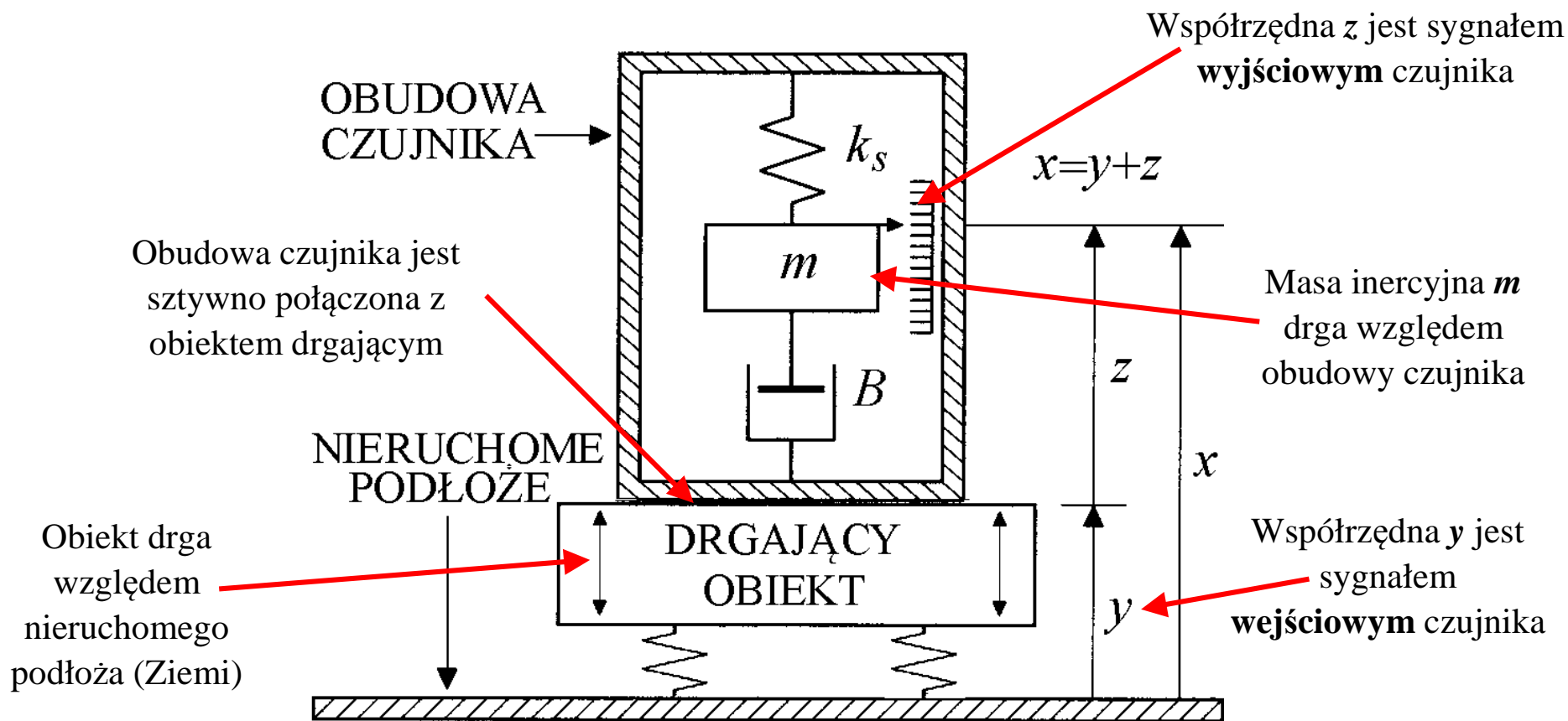
- x -współrzędna opisująca ruch masy inercyjnej względem zewnętrznego układu odniesienia (np. względem Ziemi),
- y -współrzędna opisująca ruch obudowy czujnika (sztywno połączonej z obiektem drgającym) względem zewnętrznego układu odniesienia (np. względem ziemi),
- z -współrzędna opisująca ruch masy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

Sygnał wejściowy i wyjściowy czujnika

Współrzędna y (opisująca drgania obiektu) jest sygnałem wejściowym czujnika, a współrzędna z (opisująca ruch masy względem obudowy czujnika) jest sygnałem wyjściowym czujnika.



Model dynamiczny czujnika parametrów drgań



Model mechaniczny czujnika z masą inercyjną m

Opis ruchu masy sejsmicznej

Wszystkie siły działające w układzie równoważą się:

$$F_m + F_B + F_s = 0$$

gdzie:

F_m – siła bezwładności

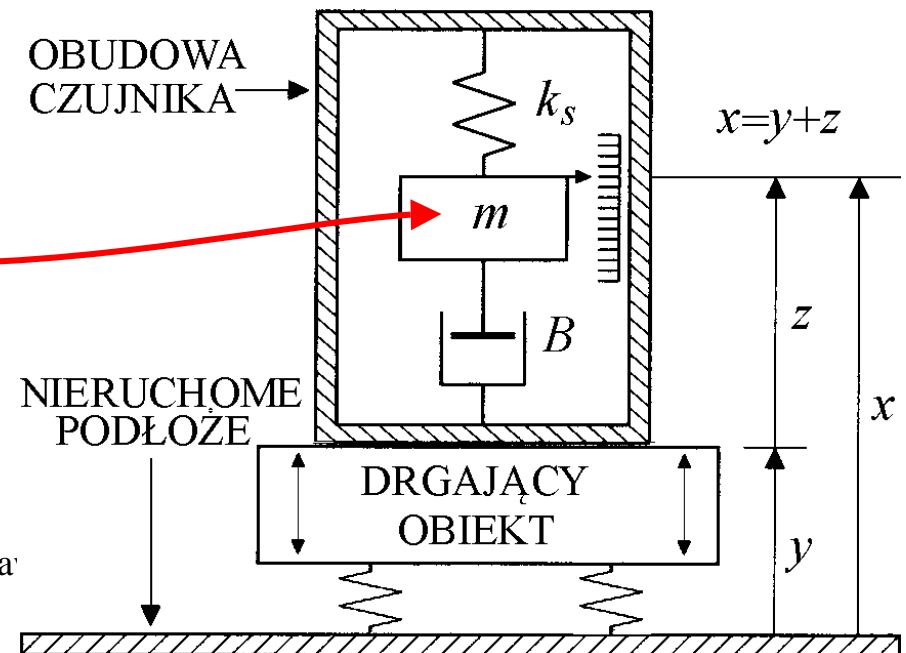
F_B – siła tłumiąca

F_s – siła sprężystości

Siła bezwładności F_m

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

$$F_m = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$



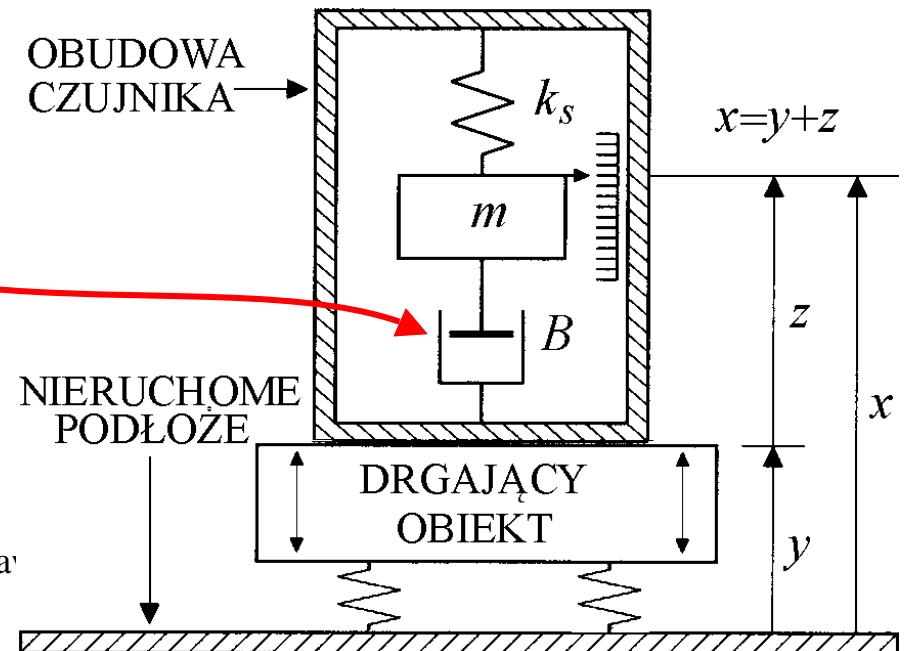
Siła tłumiąca F_B

Siła tłumiąca F_B jest proporcjonalna do prędkości ruchu v masy inercyjnej względem obudowy czujnika oraz stopnia tłumienia B , ponieważ element tłumiący znajduje się wewnątrz czujnika pomiędzy masą inercyjną a obudową:

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

uwzględniając że:

$$z = x - y$$



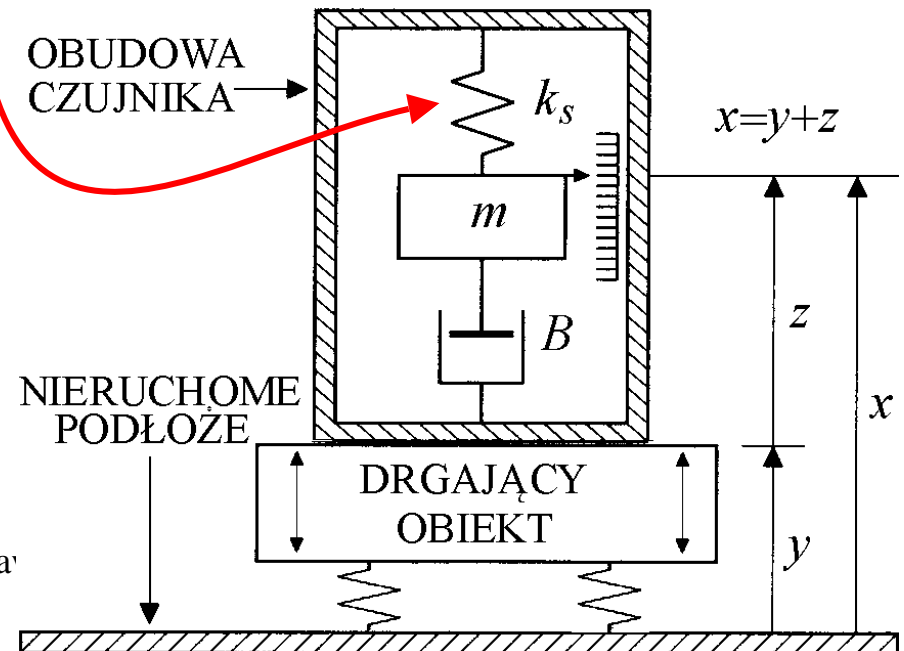
Siła sprężystości F_s

Siła sprężystości F_s jest proporcjonalna do przemieszczenia z masy inercyjnej względem obudowy czujnika i stałej sprężystości sprężyny k_s :

$$F_s = k_s z = k_s (x - y)$$

uwzględniając że:

$$z = x - y$$



Równanie różniczkowe opisujące czujnik parametrów drgań

Po podstawieniu zależności na siły do pierwszego równania otrzymamy równanie różniczkowe drugiego rzędu :

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

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

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

Równanie różniczkowe opisujące czujnik

Wprowadzamy oznaczenia:

Pulsacja rezonansowa ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_s}{m}}$$

Współczynnik tłumienia b :

$$b = \frac{B}{2\sqrt{k_s m}}$$

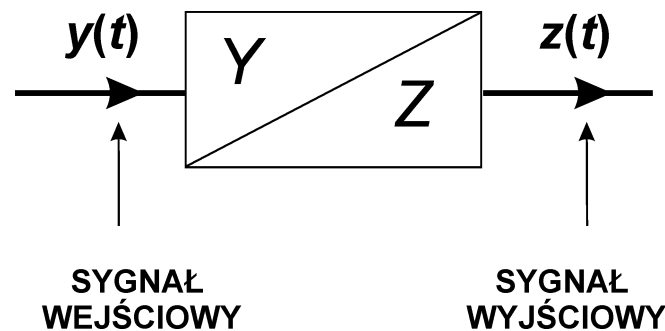
Równanie przetwornika drugiego rzędu

Otrzymujemy równanie różniczkowe przetwornika drugiego rzędu :

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2b\omega_0 \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z = -\frac{d^2 y}{dt^2}$$

Prawa strona równania opisuje przyspieszenie y obudowy czujnika (obiektu drgającego) – jest to wielkość mierzona, czyli wielkość **wejściowa** czujnika.

Lewa strona równania opisuje ruch masy inercyjnej z względem obudowy czujnika – jest to wielkość **wyjściowa** czujnika.



Rodzaje czujników parametrów drgań

Można rozważyć trzy szczególne przypadki:

- 1) masa m , - duża, stopień tłumienia B – mały, stała k_s – mała
- 2) masa m , - mała, stopień tłumienia B – duży, stała k_s – mała
- 3) masa m , - mała, stopień tłumienia B – mały, stała k_s – duża

W konkretnym rozwiązaniu czujnika jeden z efektów dominuje nad dwoma pozostałymi, których wpływ na pracę czujnika staje się wtedy praktycznie pomijalny.

Przypadek pierwszy - wibrometr

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

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{d^2 y}{dt^2}$$

czyli że:

$$\begin{aligned} z &= -y \\ x &= 0 \end{aligned}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_s}{m}}$$

$$b = \frac{B}{2\sqrt{k_s m}}$$

$$z = x - y$$

Masa sejsmiczna jest nieruchoma względem zewnętrznego układu odniesienia, sygnał wyjściowy z jest proporcjonalny do przemieszczenia czujnika $-y$, taki czujnik nazywamy **wibrometrem**.

Przypadek drugi – czujnik prędkości

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

$$2b\omega_0 \frac{dz}{dt} \cong -\frac{d^2 y}{dt^2} \qquad \omega_0 = \sqrt{\frac{k_s}{m}}$$

czyli że:

$$z = -\frac{1}{2b\omega_0} \frac{dy}{dt} \qquad b = \frac{B}{2\sqrt{k_s m}}$$

Sygnał wyjściowy z jest proporcjonalny do prędkości czujnika, takie czujnik są rzadko stosowane ze względu na małą czułość wynikającą z dużego b .

Przypadek trzeci - akcelerometr

3) masa m , - małą, stopień tłumienia B – mały, 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:

$$\omega_0^2 z = -\frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_s}{m}}$$

czyli że:

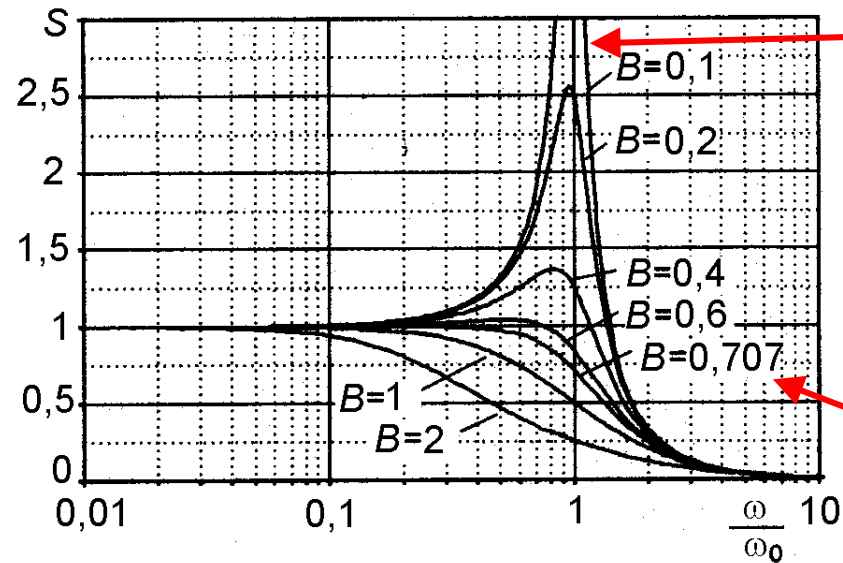
$$z = -\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$b = \frac{B}{2\sqrt{k_s m}}$$

Sygnał wyjściowy z jest proporcjonalny do przyspieszenia obiektu drgającego, taki czujnik nazywamy **akcelerometrem**.

Ten rodzaj czujnika drgań jest najczęściej stosowany.

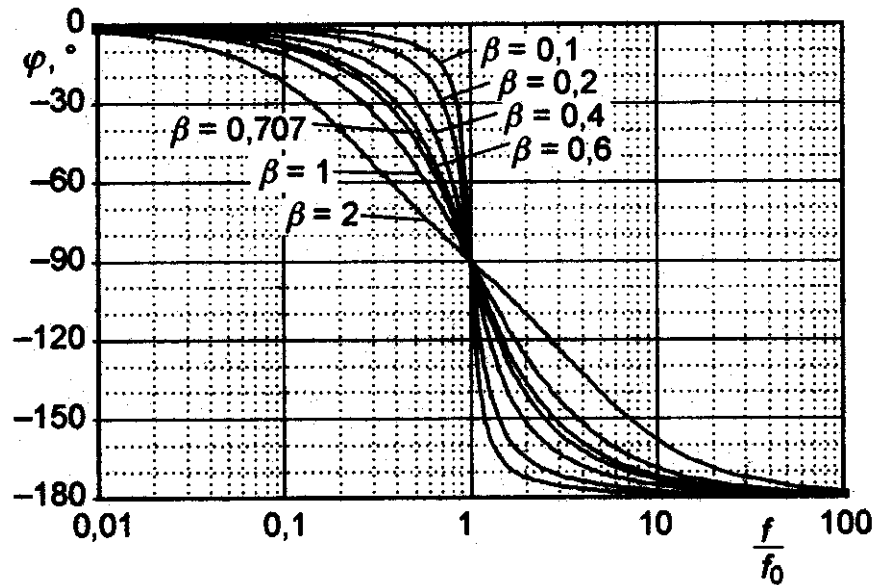
Charakterystyki częstotliwościowe



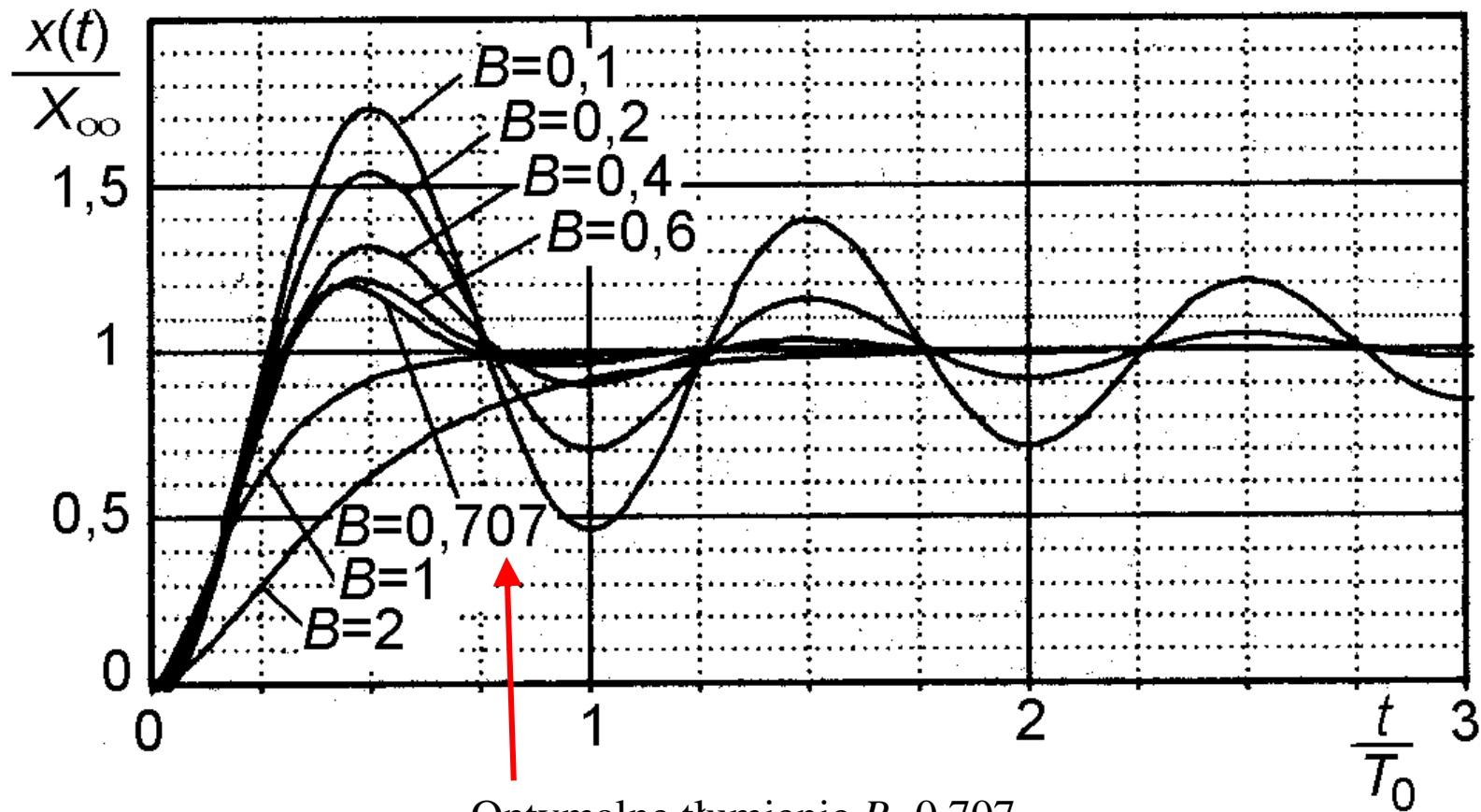
Dla małego tłumienia B występuje silny rezonans mechaniczny w czujniku

Optymalne tłumienie $B=0,707$

daje najszersze pasmo przenoszenia czujnika



Charakterystyka skokowa



Optymalne tłumienie $B=0,707$

daje najszybsze ustalenie sygnału wyjściowego czujnika

Przykład rzeczywistego przetwornika z masą inercyjną

PRODUCT DATA

Piezoelectric Accelerometer
Charge Accelerometer — Type 4370, 4370 S and 4370 V

FEATURES

- General purpose
- High sensitivity
- Low-level, low-frequency measurements



Skalowany przyspieszeniem 10g dla częstotliwości 159,2Hz

Description

Type 4370 is a piezoelectric, DeltaShear[®], Unigain[®] accelerometer with top connector. Type 4370 features 10-32 UNF receptacle for output connection and can be mounted on the object by means of a 10-32 UNF threaded steel stud.

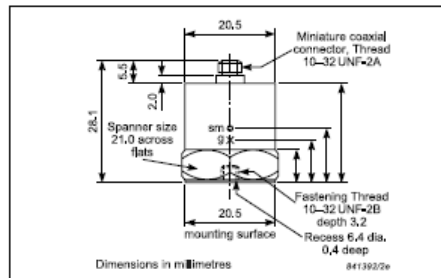
Calibration

The sensitivity given in the calibration chart has been measured at 159.2 Hz and an acceleration of 10 g. For 99.9% confidence level, the accuracy of the factory calibration is $\pm 2\%$.

Characteristics

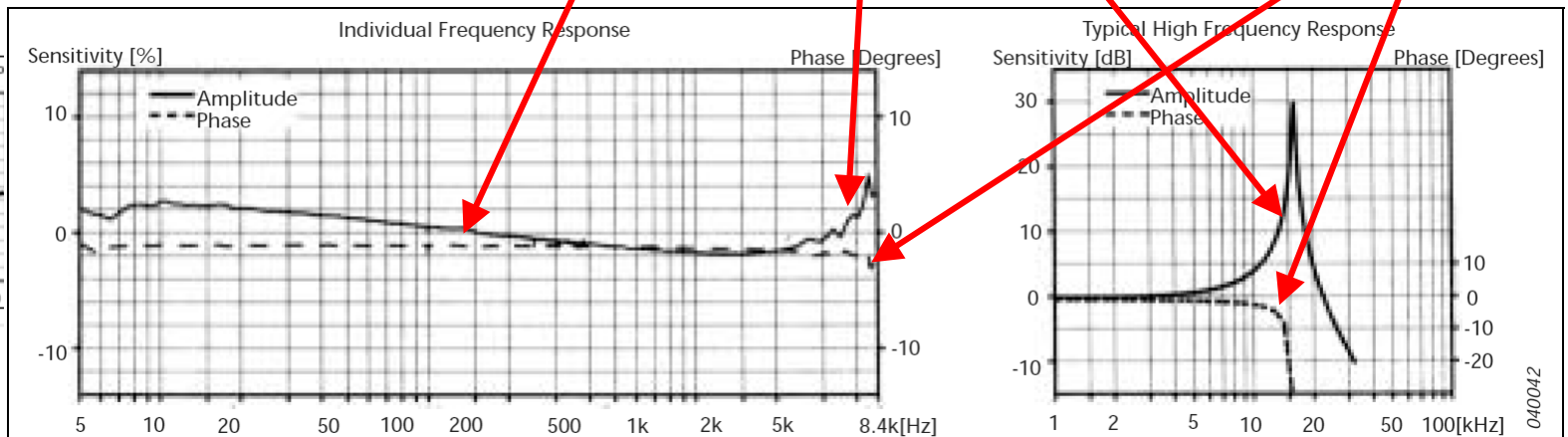
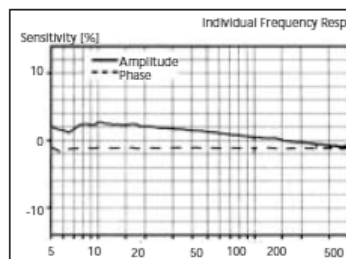
This piezoelectric accelerometer may be treated as a charge source. Its sensitivity is expressed in terms of charge per unit acceleration (pC/g).

The DeltaShear design involves three piezoelectric elements and three masses arranged in a triangular configuration around a triangular centre post. The ring prestresses the piezoelectric elements to give a high degree of linearity. The charge is collected between the housing and the clamping ring. The piezoelectric element used is a PZ 23 lead zirconate titanate element. The housing material is stainless steel.



Charakterystyka amplitudowa

Charakterystyka fazowa

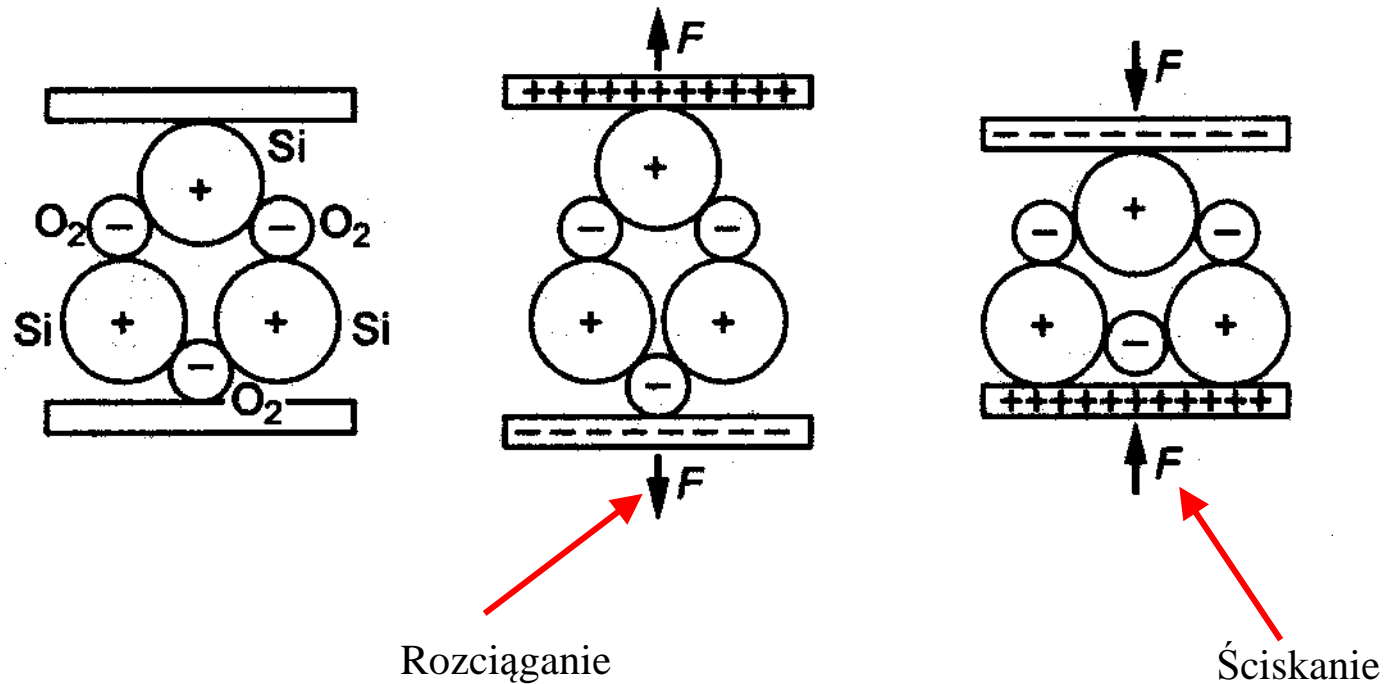


Generowanie wyjściowego sygnału elektrycznego

Sygnałem uzyskiwanym z czujnika jest przemieszczenie z masy inercyjnej względem obudowy czujnika. Ten sygnał należy **zamienić na sygnał elektryczny**. Wykorzystuje się w tym celu:

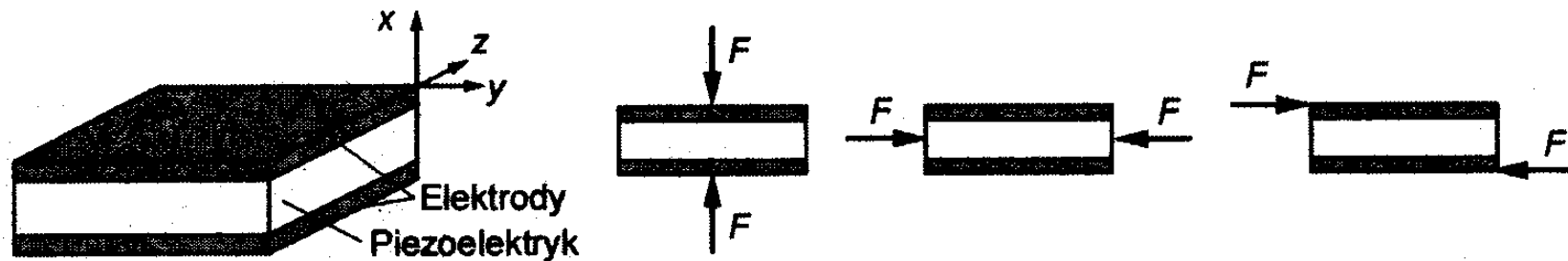
1. przetworniki piezoelektryczne,
2. przetworniki pojemnościowe,
3. przetworniki piezorezystancyjne,
4. przetworniki magnetoelektryczne,
5. przetworniki światłowodowe,
6. przetworniki hallotronowe,
7. przetworniki termiczne i inne.

Czujniki piezoelektryczne, zjawisko fizyczne



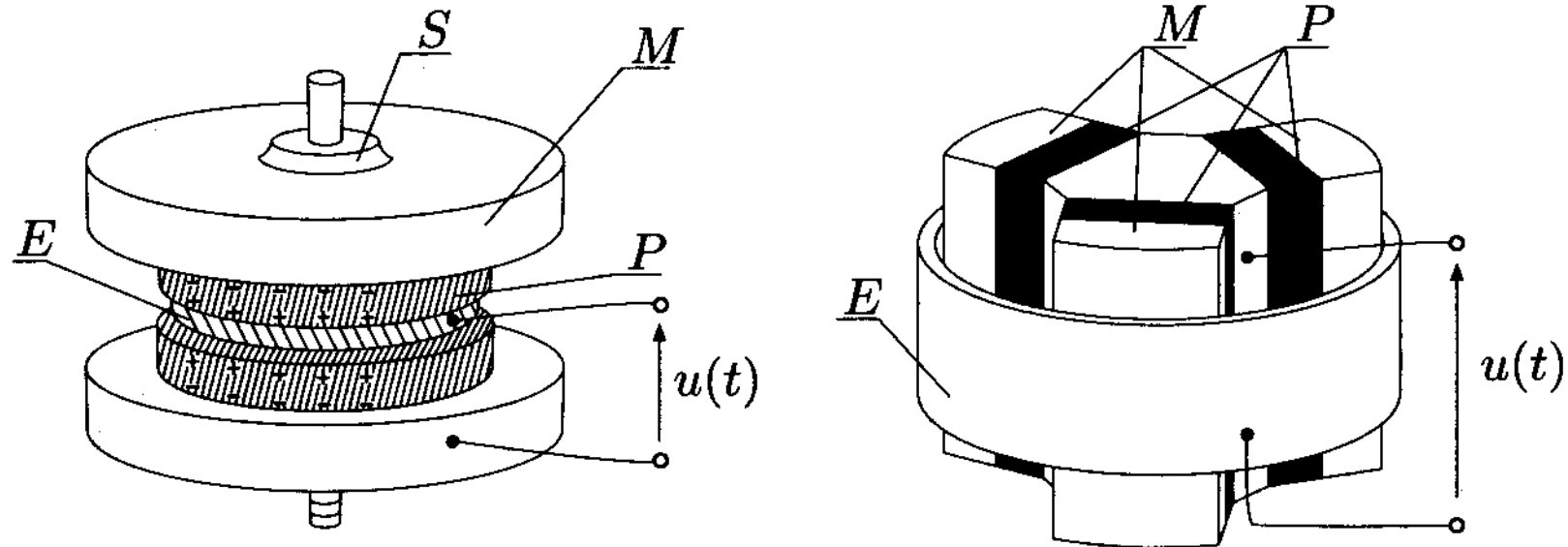
Efekt piezoelektryczny, np. w kryształach górskich

Czujniki piezoelektryczne, zasada konstrukcji



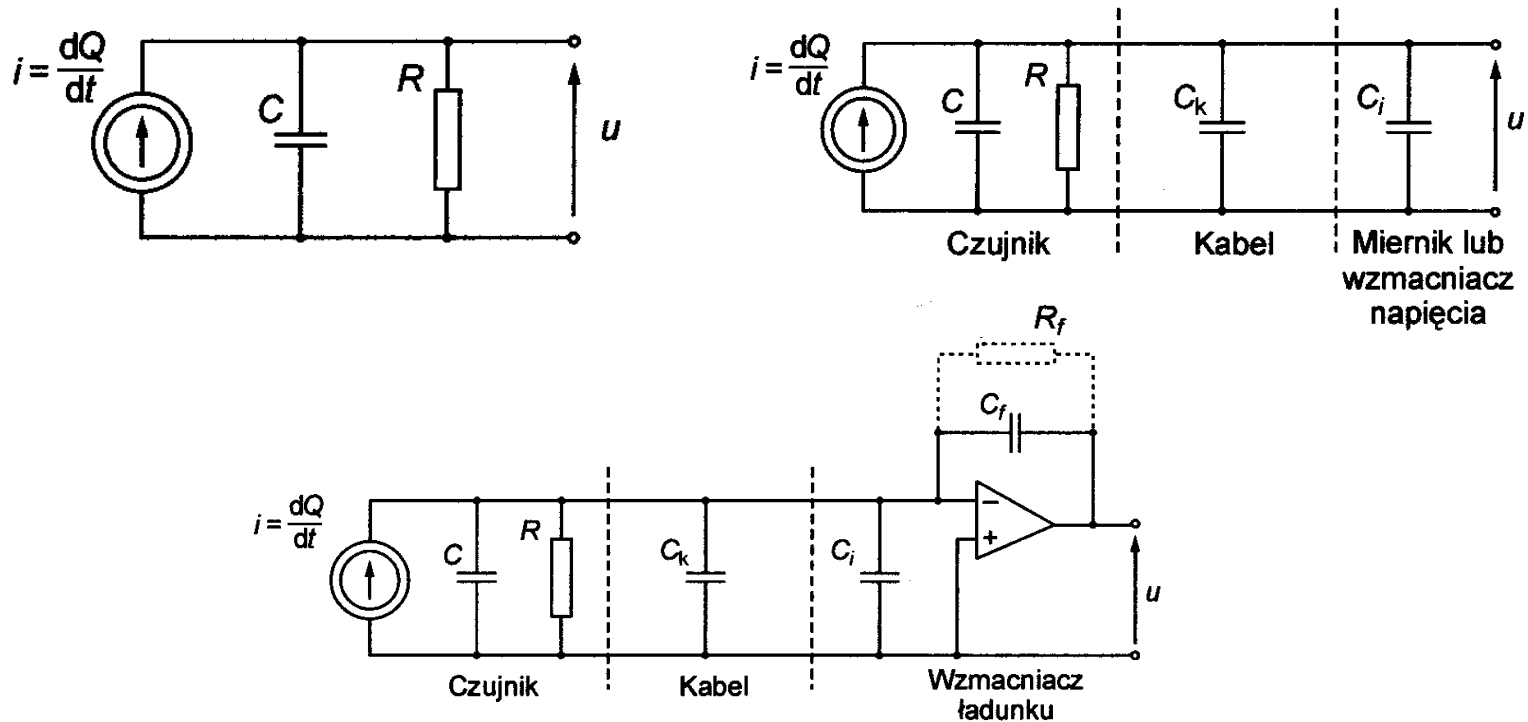
Rodzaje czujników piezoelektrycznych: konstrukcja czujnika, oddziaływanie sił podłużnych, oddziaływanie sił poprzecznych, oddziaływanie sił ścinających

Czujniki piezoelektryczne, ściskane i ścinane



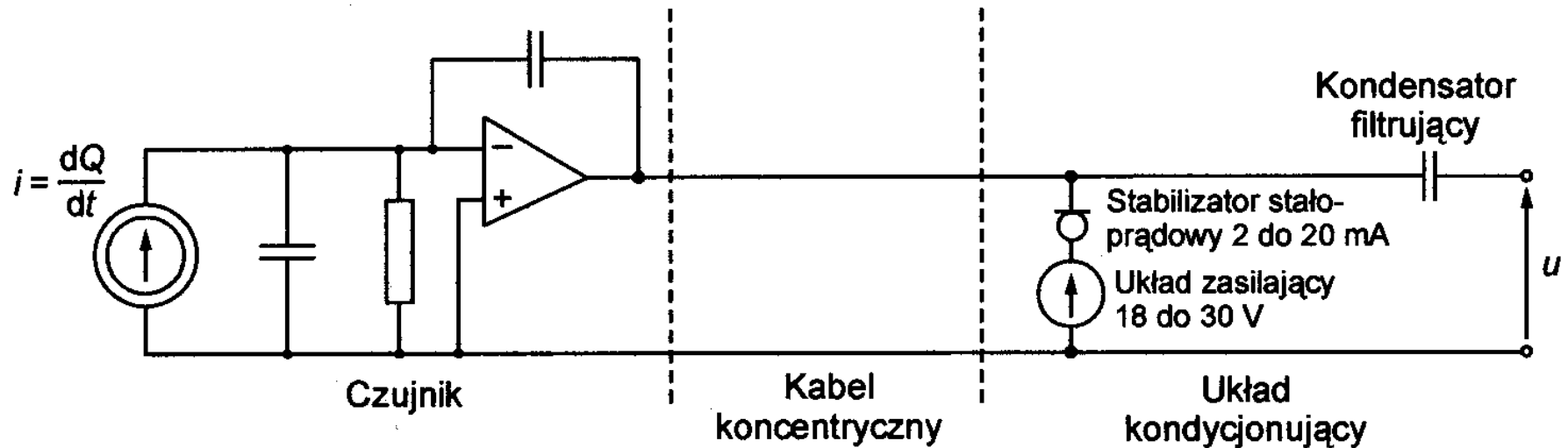
Konstrukcja czujnika z oddziaływaniem sił podłużnych (ściskających) i z oddziaływaniem sił ścinających

Czujniki piezoelektryczne, układ pomiarowy



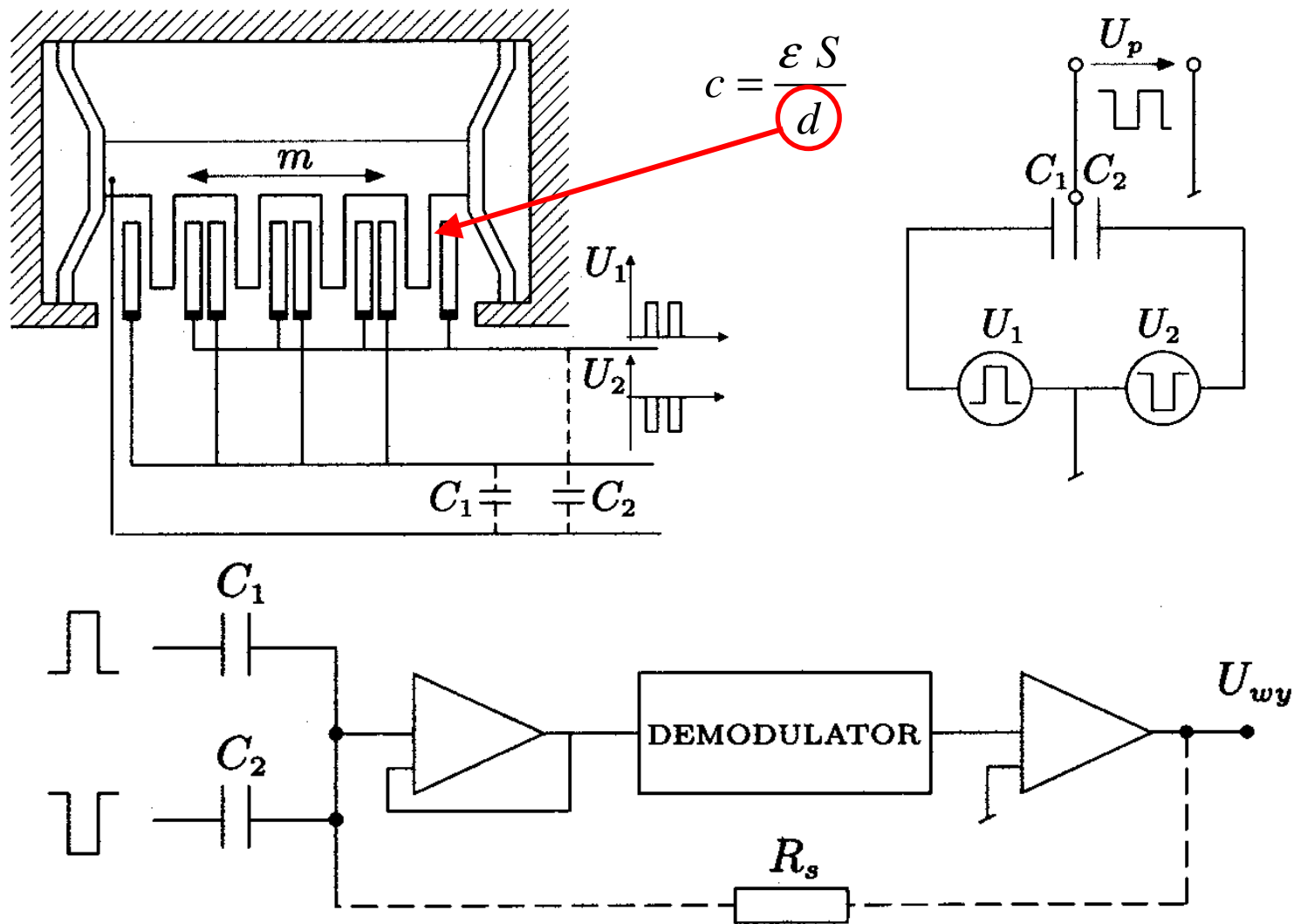
Schemat zastępczy czujnika piezoelektrycznego, wpływ kabla i zastosowanie wzmacniacza ładunkowego

Czujnik piezoelektryczny z wbudowanym wzmacniaczem

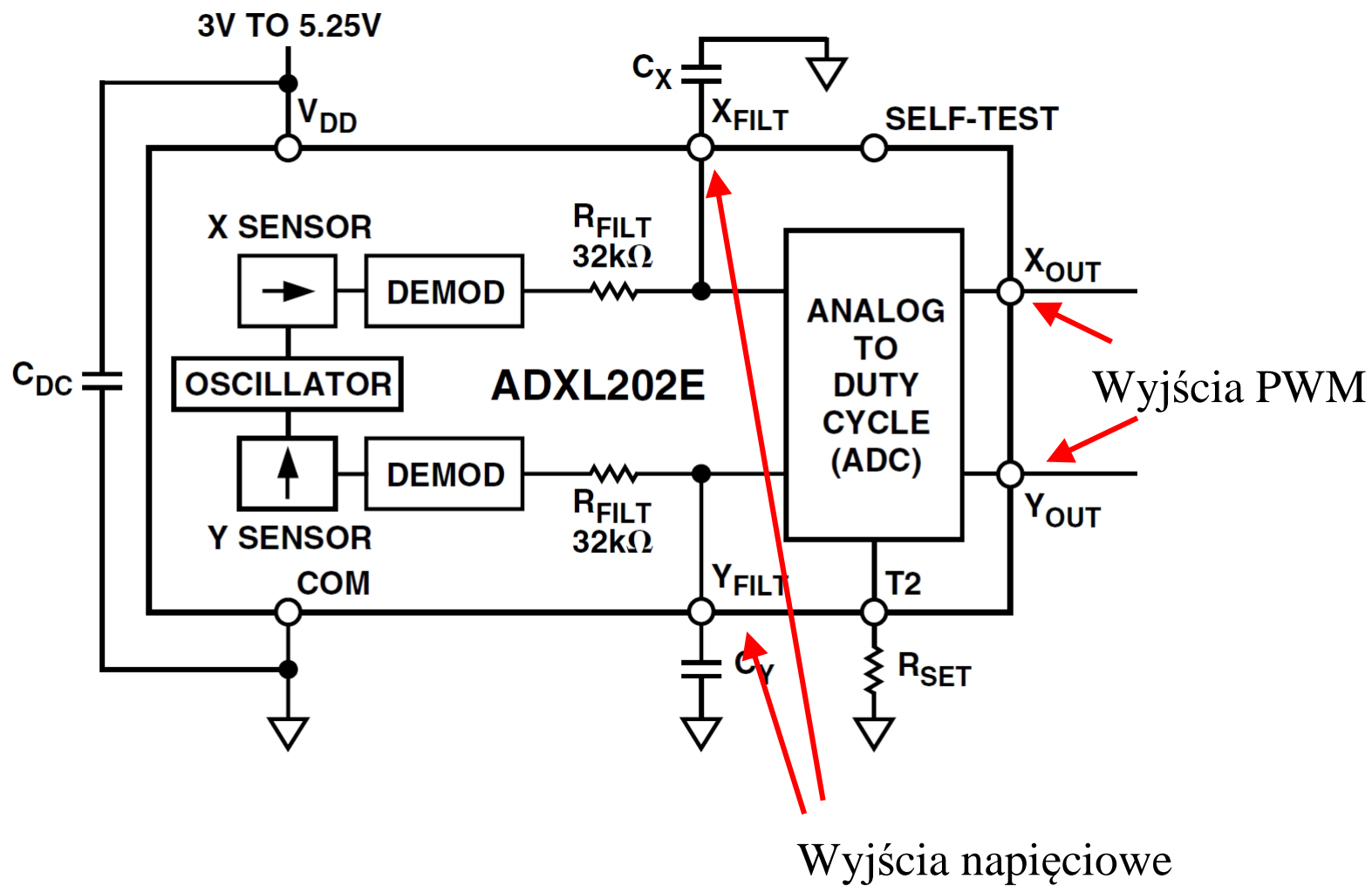


Wbudowanie wzmacniacza do czujnika eliminuje negatywny wpływ kabla połączeniowego

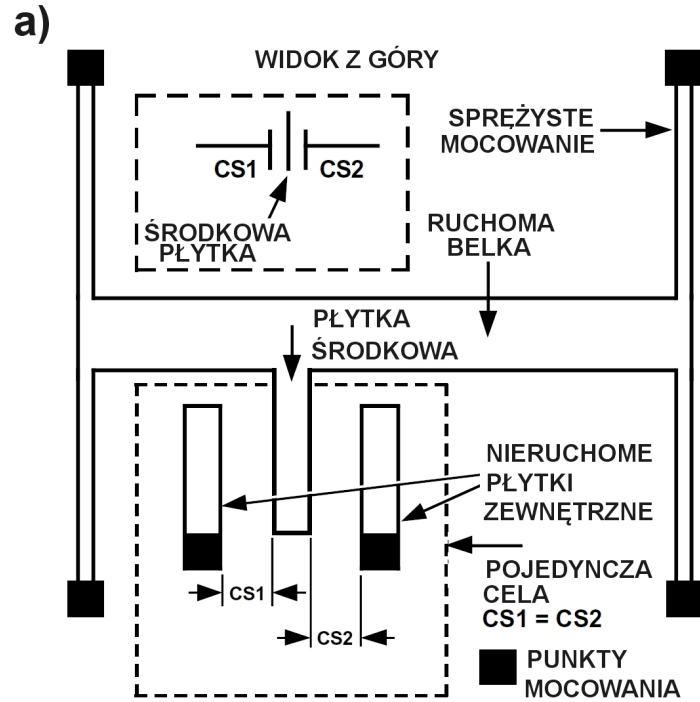
Czujniki pojemnościowe z rodziny ADXL Analog Devices



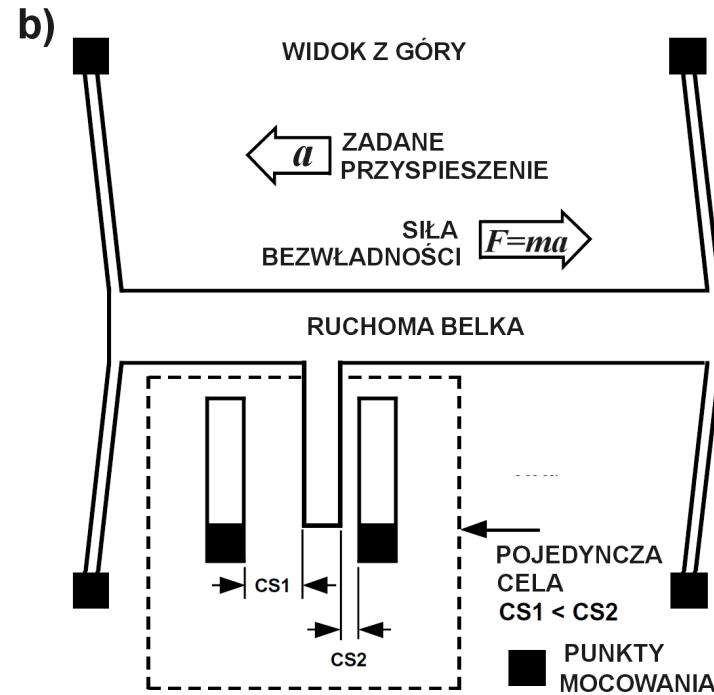
Czujnik ADXL202JE zastosowany w laboratorium PWN



Czujnik ADXL202JE konstrukcja mechaniczna



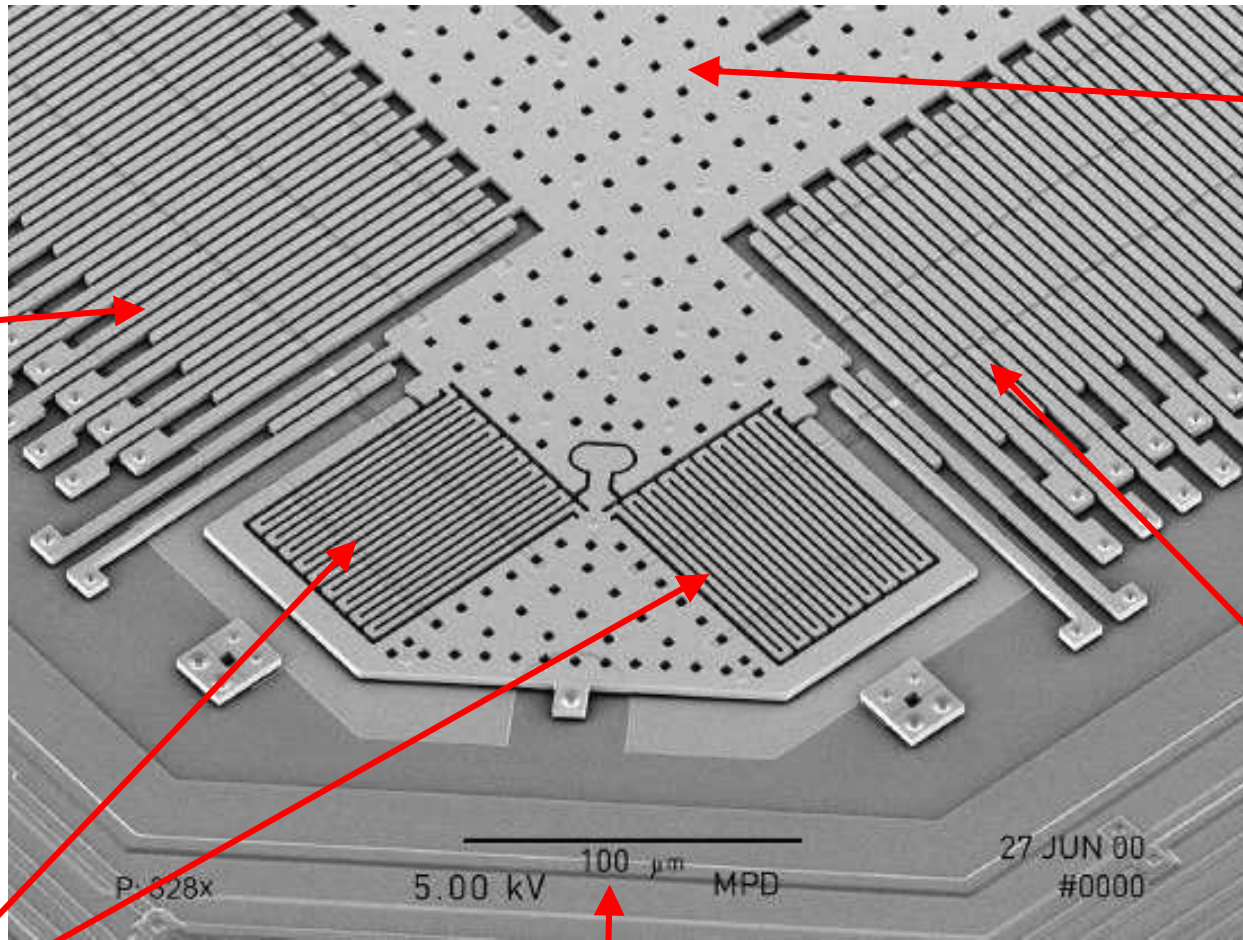
Czujnik w spoczynku



Czujnik poddany przyspieszeniu

Czujnik ADXL202JE konstrukcja mechaniczna

Przetwornik pojemnościowy
w kanale Y



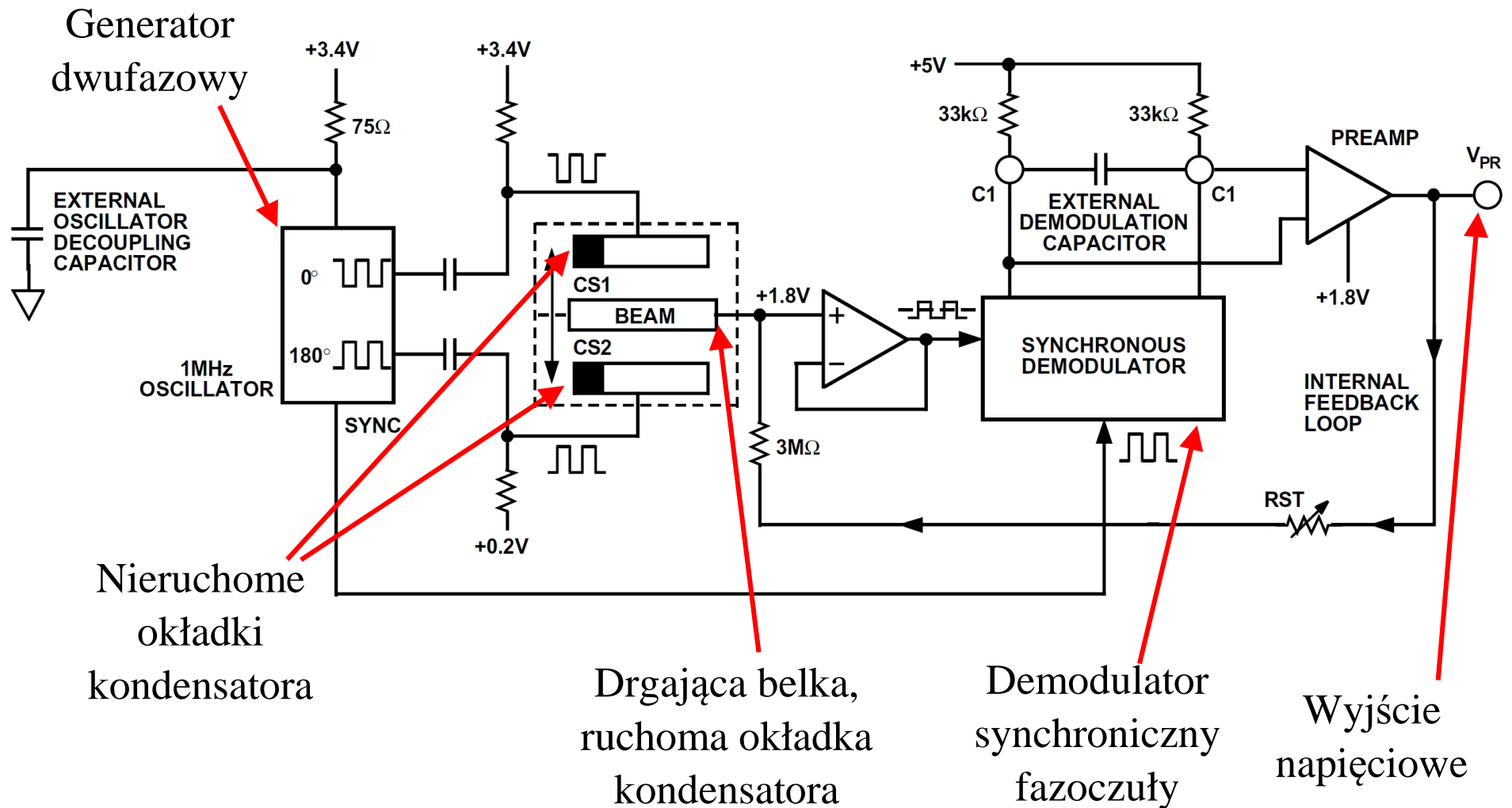
Masa sejsmiczna,
drgająca belka

Przetwornik pojemnościowy
w kanale X

Sprężyste
zawieszenie belki

Zdjęcie z mikroskopu elektronowego,
 $100\mu\text{m}=0,1\text{mm}$

Czujnik ADXL202JE część elektroniczna analogowa



Czujnik ADXL202JE – linki do dodatkowych informacji

Karta katalogowa czujnika ADXL202E

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL202E.pdf>

How MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer Work & Arduino Tutorial YouTube

<https://youtu.be/eqZgxR6eRjo>

Moduł akcelerometru z odczytem analogowym - ADXL335 Arduino - YouTube

<https://youtu.be/fGVZpqbWko4>

Moduł - Akcelerometr i żyroskop MPU-6050 I2C - YouTube

<https://youtu.be/BeJyiCBUXEE>

How accelerometer works? Working of accelerometer in a smartphone. YouTube

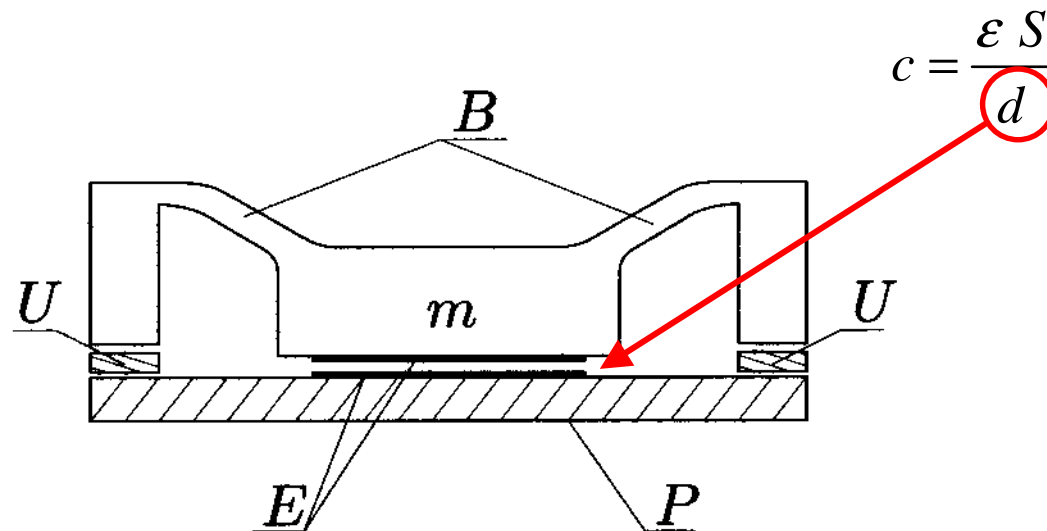
https://youtu.be/T_iXLNkkjFo

How To Track Orientation with Arduino | ADXL345 Accelerometer Tutorial YouTube

<https://youtu.be/KMhbV1p3MWk>

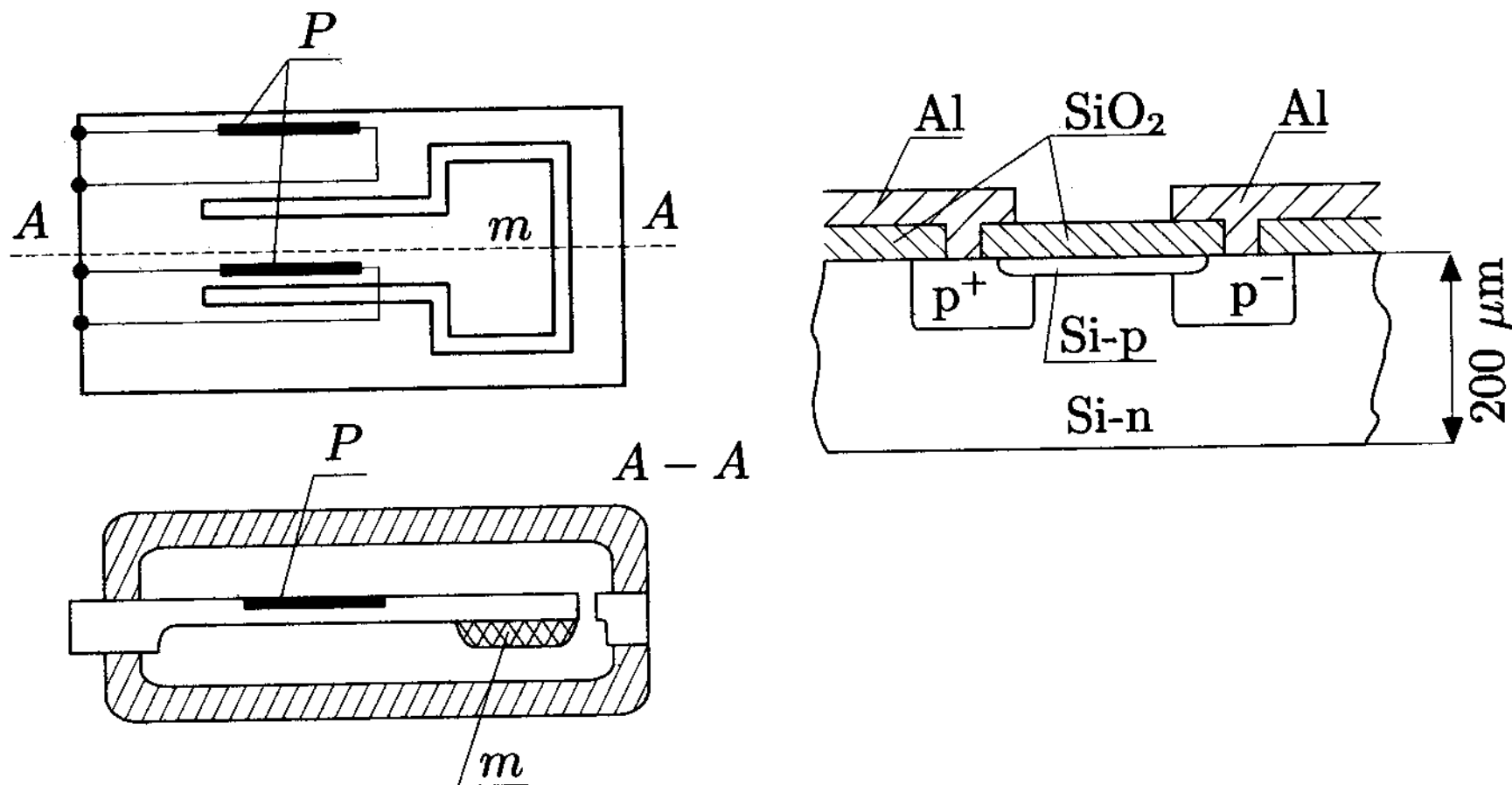
Więcej materiałów w ćwiczeniu 7 na laboratorium PWN

Inne konstrukcje czujnika z przetwornikiem pojemnościowym



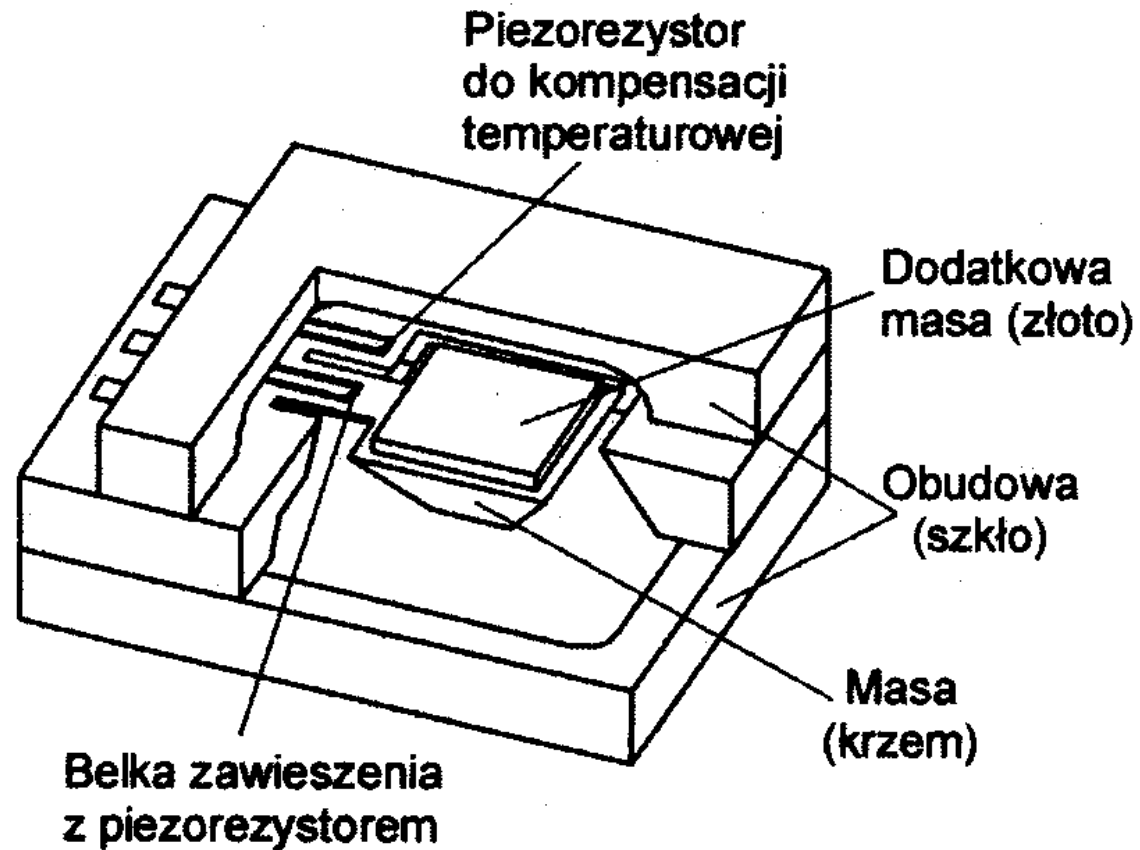
Inna konstrukcja pojemnościowego czujnika przyspieszenia

Czujnik z przetwornikiem piezorezystancyjnym



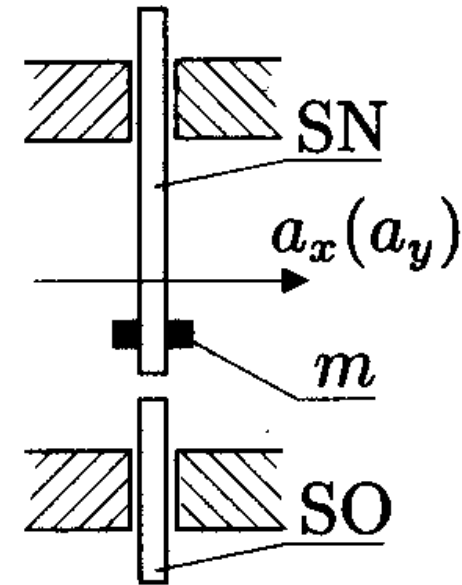
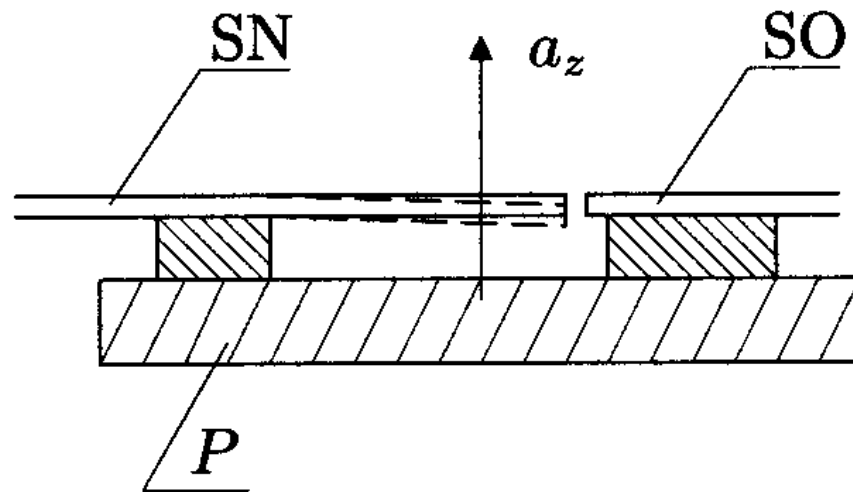
Przetwornik piezorezystancyjny w technologii MEMS

Czujnik z przetwornikiem piezorezystancyjnym



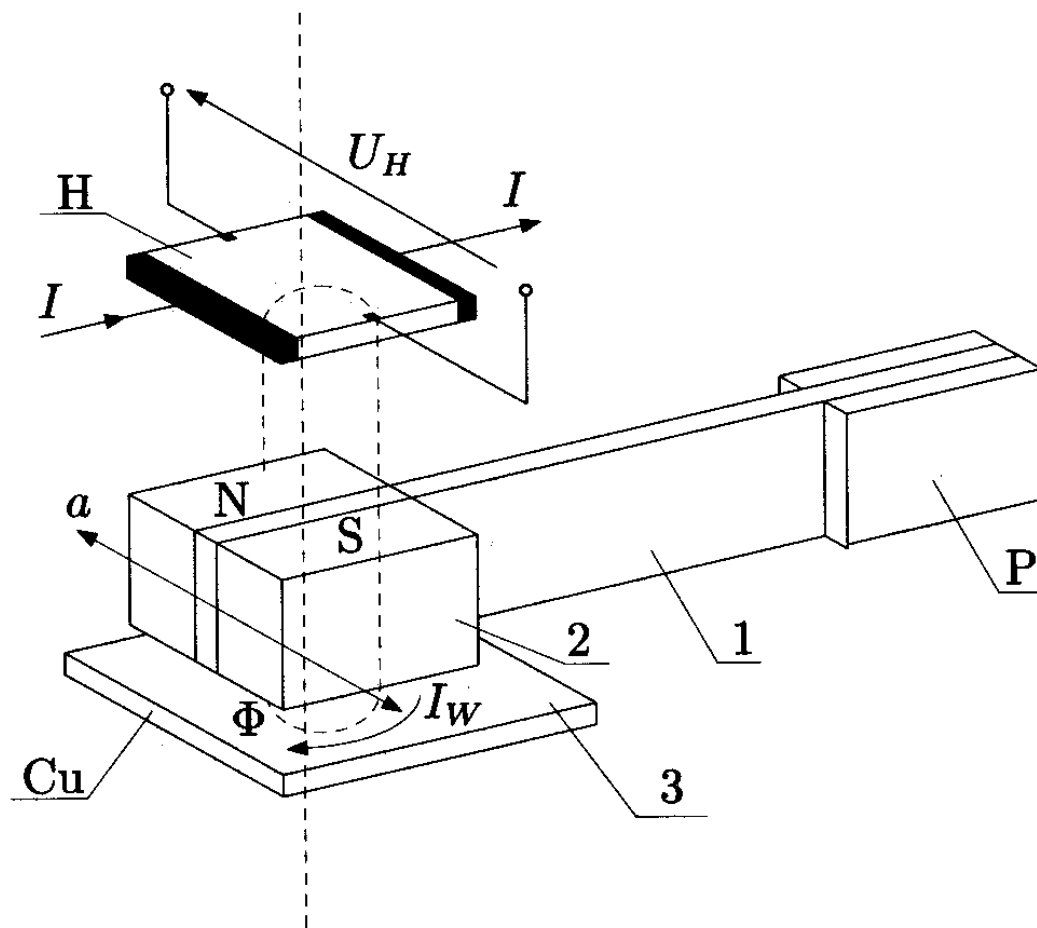
Przetwornik piezorezystancyjny w technologii MEMS

Czujnik z przetwornikiem światłowodowym

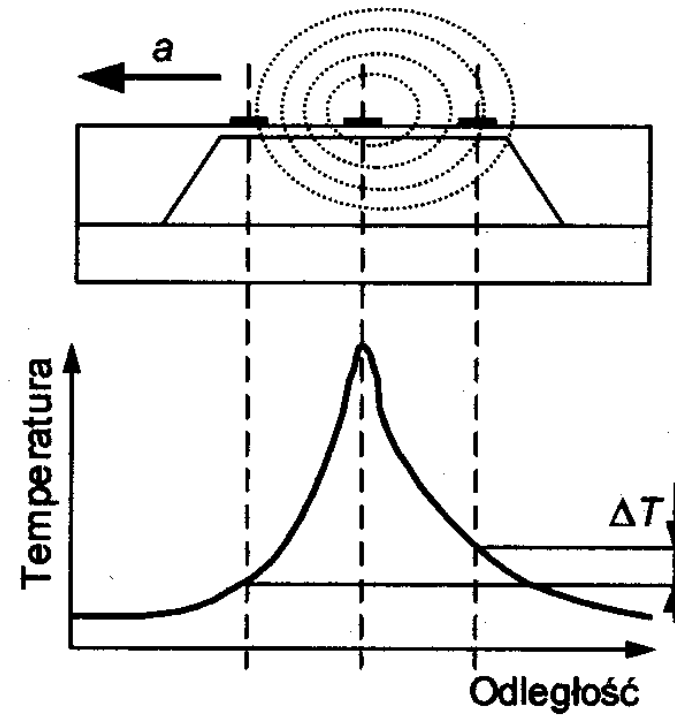
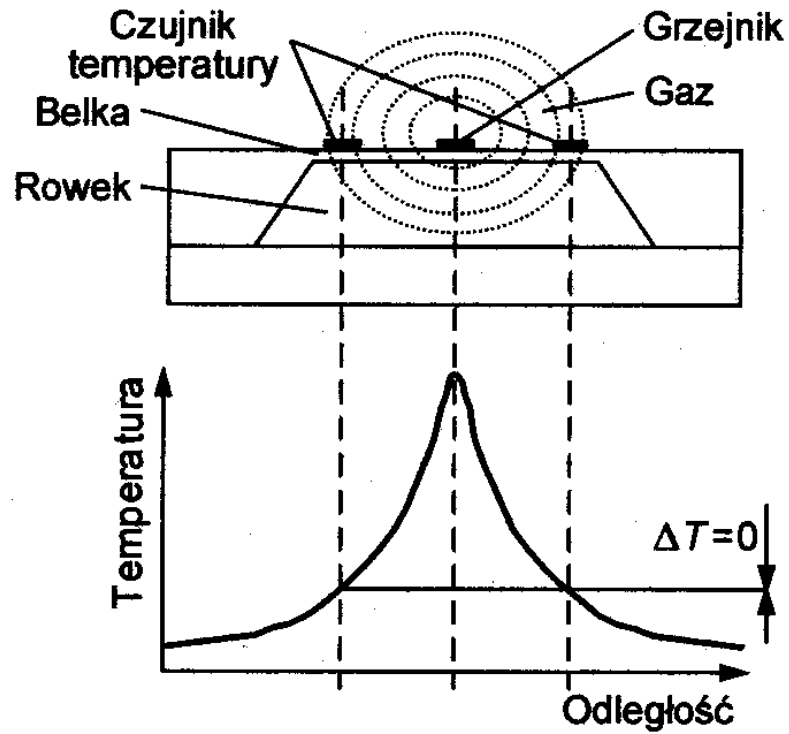


Przetwornik przyspieszenia w kierunku pionowym i poziomym

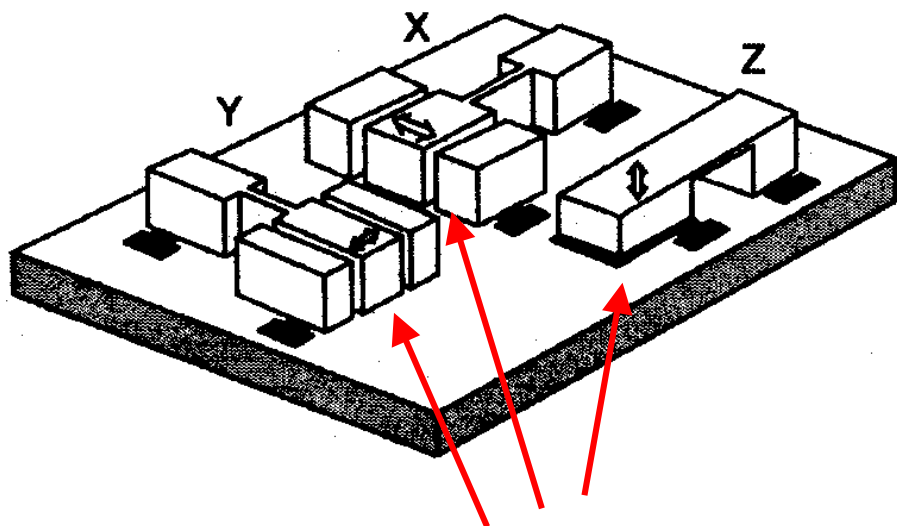
Czujnik z przetwornikiem hallotronowym



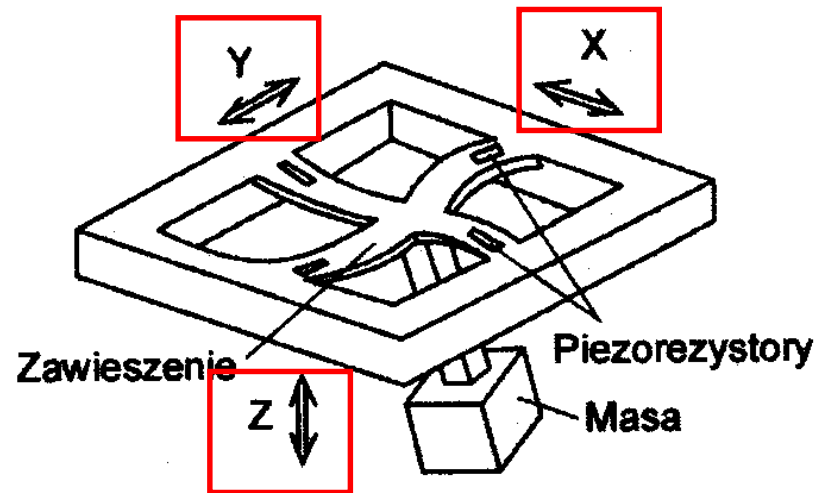
Czujnik z przetwornikiem termicznym



Czujniki wieloosiowe 2D - 3D

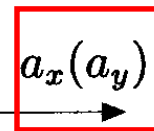
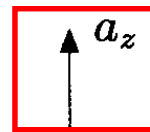
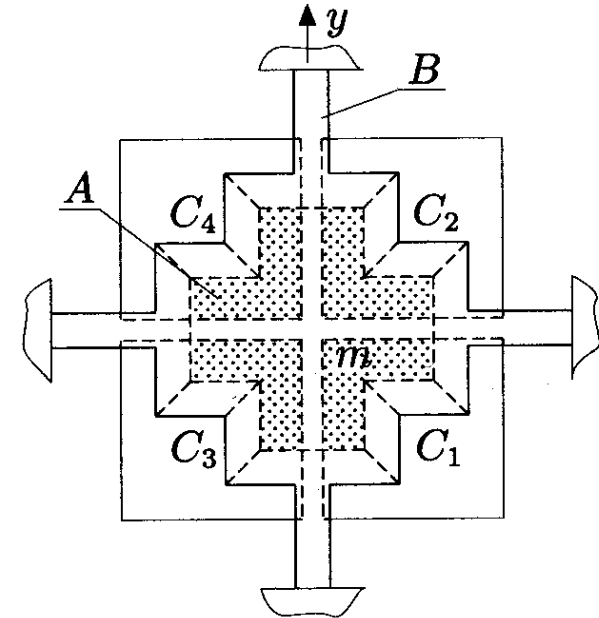
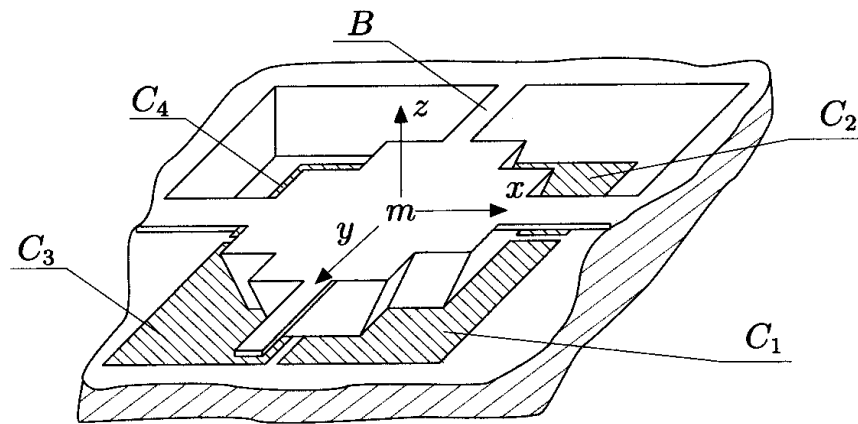


Czujniki jednoosiowe

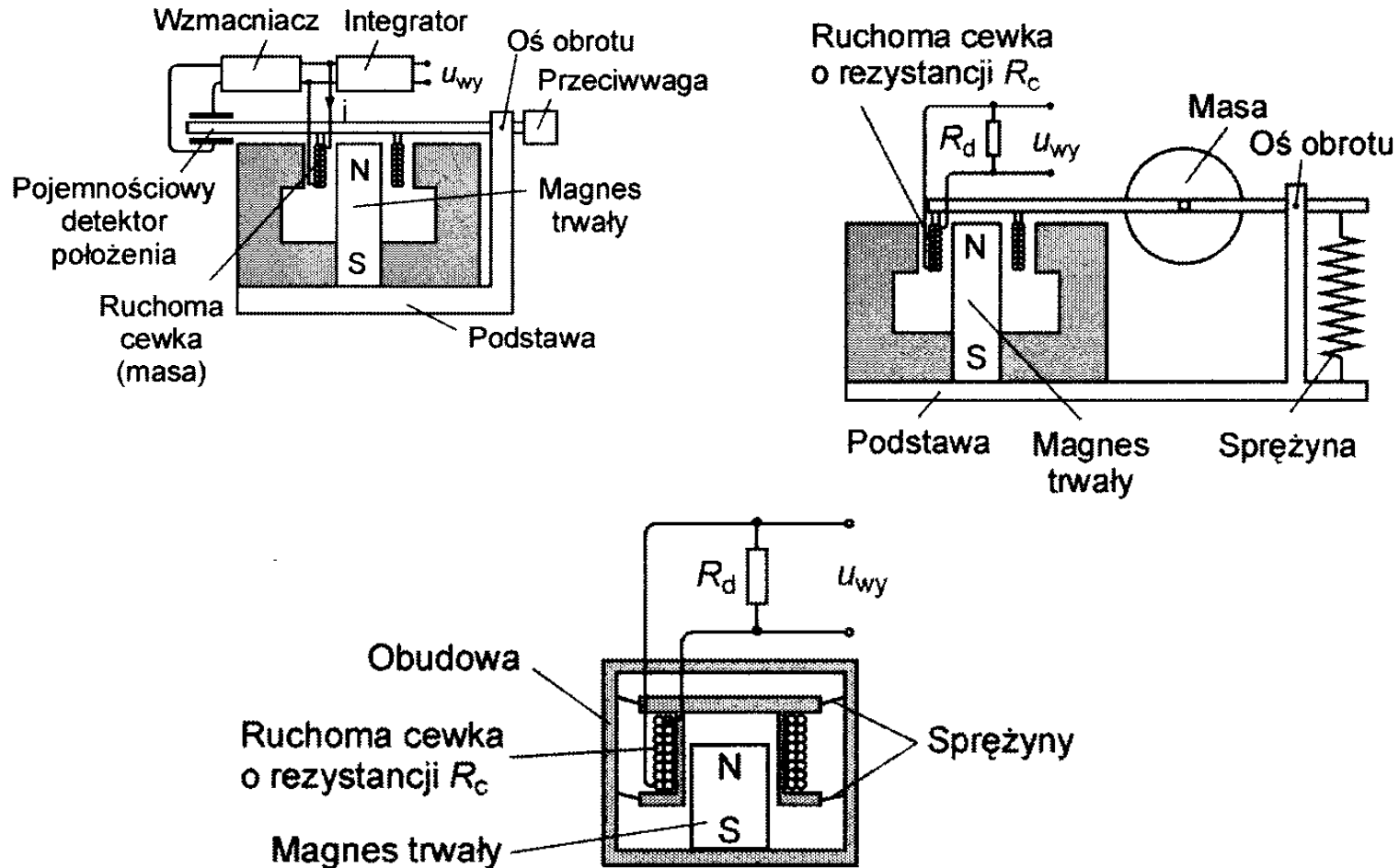


Czujnik trzyosiowy XYZ

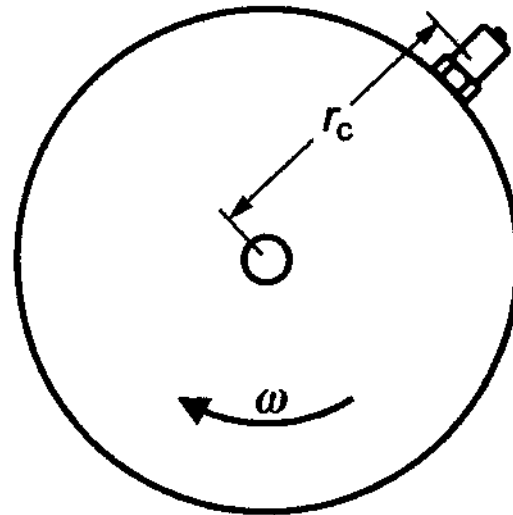
Czujniki wielosiowe 3D - pojemnościowe



Sejsmometry z przetwornikami magnetoelektrycznymi



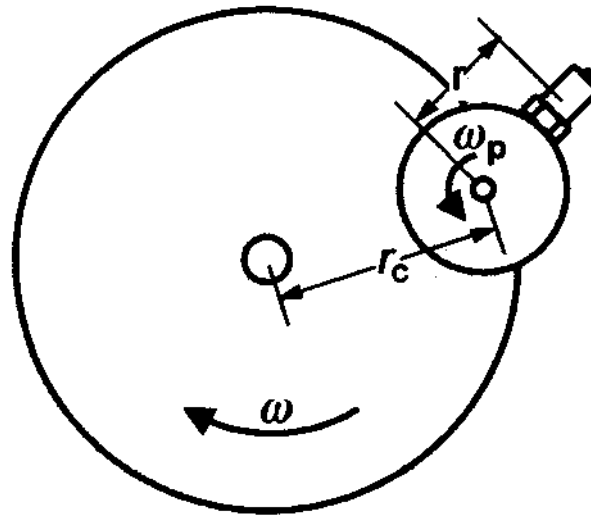
Skalowanie stałą wartością za pomocą wirówki



$$a_r = \omega^2 r_c$$

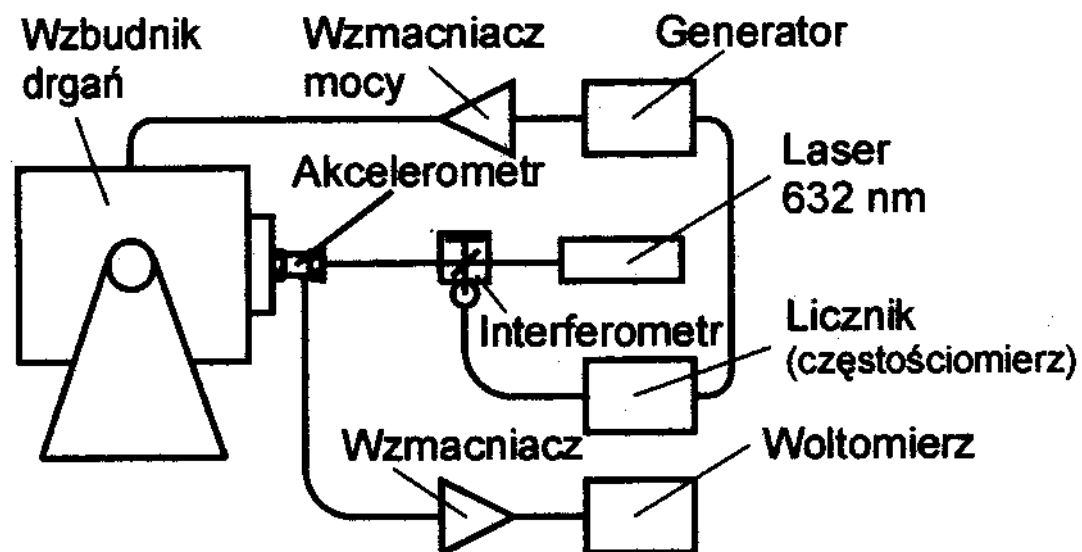
Zakres przyspieszeń do 1000 m/s^2

Skalowanie zmiennym przyspieszeniem

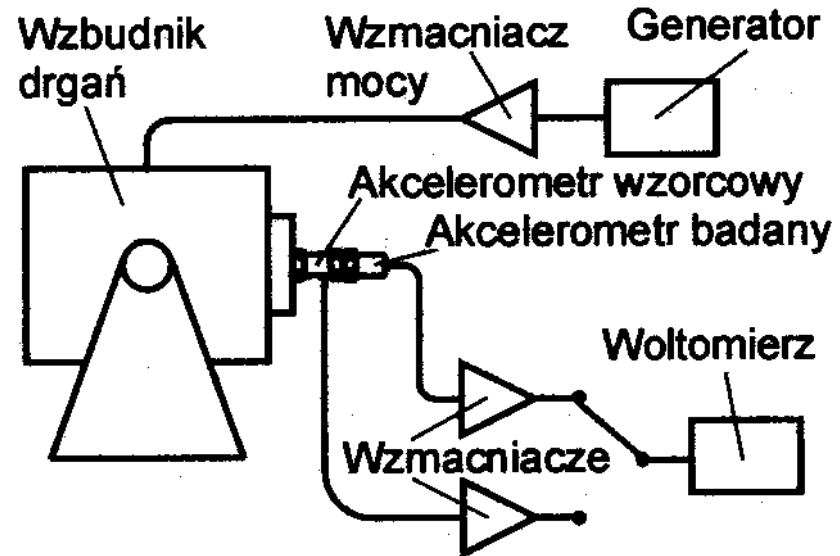


Układ podwójnej wirówki do zadawania zmiennego przyspieszenia sinusoidalnego

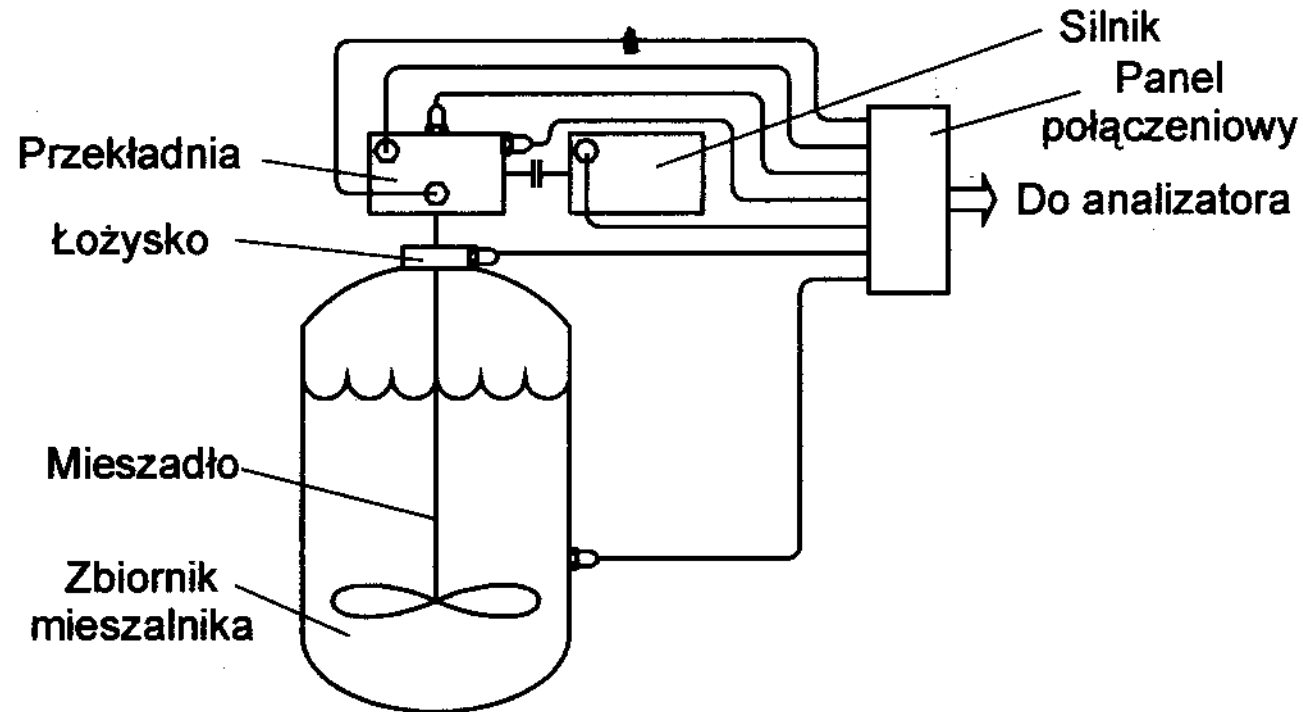
Skalowanie za pomocą interferometru



Skalowanie za pomocą czujnika wzorcowego

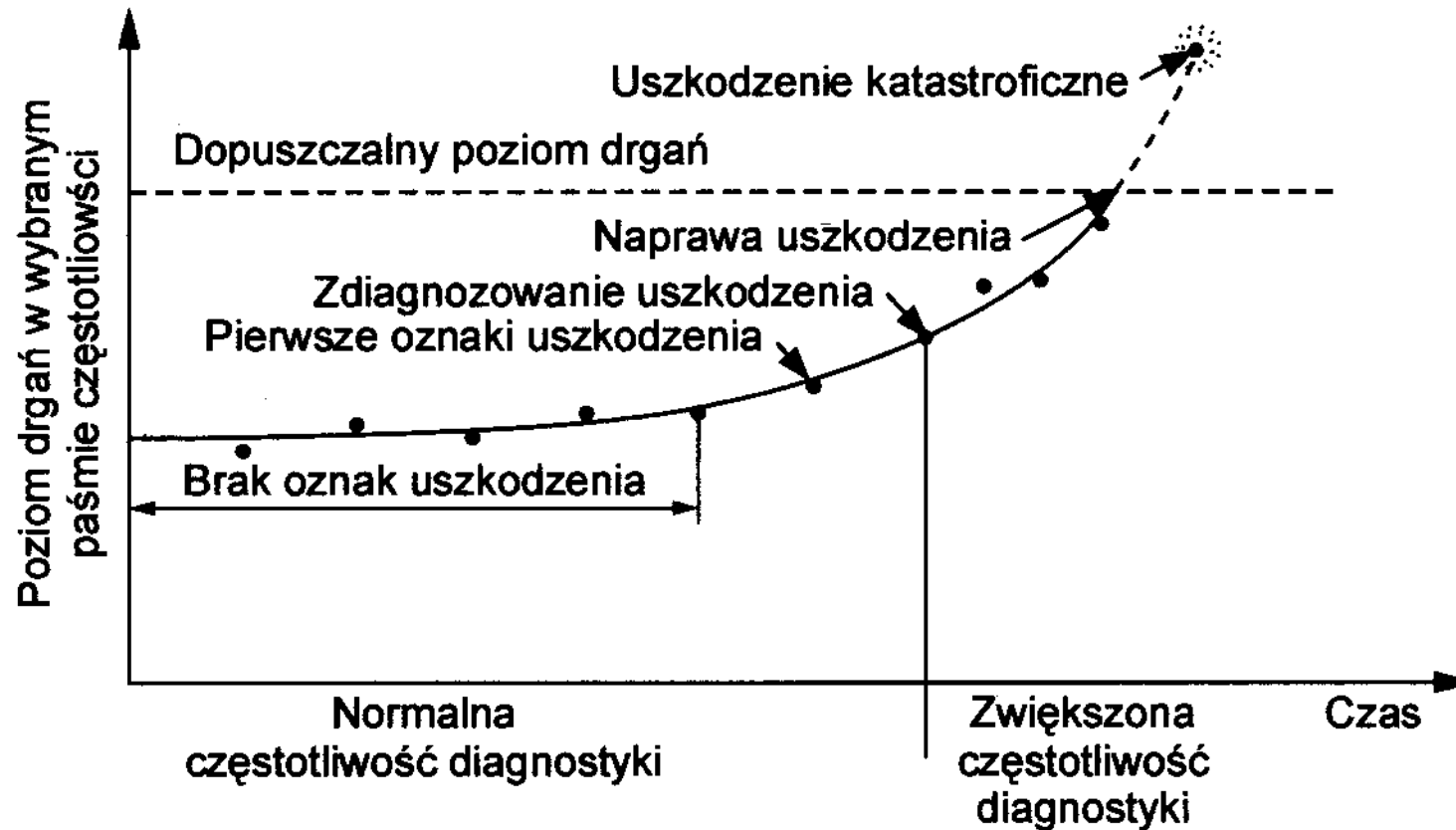


Zastosowania – diagnostyka wibroakustyczna maszyn



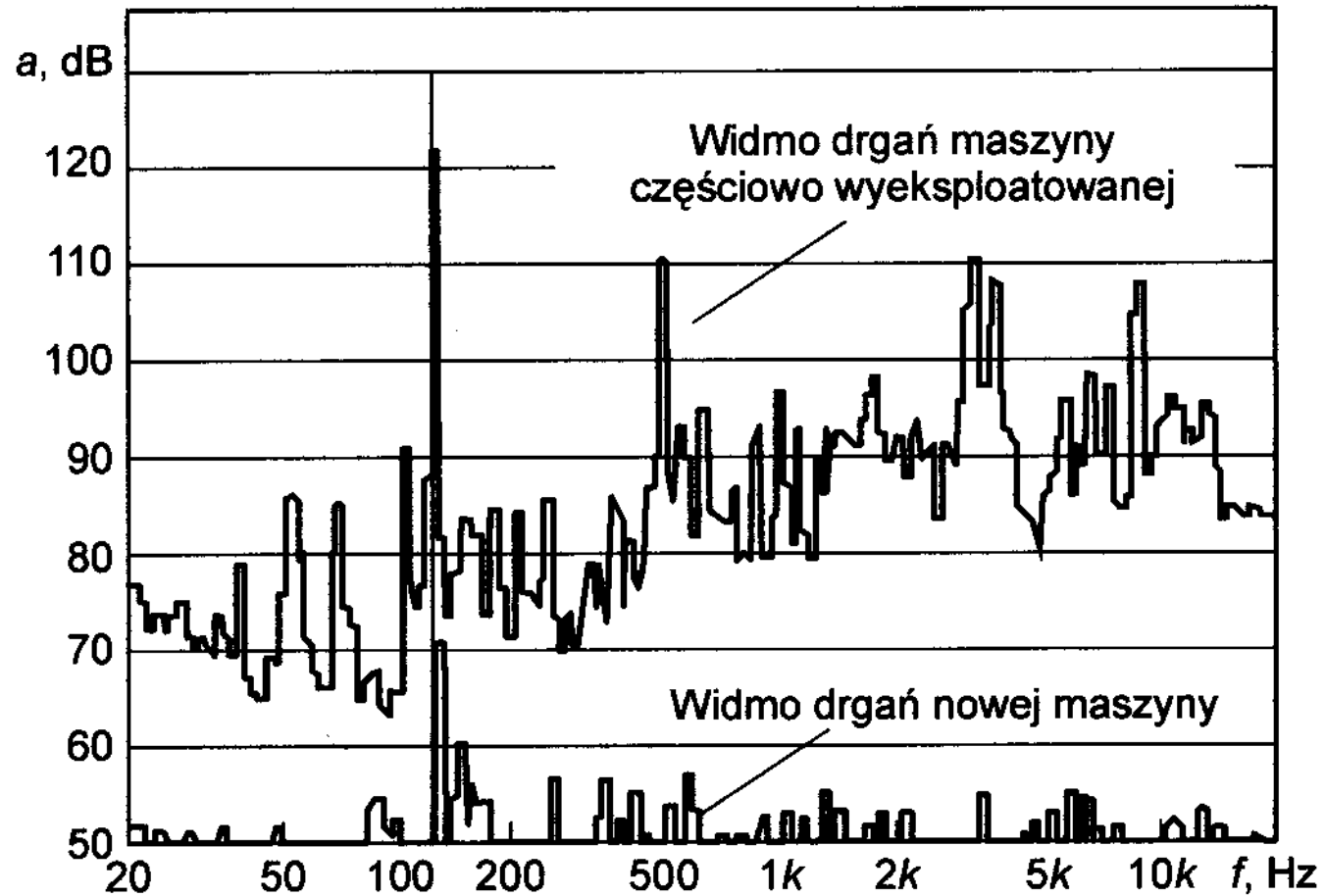
Przykładowe rozmieszczenie czujników drgań na maszynie do celów diagnostyki wibroakustycznej

Zastosowania – diagnostyka wibroakustyczna maszyn



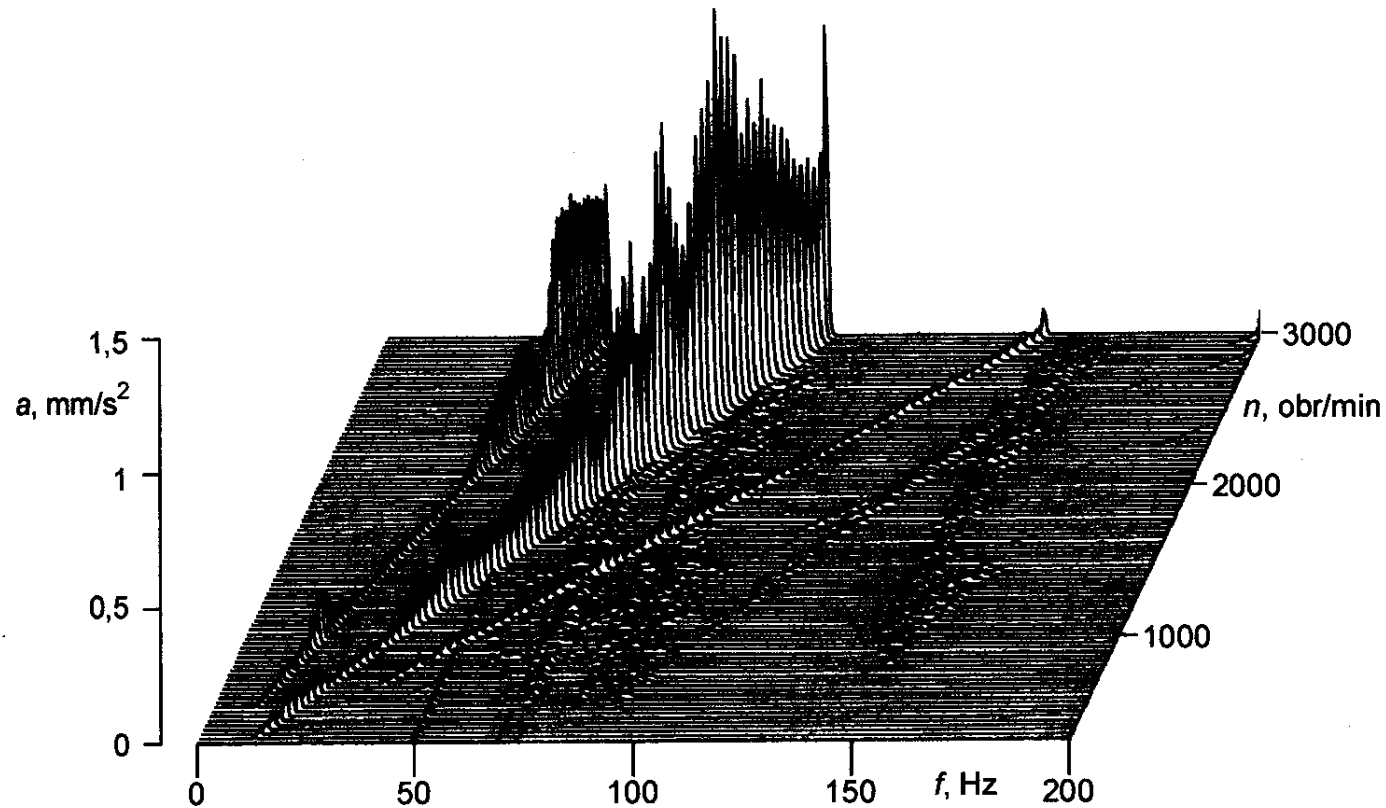
Narastający poziom drgań umożliwia zapobieżenie awarii i przeprowadzenie wcześniejszego remontu

Zastosowania – diagnostyka wibroakustyczna maszyn



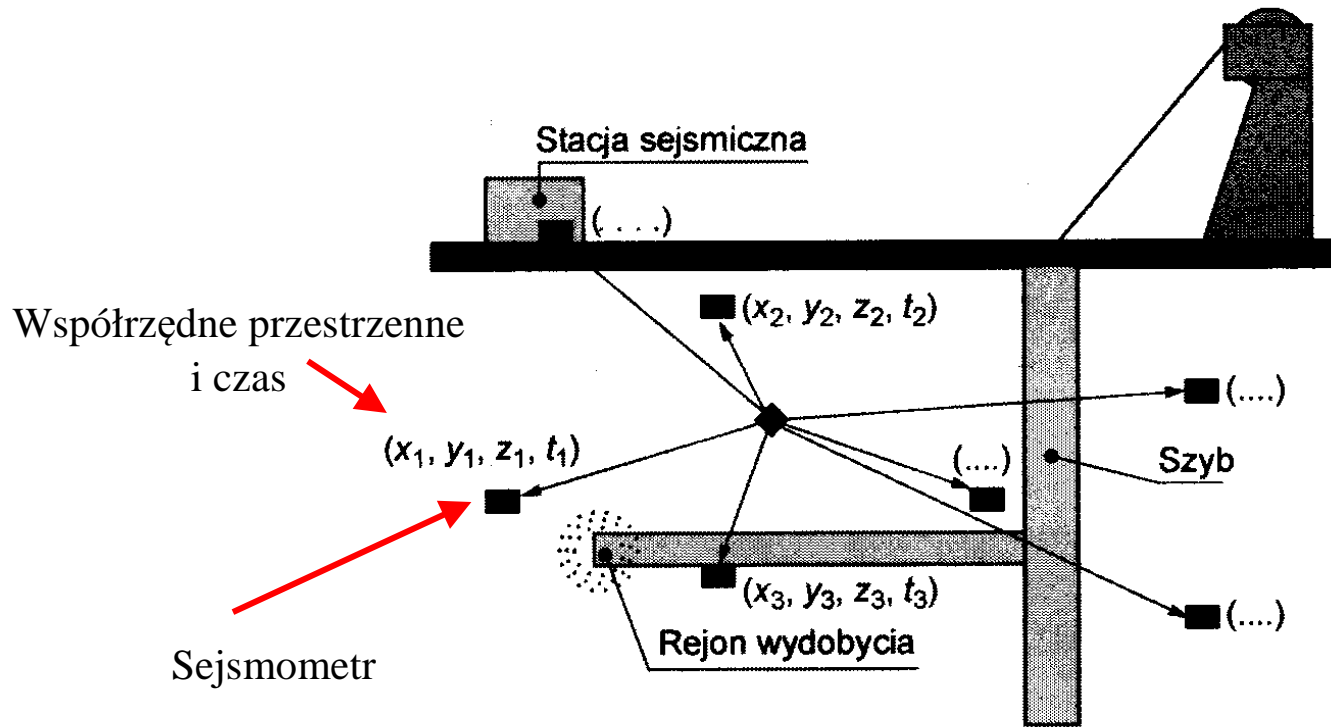
Analiza widmowa sygnału drgań maszyny

Zastosowania – diagnostyka wibroakustyczna maszyn



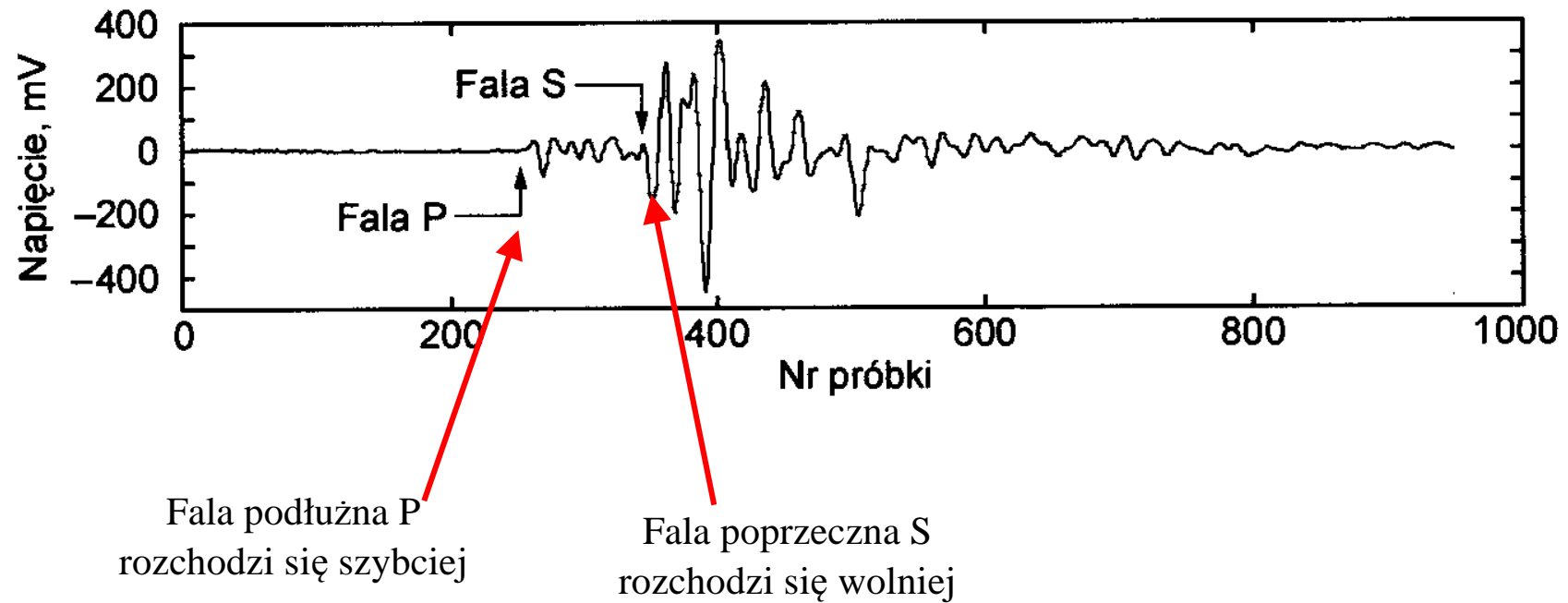
Analiza czasowo-częstotliwościowa drgań maszyny podczas zatrzymywania (turbina parowa)

Zastosowania – seismografia górnicza



Przykładowa sieć sejsmometrów w kopalni

Zastosowania – sejsmografia górnicza



Przykładowy sejsmogram z górniczego systemu seismologicznego

Inne zastosowania

1. Technika motoryzacyjna: układy poduszek powietrznych, nadzór parametrów trakcyjnych, układy antypoślizgowe, alarmy przeciwkradzieżowe itp.
2. Układy automatycznego poziomowania (telefony komórkowe, gry telewizyjne).
3. Zabezpieczenie przed skutkami upadku (HDD), detektory swobodnego spadku.
4. Nadzór nad przesyłkami pocztowymi i towarami podczas transportu.
5. Robotyka: utrzymywanie pionu i poziomu, roboty kroczące.
6. Sprzężenie zwrotne w głośnikach wysokiej klasy.
7. Wiele innych ...

