Ćwiczenie 10

POMIAR PARAMETRÓW DRGAŃ

1. Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z techniką przeprowadzania pomiarów parametrów drgań mechanicznych oraz stosowaną do tych pomiarów aparaturą.

2. Wprowadzenie teoretyczne

Drgania mechaniczne jest to rodzaj ruchu, w którym ciało (układ) porusza się pomiędzy dwoma swoimi skrajnymi położeniami przechodząc przez położenie równowagi.

Drgania występujące w maszynach i urządzeniach wymuszane są przez siły napędowe lub jako siły oporu (np. przy skrawaniu), a także wskutek uderzeń, przy zmianach obciążenia, zmianach warunków zewnętrznych, w wyniku luzów i nierówności. Oprócz drgań wymuszonych związanych z ruchem maszyn, mogą też występować drgania samowzbudne, które mogą powstawać np. podczas pracy narzędzi skrawających.

Nadmierne drgania powodują szybsze zużycie maszyn, zmęczenie materiałów, szkodliwe oddziaływanie na ludzi, hałas. Często są oznaką uszkodzeń maszyn i urządzeń.

Celowym zastosowaniem drgań są np. wstrząsarki, młoty pneumatyczne, wzbudniki do badań wytrzymałościowych lub analizy modalnej, wzorcowe źródła drgań do kalibracji czujników.

2.1. Pomiar drgań.

Celem pomiaru drgań jest:

- sprawdzenie, czy amplitudy drgań o określonych częstotliwościach nie przekraczają dopuszczalnych wartości,
- ustalenie przyczyn wzbudzania się drgań rezonansowych w pewnych częściach maszyny,
- wytłumienie lub izolacja źródeł drgań,
- monitorowanie stanu dynamicznego maszyn,
- uzyskanie danych do opracowania lub weryfikacji komputerowych modeli konstrukcji.

Przy pomiarach ruchu drgającego może nas interesować przebieg przemieszczenia ***x***, prędkości ***v*** lub przyspieszenia ***a*** w funkcji czasu. Ponieważ wielkości te są ze sobą związane zależnościami:

$$v=\frac{dx}{dt}\ , \qquad a=\frac{dv}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2} \tag{1}$$

wystarczy dokonywać pomiaru jednej z nich, natomiast pozostałe mogą być otrzymywane na drodze całkowania lub różniczkowania.

W przypadku harmonicznego ruchu drgającego:

$$x=x_0\cos\omega\ t \qquad v=-\omega\ x_0\sin\omega\ t \qquad a=-\omega^2 x_0\cos\omega\ t \tag{2}$$

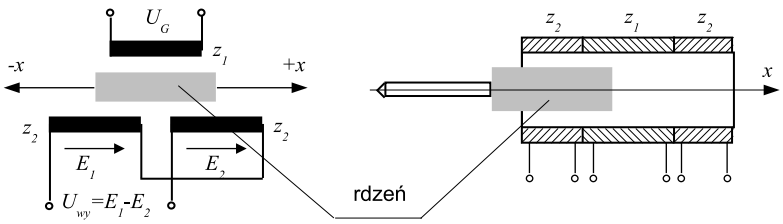
Wspomniane wyżej operacje daje się łatwo realizować analitycznie. Operacje całkowania czy różniczkowania najczęściej przeprowadza się bezpośrednio w trakcie pomiarów, wykorzystując elektryczne układy całkujące lub różniczkujące. Wypływałby stąd wniosek, że jest sprawą obojętną, która z wielkości charakteryzujących ruch drgający będzie mierzona bezpośrednio. Jest to jednak niezupełnie słuszne, bowiem zabieg całkowania czy różniczkowania na drodze elektrycznej (zwłaszcza, jeżeli powtarzać go dwukrotnie), zmniejsza dokładność określenia amplitudy interesującej nas wielkości, oraz powoduje powstanie pewnego przesunięcia fazowego pomiędzy przebiegiem mierzonym, a otrzymanym na wyjściu z układu. Trzeba więc zdawać sobie sprawę przy przeprowadzaniu pomiarów, do której z wielkości mechanicznych jest proporcjonalny pierwotny sygnał elektryczny, otrzymany z czujnika.

Do pomiaru drgań w ćwiczeniu będą stosowane:

- czujniki indukcyjne transformatorowe, które dają sygnał proporcjonalny do **przemieszczenia**,
- czujniki elektrodynamiczne sejsmiczne - sygnał proporcjonalny do **prędkości**,
- piezoelektryczne czujniki sejsmiczne - sygnał proporcjonalny do **przyspieszenia**,
- czujniki laserowe - sygnał proporcjonalny do **przemieszczenia lub prędkości**.

2.1.1. Pomiar drgań czujnikami transformatorowymi

W czujnikach transformatorowych o zmiennej indukcyjności wzajemnej wykorzystuje się zależność siły elektromotorycznej indukowanej z uzwojenia pierwotnego do uzwojeń wtórnych od współczynnika indukcyjności wzajemnej. Czujnik pokazany na Rys.1 posiada uzwojenie pierwotne o z_1 zwojach i dwa uzwojenia wtórne o jednakowej liczbie zwojów z_2, nawinięte na cylindryczną izolacyjną tuleję. Wewnątrz tulei przesuwa się rdzeń ferromagnetyczny połączony poprzez trzpień z obiektem drgań. Uzwojenie pierwotne jest zasilane napięciem sinusoidalnie zmiennym (zwykle o częstotliwości od 50Hz do 50 kHz) i wytwarza sinusoidalnie zmienny strumień magnetyczny $\varphi=\Phi sin\omega t$ indukujący w uzwojeniach wtórnych sinusoidalnie zmienne siły elektromotoryczne E_1 i E_2. Uzwojenia wtórne są połączone przeciwsobnie (różnicowo), a więc napięcie wyjściowe U_{wy} jest równe różnicy sił elektromotorycznych E_1 i E_2.



Rys.1. Czujnik indukcyjny transformatorowy.

Wartość chwilowa siły elektromotorycznej indukowana w uzwojeniach wtórnych wynosi:

$$e=-z_2\frac{d\phi}{dt} \tag{3}$$

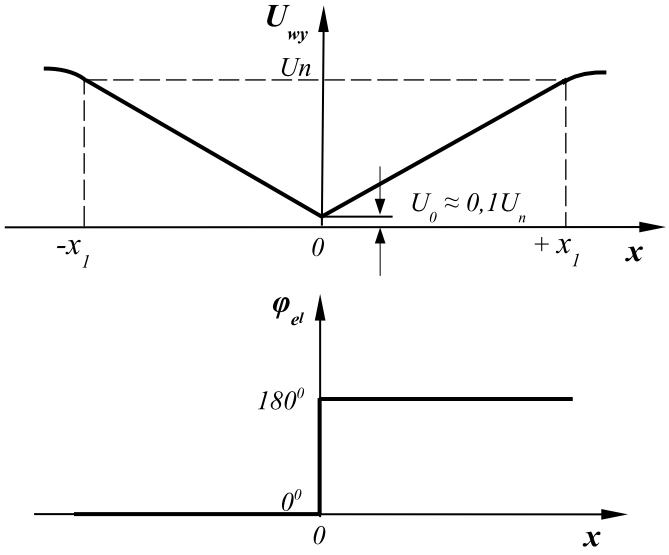
W przypadku środkowego położenia rdzenia, amplituda (sinusoidalnie zmiennej) siły elektromotorycznej $E_1=E_2=\omega z_2\Phi$, a ponieważ uzwojenia są połączone różnicowo, więc $U_{wy}=E_1-E_2=0$.
Przesunięcie rdzenia np. w lewo powoduje zwiększenie strumienia przenikającego cewkę lewą o $\Delta\Phi$, jednocześnie strumień przenikający cewkę prawą, zmniejszy się o $\Delta\Phi$.

Napięcie wyjściowe z czujnika będzie więc:

$$U_{wy}=E_1-E_2=\omega\ z_2 2\Delta\Phi \tag{4}$$

Zmiana strumienia $\Delta\Phi$ jest proporcjonalna do zmiany oporności magnetycznej (reluktancji), która jest proporcjonalna do przesunięcia rdzenia x.
Ostatecznie otrzymuje się:

$$U_{wy}=kx \tag{5}$$



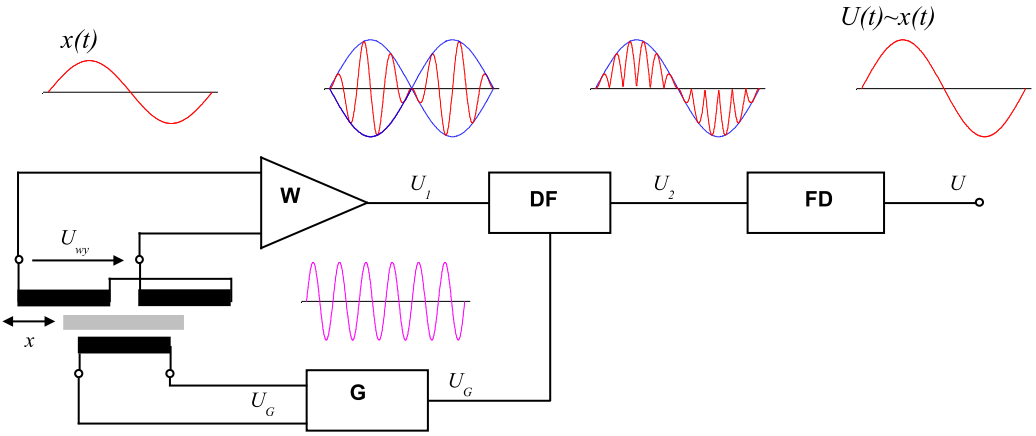
Rys.2. Zależność amplitudy napięcia wyjściowego U_{wy} i kąta przesunięcia fazowego φ_{el} (między napięciem wyjściowym U_{wy} a napięciem zasilającym U_G), od przesunięcia rdzenia x.

Należy zwrócić uwagę, że napięcie wyjściowe U_{wy} z czujnika jest napięciem sinusoidalnie zmiennym o częstotliwości napięcia zasilającego uzwojenie pierwotne. Napięcia dla obu kierunków przesunięcia rdzenia różnią się fazą o 180 stopni.
Przy położeniu rdzenia odpowiadającemu $x = 0$, na wyjściu czujnika panuje pewne niewielkie napięcie niezrównoważenia U_0, spowodowane nieuniknioną magnetyczną i elektryczną asymetrią układu.
Najprostszy układ pomiarowy przedstawiony jest na Rys.3. Generator zasila czujnik napięciem sinusoidalnie zmiennym o stałej amplitudzie i stałej częstotliwości. Napięcie wyjściowe z czujnika, będące miarą przesunięcia rdzenia, jest mierzone zwykłym woltomierzem prądu przemiennego.

Rys.3. Pomiar przemieszczenia czujnikiem transformatorowym przy użyciu woltomierza prądu zmiennego.

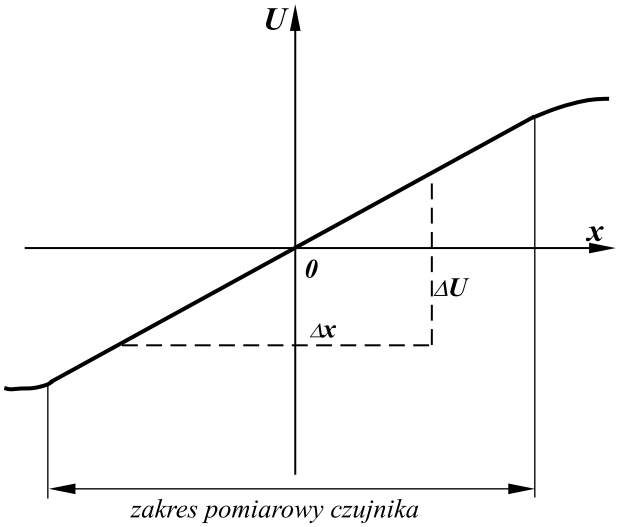
W układzie przedstawionym na Rys.3, napięcie U_{wy} mierzone zwykłym woltomierzem prądu zmiennego ma taką samą **wartość** dla obu kierunków przesunięcia rdzenia (dla $+x$ i $-x$), a więc charakterystyka jest niejednoznaczna. W takim układzie, dla jednoznacznego pomiaru przemieszczeń można wykorzystać tylko połowę zakresu pomiarowego czujnika - jedną z dwóch gałęzi jego charakterystyki (Rys.2).
Zastosowanie prostownika fazoczułego (Rys.4), pozwala na jednoznaczny pomiar dla obu kierunków przesunięcia rdzenia. Generator G zasila uzwojenie pierwotne czujnika i prostownik fazoczuły napięciem sinusoidalnym o stałej amplitudzie i częstotliwości. Wzmacniacz W służy do wzmocnienia napięcia U_{wy} z czujnika. W prostowniku fazoczułym DF napięcie U_1 ze wzmacniacza, podlega prostowaniu z uwzględnieniem fazy tego napięcia względem napięcia U_G generatora. Napięcie $\mathbf{U_2}$ przyjmuje wartości dodatnie i ujemne w zależności od kierunku przesunięcia rdzenia czujnika z położenia środkowego, zawiera jednak niepożądane tętnienia o częstotliwości napięcia generatora. Filtr dolnoprzepustowy FD „przepuszcza" tylko sygnały o niskich (w stosunku do częstotliwości generatora) częstotliwościach, a w sygnale z prostownika jest to niska częstotliwość obwiedni odwzorowującej sygnał przesunięcia rdzenia.

Dla poprawnego odwzorowania ruchu rdzenia, częstotliwość generatora powinna być kilka razy większa od częstotliwości mierzonych drgań.



Rys.4. Schemat blokowy miernika z prostowaniem fazoczułym.

Na wyjściu układu uzyskuje się napięcie prądu stałego o polaryzacji zależnej od kierunku przesunięcia rdzenia z położenia środkowego, a jednocześnie zakres pomiarowy jest 2 razy większy w porównaniu z poprzednim układem.



Rys.5. Charakterystyka statyczna układu pomiarowego z prostownikem fazoczułym.

Czułością k układu pomiarowego nazywa się stosunek przyrostu napięcia ΔU przy zmianie przemieszczenia rdzenia o Δx (Rys.5):

$$k = \frac{\Delta U}{\Delta x} \tag{6}$$

Można go wyznaczyć z charakterystyki statycznej $U = f(x)$.

Cechy czujników transformatorowych różnicowych:
- sygnał elektryczny proporcjonalny jest do przemieszczenia,
- możliwość pomiaru przemieszczeń statycznych i dynamicznych (drgań),
- zakres mierzonych przemieszczeń - od mikrometrów do kilkudziesięciu centymetrów,

- duża czułość - do około 100 V/mm,
- błąd liniowości - 0,1...1%,
- napięcie niezrównoważenia – poniżej 1% znamionowego napięcia wyjściowego,
- prosta budowa,
- maksymalna częstotliwość f_{max} mierzonych drgań czujnikami transformatorowymi jest ograniczona częstotliwością napięcia zasilającego (5 do 10 razy mniejsza od częstotliwości generatora f_G).

Ruchomy trzpień (połączony z rdzeniem czujnika) styka się z badanym obiektem drgającym, a więc mierzone są drgania obiektu względem układu odniesienia w którym zamocowana jest obudowa tego czujnika. W rzeczywistych warunkach pomiarów drgań, trudno jest uzyskać nieruchomy układ odniesienia, co może stanowić ograniczenie zastosowań tych czujników.

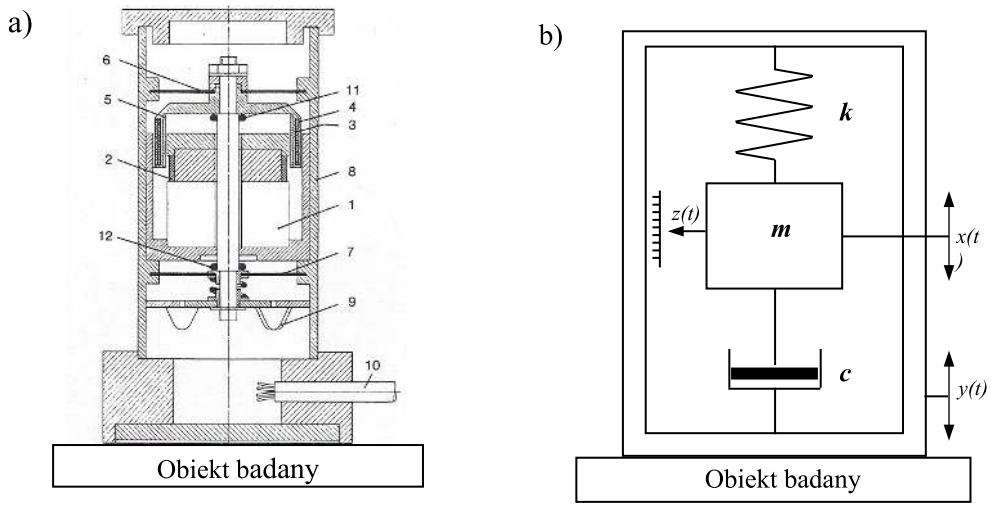
2.1.2 Pomiar drgań czujnikami elektrodynamicznymi.

Czujniki elektrodynamiczne pracują na zasadzie indukowania siły elektromotorycznej w uzwojeniu poruszającym się w polu magnesu trwałego:

$$e=Blv \tag{7}$$

B – indukcja wytwarzana przez magnes trwały,
l – długość uzwojenia (zależy od liczby zwojów),
v – prędkość uzwojenia w polu magnesu.

Czujnikami elektrodynamicznymi można mierzyć bezpośrednio **prędkość drgań**. Czujniki elektrodynamiczne są czujnikami generacyjnymi, tzn. nie wymagają zasilania, a same wytwarzają siłę elektromotoryczną. Budowane są jako czujniki drgań względnych i drgań bezwzględnych – **czujniki sejsmiczne**. Czujnikiem sejsmicznym nazywa się układ mechaniczny o jednym stopniu swobody posiadający masę sejsmiczną ***m***, sprężynę o sztywności ***k*** i tłumik o współczynniku tłumienia ***c***.



Rys.6. Budowa i model układu mechanicznego elektrodynamicznego czujnika sejsmicznego PR 9266. Oznaczenia: 1 - magnes trwały, 2 - cewka korekcyjna, 3 - cewka pomiarowa, 4 - dodatkowa cewka tłumiąca, 5 - cylinder tłumiący, 6, 7 - sprężyny membranowe, 8 - obudowa, 9 - przewody, 10 - kabel ekranowany, 11, 12 – ograniczniki

W czujnikach elektrodynamicznych sejsmicznych najczęściej cewka stanowi masę sejsmiczną m zawieszoną na sprężynie o sztywności k, tłumienie c najczęściej realizowane jest na drodze

elektrycznej. Wskutek drgań obudowy, cewka porusza się względem magnesu na sztywno związanym z obudową, ale są też rozwiązania z ruchomym magnesem. W obu przypadkach siła elektromotoryczna jest proporcjonalna do **prędkości względnej** cewki i magnesu.

Czujnik umieszczony jest na badanym obiekcie, którego drgania *y(t)* chcemy mierzyć (Rys.6).

x(t) – współrzędna opisująca ruch bezwzględny masy *m* względem układu nieruchomego (względem ziemi) - ruch bezwzględny cewki,
y(t) – współrzędna opisująca ruch obudowy czujnika, czyli ruch badanego obiektu – drgania, które chcemy mierzyć
z(t) – ruch względny masy i obudowy (w czujniku - ruch względny cewki i magnesu)

Na podstawie zasady d'Alemberta, można przedstawić równanie ruchu masy w postaci:

$$m\ddot{x}+c(\dot{x}-\dot{y})+k(x-y)=0 \tag{8}$$

Sygnał wyjściowy (pomiarowy), zależy zwykle od ruchu **względnego** *z(t)* masy i obudowy:

$$z(t) = x(t) - y(t) \tag{9}$$

Równanie ruchu (7.12) można napisać w następującej postaci:

$$m\ddot{z}+c\dot{z}+kz=-m\ddot{y} \tag{10}$$

lub w postaci:

$$\ddot{z}+2h\dot{z}+\alpha^2 z=-\ddot{y} \tag{11}$$

gdzie:

$$\alpha^2=\frac{k}{m}, \qquad 2h=\frac{c}{m}, \qquad \varepsilon=\frac{h}{\alpha} \tag{12}$$

Jeśli wymuszenie (drgania obiektu) ma charakter harmoniczny: $y = y_0 \sin\omega t$, rozwiązanie ma dwie składowe: przejściową o częstości kołowej drgań tłumionych $\lambda=\sqrt{\alpha^2-h^2}$ zanikającą z prędkością zależną od tłumienia względnego ε, oraz składową ustaloną drgań wymuszonych:

$$z=z_0\sin(\omega t-\phi) \tag{13}$$

Amplitudę i fazę drgań **względnych** określają zależności:

$$z_0=y_0\frac{\omega^2}{\sqrt{(\alpha^2-\omega^2)^2+(2h\omega)^2}}, \qquad \phi=arctg\frac{2h\omega}{\alpha^2-\omega^2} \tag{14}$$

Stosunek amplitudy drgań względnych z_0, do amplitudy drgań obiektu (obudowy) y_0, **jest czułością *k* przetwornika**:

$$k=\frac{z_0}{y_0}=\frac{\omega^2}{\sqrt{(\alpha^2-\omega^2)^2+(2h\omega)^2}} \tag{15}$$

Przedstawienie charakterystyki czujnika w postaci bezwymiarowej – tzn. **stosunku amplitud** drgań względnych z_0 i drgań wymuszających y_0 (mierzonych) w funkcji częstotliwości wymuszenia lub w funkcji stosunku ω/α jest korzystne, ponieważ:

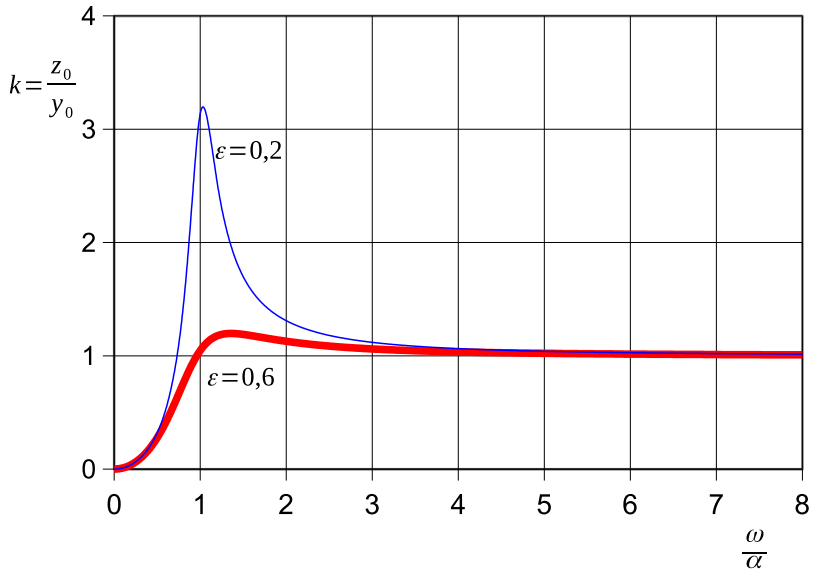
a) charakterystyki czujnika są identyczne bez względu na to czy rozpatrujemy amplitudy przemieszczeń, prędkości czy przyspieszeń mierzonych drgań harmonicznych, gdyż:

$$\frac{z_0}{y_0}=\frac{z_0\omega}{y_0\omega}=\frac{z_0\omega^2}{y_0\omega^2} \tag{16}$$

gdzie: z_0, $z_0\omega$, $z_0\omega^2$ - amplitudy przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia drgań cewki względem magnesu (obudowy),

y_0, $y_0\omega$, $y_0\omega^2$- amplitudy przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia drgań obudowy (mierzonych drgań);

b) charakterystyki umożliwiają szybkie skorygowanie błędu pomiaru, wprowadzonego przez czujnik w jednostkach bezwymiarowych lub w %.



Rys.7. Częstotliwościowa charakterystyka amplitudowa czujnika sejsmicznego.

Współczynnik czułości k przetwornika zależy od stosunku ω/α (częstości mierzonych drgań i częstości własnej układu drgającego czujnika sejsmicznego. Czujnik nie wprowadza błędu amplitudy tylko w przypadku, gdy $k = z_0/y_0 = 1$ (Rys.7), praktycznie ma to miejsce wtedy, gdy częstość ω mierzonych drgań jest co najmniej (2,5…3) razy większa niż α. Masa sejsmiczna (cewka), jest wtedy praktycznie nieruchoma względem ziemi, a mierzone drgania względne cewki i magnesu są to praktycznie drgania obiektu względem ziemi, czyli **drgania bezwzględne obiektu**.
Przez odpowiedni dobór tłumienia, można uzyskać większy zakres płaskiej charakterystyki amplitudowej. Najkorzystniejszym jest współczynnik $\varepsilon = h/\alpha = 0{,}6$. Uwzględnienie poprawki amplitudy oraz poprawki kąta przesunięcia fazowego, pozwala rozszerzyć zakres pomiarowy czujnika na obszar częstości bliskich, a nawet niższych od częstości α.

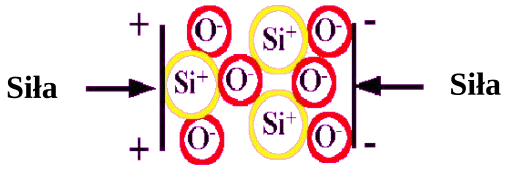
Cechy czujników elektrodynamicznych sejsmicznych:

- sygnał elektryczny jest proporcjonalny do prędkości drgań, a więc czujniki można wzorcować tylko dynamicznie,
- nie wymagają układu odniesienia (mocowanie wprost na obiekcie),
- nie wymagają zasilania,
- charakteryzują się prostą budową,
- możliwość uzyskania dużej czułości poprzez zwiększenie liczby zwojów cewki,
- mała rezystancja cewki jako źródła napięcia (rzędu 10 kΩ), umożliwia współpracę z dowolnym woltomierzem,
- duże wymiary, stosunkowo duża masa, rzędu 0,5 kg,
- konieczność określenia częstotliwości mierzonych drgań dla uwzględnienia poprawki wskazań czujnika,
- w typowych czujnikach, częstość własna drgań wynosi 10...20, a nawet 80 Hz.

W czujniku PR 9266 firmy Philips tłumienie jest realizowane na drodze elektrycznej poprzez wykorzystanie prądów wirowych indukujących się podczas ruchu w miedzianym cylindrze znajdującym się w tej samej szczelinie powietrznej. Dodatkowe uzwojenie korekcyjne umożliwia kompensacje zmian współczynnika tłumienia w wysokich temperaturach lub kompensację ugięcia statycznego sprężyn przy pomiarze drgań w kierunku pionowym – poprzez doprowadzenie do uzwojenia stałego prądu z zewnętrznego źródła.

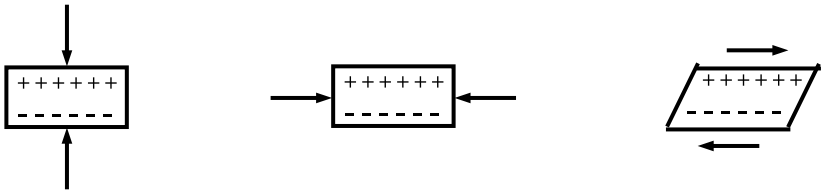
2.1.4 Pomiar drgań czujnikami piezoelektrycznymi.

W czujnikach piezoelektrycznych wykorzystuje się znany efekt piezoelektryczny, któremu podlegają niektóre kryształy np. kwarc (SiO_2), turmalin, sól Segnette'a, tytanian baru. Efekt ten odkryty przez braci Curie w 1880 r. polega na powstawaniu ładunków elektrycznych jonowych na ściankach kryształów, odkształcanych pod wpływem obciążeń mechanicznych.



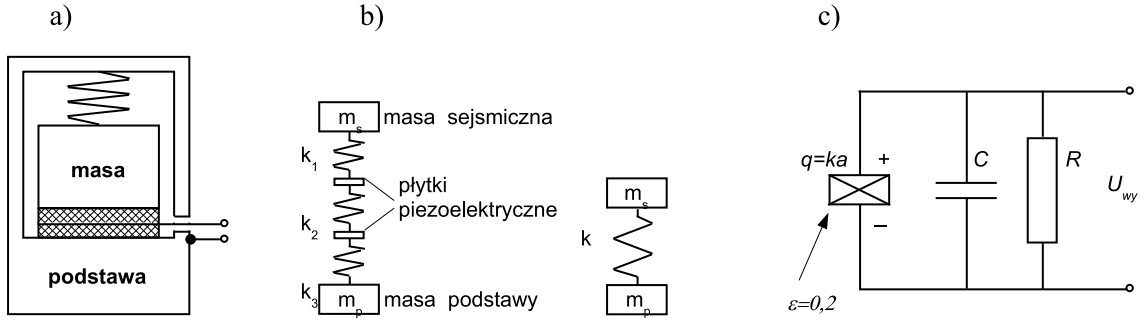
Rys. 8. Efekt piezoelektryczny w siatce krystalicznej kwarcu.

Ładunki powstają przy naprężeniach ściskających, zginających i ścinających. Czujniki piezoelektryczne stosuje się do pomiaru sił, przyspieszeń i ciśnień.



Rys.9. Efekt piezoelektryczny podłużny, poprzeczny i ścinania.

W przedstawionym na Rys.10a czujniku, element przetwarzający składa się z dwóch płytek piezoelektryka, na których spoczywa masa *m* dociskana sprężyną o sztywności *k*, aby zapewnić stały kontakt masy sejsmicznej z piezoelektrykiem podczas drgań. Cienkie metalowe elektrody służą do zbierania ładunków powstających na ściankach piezoelektryka.



Rys. 10. Piezoelektryczny czujnik przyspieszeń, a) schemat, b) zastępczy model mechaniczny, c) zastępczy model elektryczny.

Jeżeli na czujnik działa przyspieszenie *a*, spowodowane np. drganiami, to ładunek powstający na ściankach piezoelektryka (proporcjonalny do siły bezwładności), jest miarą przyspieszenia.

$$q=kF=kma \tag{17}$$

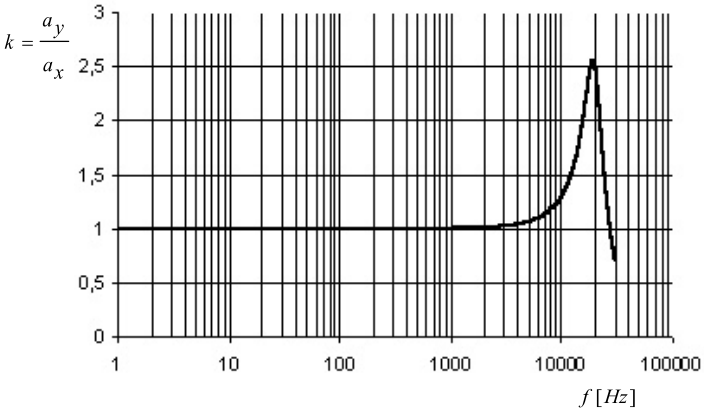
Czujniki piezoelektryczne są czujnikami generacyjnymi, dają sygnał wtedy, gdy występuje zmiana obciążenia piezoelektryka (np. zmiana przyspieszenia w czujniku drgań).

Piezoelektryczny czujnik przyspieszeń, którego budowę i model zastępczy przedstawiono na Rys.10, można traktować jako słabo tłumiony układ masa - sprężyna o jednym stopniu swobody, opisany klasycznym równaniem różniczkowym drugiego rzędu, którego rozwiązanie ma postać:

$$k_1=\frac{a_y}{a_x}=\frac{\sqrt{\alpha^4+(2h\omega)^2}}{\sqrt{(\alpha^2-\omega^2)^2+(2h\omega)^2}} \tag{18}$$

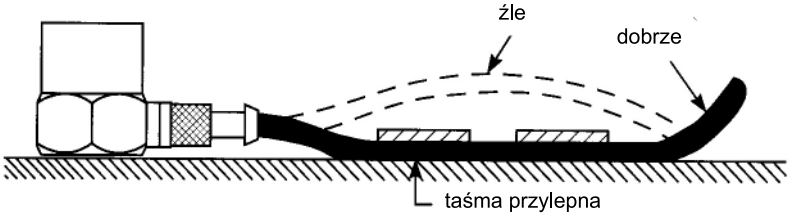
gdzie:

a_y – przyspieszenie działające na element piezoelektryczny,
a_x – przyspieszenie obudowy czujnika (mierzone przyspieszenie),
ω – częstość kołowa mierzonych drgań,
α – częstość kołowa drgań swobodnych układu masa-sprężyna.



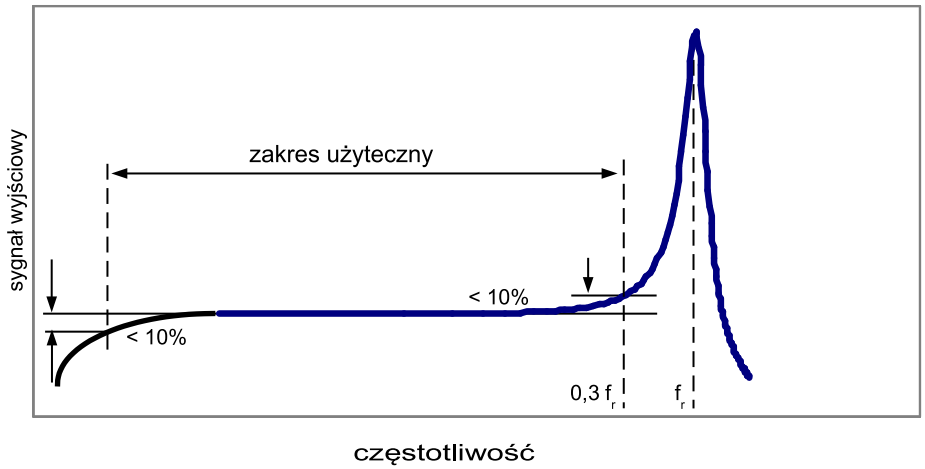
Rys.11. Przykład charakterystyki sejsmicznego czujnika piezoelektrycznego.

Istnieją dwa podstawowe rodzaje przetworników piezoelektrycznych:
a) z **wyjściem ładunkowym** – cechuje je duża impedancja wyjściowa elementu piezoelektrycznego i wymagają na ogół **zewnętrznego** wzmacniacza ładunkowego lub napięciowego w celu dalszego wykorzystania sygnału. Ponadto duża impedancja czujnika piezoelektrycznego wymaga stosowania specjalnych kabli o małym poziomie szumów, aby ograniczyć zmiany ładunku w kablu podczas ruchu, zginania, ściskania i rozciągania (efekt tryboelektryczny), oraz ograniczyć szumy powodowane zakłóceniami radioelektrycznymi i elektromagnetycznymi.



Rys. 12. Sposób mocowania kabla w celu ograniczenia wpływu efektu tryboelektrycznego.

Ważnym zagadnieniem jest utrzymywanie kabli w czystości i niedopuszczanie do pogorszenia ich izolacji, zwłaszcza w trudnych warunkach terenowych podczas pomiarów.
Czujniki piezoelektryczne narzucają układowi pomiarowemu specjalne wymagania dotyczące zarówno rezystancji, jak i pojemności wejściowej użytej aparatury. Od ich wartości zależy zakres częstości drgań, które mogą być mierzone tymi czujnikami, jak również i czułość układów pomiarowych. Praktycznie, górny zakres częstości mierzonych drgań wynosi 0,3...0,5 częstości rezonansowej – błąd nie przekracza wtedy 12%. Przy częstości $f = 0{,}3f_0$ błąd wynosi około 10% (Rys.13), dolny zakres częstości jest ograniczony parametrami elektrycznymi czujnika i urządzeń bezpośrednio do niego dołączonych.



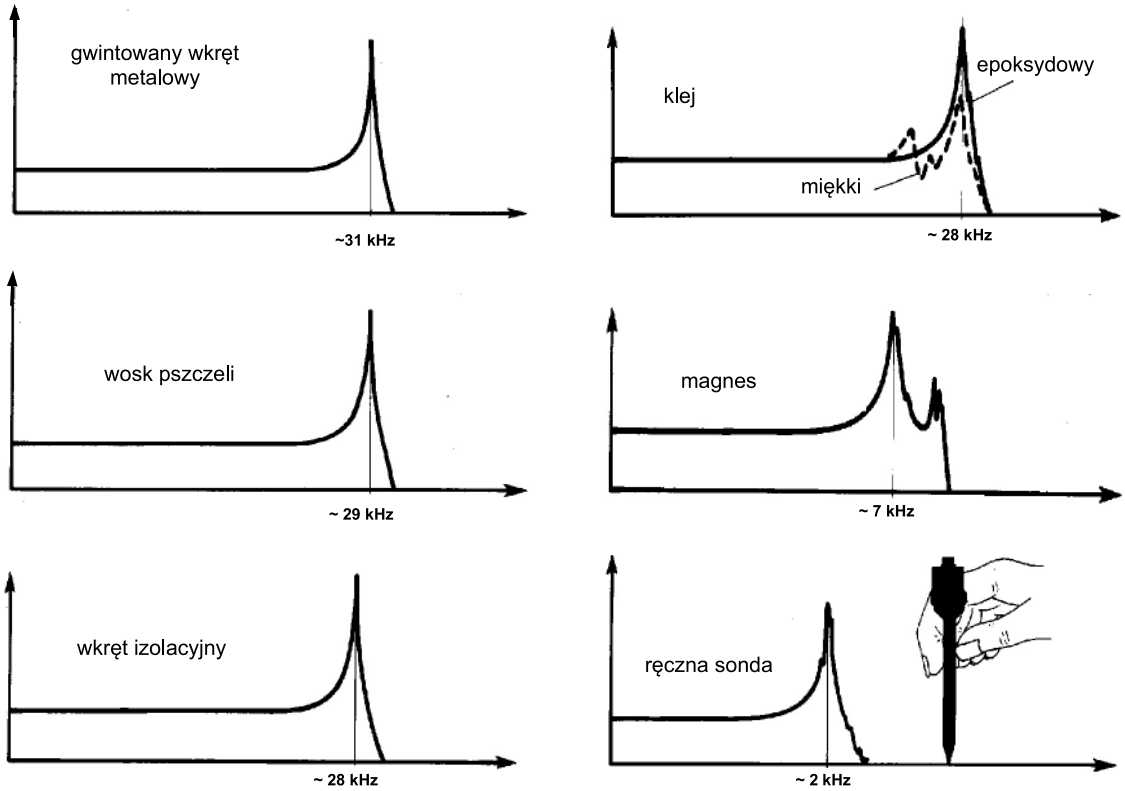
Rys.13. Użyteczny zakres częstotliwości czujnika piezoelektrycznego

b) z **wewnętrznym wzmacniaczem** — posiadają one wbudowany scalony układ wzmacniający zasilany z zewnątrz. Cechy czujników piezoelektrycznych z wbudowanym wzmacniaczem:

- nie wymagają specjalnych kabli – wystarcza zwykły kabel dwużyłowy lub koncentryczny,
- stała czułość niezależna od długości kabla,
- zasilanie ze źródła prądowego umożliwia stosowanie tego samego dwużyłowego kabla również do przesyłania sygnału z czujnika,
- niska impedancja wyjściowa – poniżej 100 Ω,
- zwarta budowa,
- koszt kanału pomiarowego jest mniejszy w porównaniu z zewnętrznym wzmacniaczem,
- ograniczony zakres temperatur (<125^{0}C dla zwykłych konstrukcji, <150^{0}C dla specjalnych).

Piezoelektryczne czujniki przyspieszeń, ze względu na swoje zalety, są obecnie najczęściej stosowanymi do pomiaru drgań. Nie mają żadnych ruchomych części, a więc są trwałe. Cechuje je duży zakres dynamiki i duży zakres częstotliwości. Są stosunkowo tanie i pewne w użyciu, łatwe do kalibracji. Mogą być mocowane w dowolnym kierunku. Ze względu na swoje małe wymiary i masę (od 0,2g) umożliwiają pomiary drgań bardzo małych obiektów. Jest to dość istotne, gdyż masa czujnika nie powinna przekraczać 1/10 masy obiektu.
Produkowane są czujniki do zastosowań ogólnych, precyzyjne, miniaturowe, do pomiarów w wysokich lub niskich temperaturach, do pomiaru udarów, czujniki trójosiowe. Czujnik trójosiowe umożliwiają pomiar przyspieszeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach.

Istotnym dla poprawnego przeprowadzenia pomiarów jest sposób mocowania czujników na mierzonym obiekcie. Niewłaściwe (luźne) zamocowanie powoduje obniżenie częstości rezonansowej (Rys.14), a więc zawężenie użytecznego zakresu częstości czujnika.



Rys.14. Wpływ sposobu mocowania czujnika na częstotliwość rezonansową.

Optymalnym sposobem jest zamocowanie czujnika za pomocą wkrętów. Powierzchnia mocowania powinna być czysta i posmarowana cienką warstwą smaru. Inne sposoby mocowania czujników to przyklejenie za pomocą wosku pszczelego, klejów, taśmy dwustronnie przylepnej. Na płaskiej powierzchni magnetycznej do mocowania używa się magnesów. Przy pomiarach wstępnych, nie wymagających dużych dokładności, można zastosować ręczną sondę.
Niektóre nowoczesne przetworniki piezoelektryczne są dostępne z funkcją TEDS (*Transducer Electronic Data Sheet)* – elektroniczne dane techniczne przetwornika). Wbudowany do przetwornika układ pamięci zawiera informacje o przetworniku – jego identyfikator, czułość, termin ważności danych kalibracyjnych. W układzie pomiarowym następuje automatycznie detekcja danych i ich wprowadzenie do układu. Pozwala to na uniknięcie możliwych przy „ręcznym" wprowadzaniu nastaw pomyłek, a także ułatwia i przyspiesza przygotowanie pomiarów.

2.1.5. Czujniki laserowe.

Przy pomiarach drgań ważne jest, aby przyrząd pomiarowy nie wpływał na badany obiekt. Ma to szczególnie duże znaczenie w przypadku pomiaru drgań obiektów o małych wymiarach i masach, gdzie masa czujników umieszczonych na obiekcie może zmienić warunki pomiaru. W wielu przypadkach zamocowanie czujnika nie jest w ogóle możliwe ze względu na warunki pracy badanych obiektów. Czujniki laserowe umożliwiają bezkontaktowy pomiar drgań praktycznie na dowolnej powierzchni badanego obiektu, pomiar z dużej odległości i w trudnych warunkach otoczenia, np. w wysokich temperaturach. Ponadto można je stosować w przypadku drgań o niskich częstotliwościach, których pomiar za pomocą akcelerometrów lub czujników elektrodynamicznych sejsmicznych, jest trudny, a często niemożliwy. Stosowane są optyczne **dalmierze laserowe** (laserowe dalmierze triangulacyjne) i **wibrometry laserowe** wykorzystujące efekt Dopplera.

Laserowe dalmierze triangulacyjne umożliwiają pomiar przemieszczeń statycznych i dynamicznych. Dioda laserowa wytwarza wiązkę światła padającą na powierzchnię drgającego obiektu. Światło odbite jest kierowane na światłoczułą matrycę CCD, gdzie jest przetwarzane w czasie rzeczywistym.

Rys. 15. Laserowy czujnik triangulacyjny firmy Micro Epsilon.

Optyczny dalmierz laserowy składa się ze źródła światła - nadajnika i odbiornika - obiektywu (za któ-rym którym znajduje się matryca CCD) o znanym wzajemnym położeniu i równoległych osiach optycznych. Odbiornik oddalony jest od nadajnika o stałą odległość zwaną bazą ***b*** i nachylony jest pod kątem ***α***. Wiązka światła odbita od przedmiotu w odległości ***r*** pada na detektor CCD za obiektywem odbiornika. Znając ogniskową obiektywu oraz miejsce padania wiązki światła na detektor ***dx*** możemy wyznaczyć odległość od obiektu:

$$r = \frac{b}{\frac{dx}{f} + \frac{1}{tg\alpha}} \tag{19}$$

gdzie:
r - odległość od przedmiotu
b - baza dalmierza
f - ogniskowa
α - kąt nachylenia nadajnika
dx - miejsce padania wiązki światła na detektor CCD

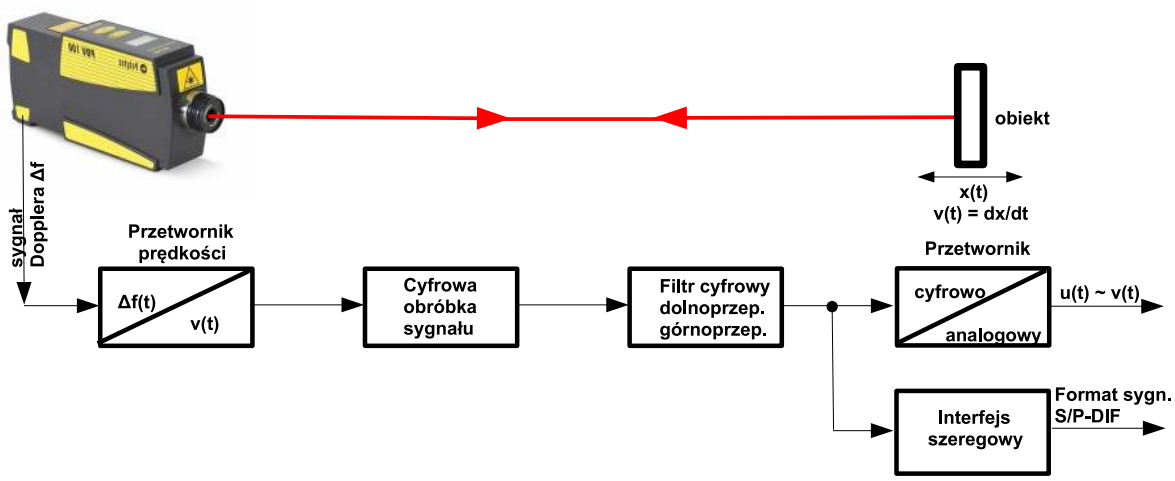
Zasada działania **wibrometru laserowego** polega na porównaniu odbitej od badanego obiektu i docierającej do fotodetektora wiązki lasera ze znanym sygnałem referencyjnym. Gdy źródło fali lub odbiornik porusza się, częstotliwość światła zmienia się w wyniku efektu Dopplera. Częstotliwość fali rośnie (barwa światła przesuwa się w kierunku fioletu) przy wzajemnym zbliżaniu się źródła i odbiornika, a maleje (barwa światła przesuwa się w kierunku czerwieni) podczas oddalania się źródła fali i odbiornika. Mierząc tę różnicę częstotliwości, jesteśmy w stanie bezpośrednio odczytać prędkość badanego obiektu. Dalsza cyfrowa obróbka sygnału pozwala uzyskać informacje o amplitudzie drgań, prędkości, przyspieszeniu i widmie częstotliwościowym.
Częstotliwość światła laserowego głowicy wyraża zależność:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} \tag{20}$$

gdzie:
c – prędkość światła
λ – długość fali lasera
Zależność pomiędzy częstotliwością Dopplera f_D, długością fali λ oraz prędkością obiektu v przedstawia wzór

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \tag{21}$$

Zastosowany w ćwiczeniu wibrometr laserowy firmy Polytec umożliwia bezstykowy pomiar drgań o częstotliwości od 0 do 22kHz, z odległości 0,2m do 30m.



Rys.16. Schemat pomiaru prędkości drgań miernikiem PDV-100 firmy Polytec.

3. Przebieg ćwiczenia.
Przeprowadzić pomiary drgań wybranego przez prowadzącego obiektu.
1. dobrać odpowiedni czujnik
2. przeprowadzić wzorcowanie czujnika
3. przeprowadzić pomiary parametrów drgań (amplituda, częstotliwość)
4. dla czujnika elektrodynamicznego uwzględnić poprawkę.

4. Literatura

1. Parszewski Z.: Dynamika i drgania maszyn, WNT, Warszawa 1992,
2. Hagel R., Zakrzewski J.: Miernictwo dynamiczne, WNT, Warszawa 1984,
3. Katalogi firmy Philips, Brüel & Kjær, PCB, Polytec.