

Ćwiczenie 1

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 są rodzajem 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, np. parcie gazów spalinowych na tłok, lub jako siły oporu (np. przy skrawaniu), a także wskutek uderzeń, przy zmianach obciążenia, zmianach warunków zewnętrznych, w wyniku luzów i nierówności. Poza drganiami wymuszonymi związanymi z ruchem maszyn, mogą też występować drgania samowzbudne, które powstają np. podczas pracy narzędzi skrawających.

Nadmierne drgania powodują szybsze zużycie maszyn, zmęczenie materiałów, hałas, oraz szkodliwie oddziałują na ludzi. 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 rezonansów w pewnych częściach maszyny,
- wyłumienie 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. Wielkości te są ze sobą związane następującymi zależnościami:

$$v = \frac{dx}{dt}; \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (1.1)$$

Wystarczy dokonywać pomiaru jednej z powyższych wielkości, natomiast pozostałe mogą być otrzymywane na drodze całkowania lub różniczkowania. W przypadku harmonicznego ruchu drgającego odbywającego się z częstością ω , przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie wyrażają zależności:

$$x = x_0 \cos \omega t; \quad v = -\omega x_0 \sin \omega t; \quad a = -\omega^2 x_0 \cos \omega t. \quad (1.2)$$

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. Wyływałby 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 wielkości mechanicznych na drodze elektrycznej, do której z wielkości mechanicznych jest proporcjonalny pierwotny sygnał elektryczny, otrzymany z czujnika.

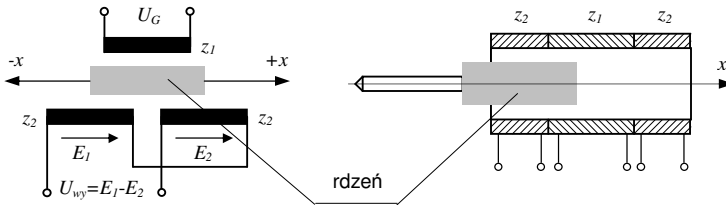
Najczęściej spotykanymi czujnikami do pomiaru drgań mechanicznych są:

- czujniki indukcyjne transformatorowe, które dają sygnał proporcjonalny do przemieszczenia,
- czujniki elektrodynamiczne – dostarczające sygnał proporcjonalny do prędkości,
- piezoelektryczne czujniki sejsmiczne – dające sygnał proporcjonalny do przyspieszenia.

2.1.1. Pomiar drgań czujnikami transformatorowymi różnicowymi

W czujnikach transformatorowych o zmiennej indukcyjności wzajemnej wykorzystuje się do pomiarów zależność siły elektromotorycznej indukowanej z uzwojenia pierwotnego do uzwojenia wtórnego, od współczynnika indukcyjności wzajemnej. Czujnik pokazany na Rys. 1.1 posiada uzwojenie pierwotne z_1 i dwa

uzwojenia wtórne z_2 (o tej samej liczbie zwojów), nawinięte na cylindryczną tuleję izolacyjną. Uzwojenia te są połączone przeciwsośnie (różnicowo). Wewnątrz tulei przesuwają się rdzeń ferromagnetyczny połączony przez trzpień z obiektem drgań. Uzwojenie pierwotne jest zasilane napięciem sinusoidalnie zmiennym, zwykle o częstotliwości od 50 Hz do 50 kHz.



Rys. 1.1. Czujnik indukcyjny transformatorowy.

Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniach wtórnych wynosi:

$$e_2 = -z_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.3)$$

Część Φ_0 strumienia magnetycznego Φ wytworzonego przez cewkę uzwojenia pierwotnego o z_1 zwojach jest skojarzona ze zwojami z_2 obu uzwojeń wtórnych. Część Φ' tego strumienia jest skojarzona z cewką górną, natomiast część Φ'' z cewką dolną. W cewkach tych o z_2 zwojach powstają siły elektromotoryczne:

$$E_1 = \omega z_2 (\Phi_0 + \Phi'); \quad E_2 = \omega z_2 (\Phi_0 + \Phi''). \quad (1.4)$$

W przypadku środkowego położenia rdzenia, $\Phi' = \Phi'' = \Phi_1$, a ponieważ uzwojenia są połączone różnicowo, więc $U_{wy} = E_1 - E_2 = 0$. Przesunięcie rdzenia np. w górę powoduje zwiększenie strumienia Φ' przenikającego cewkę górną o $\Delta\Phi$, jednocześnie strumień Φ'' przenikający cewkę dolną, zmniejszy się o $\Delta\Phi$: $\Phi' = \Phi_1 + \Delta\Phi$, oraz $\Phi'' = \Phi_1 - \Delta\Phi$.

Napięcie wyjściowe z czujnika będzie więc równe:

$$U_{wy} = E_1 - E_2 = 2\omega z_2 \Delta\Phi. \quad (1.5)$$

Zmiana strumienia magnetycznego wynosi:

$$\Delta\Phi = \frac{I z_1}{R_{\mu_1}} - \frac{I z_1}{R_{\mu_2}} = I z_1 \frac{\Delta R_{\mu}}{R_{\mu_1} R_{\mu_2}}, \quad (1.6)$$

gdzie:

ΔR_{μ} – zmiana oporności magnetycznych uzwojeń R_{μ_2} oraz R_{μ_1} , spowodowana przesunięciem rdzenia z położenia środkowego o wartość x ;

I – prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym;

ω – pulsacja prądu I , ($\omega = 2\pi f$, f – częstotliwość prądu zasilającego uzwojenie).

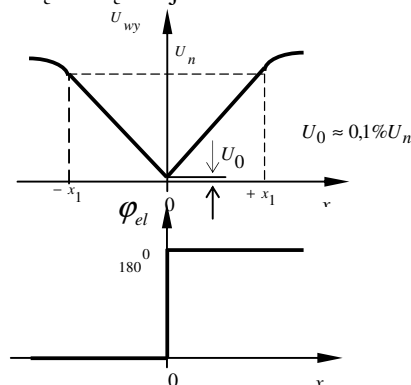
Zmiana oporności magnetycznej (reluktancji) ΔR_μ jest proporcjonalna do przesunięcia x rdzenia

$$\frac{\Delta R_\mu}{R_{\mu_1} R_{\mu_2}} = k_0 x. \quad (1.7)$$

Ostatecznie otrzymuje się:

$$U_{wy} = 2k_0 \omega z_1 z_2 I x = kx. \quad (1.8)$$

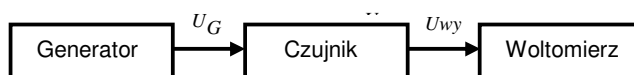
Czujniki indukcyjne różnicowe posiadają dużą dokładność i czułość, gdyż uzwojenia mogą mieć dużą liczbę zwojów.



Rys. 1.2. Zależność amplitudy i fazy czujnika transformatorowego różnicowego od przesunięcia rdzenia.

Rys.1.2 przedstawia charakterystykę napięcia U_{wy} na wyjściu czujnika, oraz kąta przesunięcia fazowego φ_{el} tego napięcia względem napięcia zasilającego, w funkcji położenia rdzenia x . Należy zwrócić uwagę, że napięcie wyjściowe z czujnika jest napięciem przemiennym o częstotliwości napięcia zasilającego uzwojenie pierwotne. Przy zmianie kierunku przesunięcia rdzenia (np. z $+x$ na $-x$), faza napięcia wyjściowego zmienia się o 180 stopni. Przy położeniu rdzenia odpowiadającemu $x = 0$, na wyjściu czujnika panuje pewne niewielkie napięcie niezrównoważenia U_G , spowodowane nieuniknioną magnetyczną i elektryczną asymetrią układu.

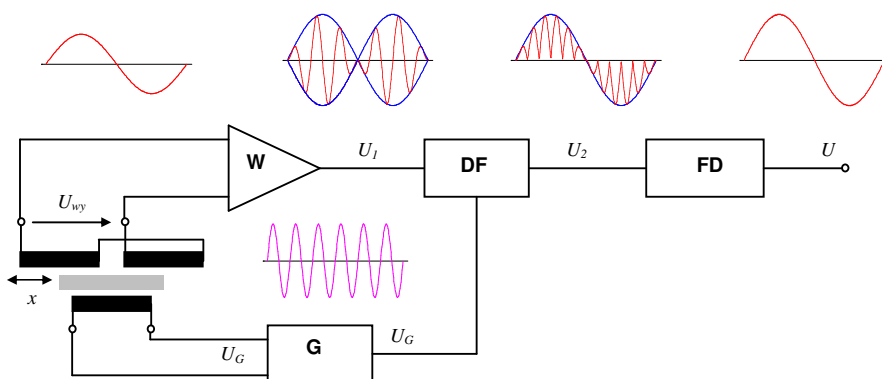
Najprostszy układ pomiarowy przedstawiony jest na Rys. 1.3. Generator zasila czujnik napięciem o stałej amplitudzie i stałej częstotliwości. Napięcie wyjściowe z czujnika, będące miarą przesunięcia rdzenia, jest mierzone zwykłym woltomierzem prądu przemiennego.



Rys. 1.3. Pomiar przemieszczenia przy użyciu woltomierza

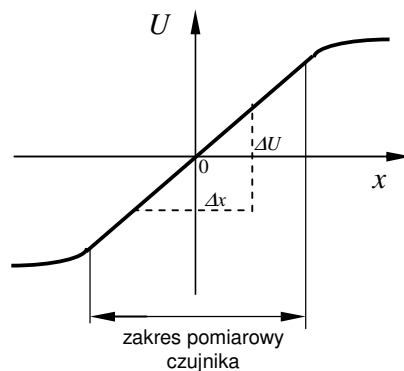
Układ ten umożliwia tylko określenie zależności amplitudy napięcia wyjściowego z czujnika, od wychylenia rdzenia czujnika z położenia środkowego. Nie jest więc możliwe określenie kierunku przemieszczenia rdzenia, gdyż miernik napięcia przemiennego nie reaguje na fazę napięcia. W takim układzie, dla jednoznacznego pomiaru przemieszczeń można wykorzystać tylko połowę zakresu pomiarowego czujnika - jedną z dwu gałęzi charakterystyki (Rys. 1.2).

Najczęściej czujniki transformatorowe pracują w układzie, którego schemat przedstawiono na Rys. 1.4. Generator G zasila czujnik i prostownik fazoczuły napięciem o stałej amplitudzie i częstotliwości. Wzmacniacz W służy do wzmocnienia napięcia U_{wy} z czujnika. W prostowniku fazoczułym DF napięcie ze wzmacniacza podlega prostowaniu z uwzględnieniem fazy tego napięcia względem napięcia U_G z generatora. Napięcie to przyjmuje wartości dodatnie i ujemne w zależności od kierunku wychylenia 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. 1.4. Schemat blokowy miernika z falą nośną i prostowaniem fazoczułym.

Wzorcowanie czujników transformatorowych różnicowych polega na wyznaczeniu zależności $U = f(x)$, a więc czujnik wzorcuje się razem z układem pomiarowym. Czujniki tego typu wzorcuje się statycznie, mierząc, np. przy użyciu śruby mikrometrycznej, przemieszczenia x rdzenia i jednocześnie, miernikiem prądu stałego, wartości U napięcia wyjściowego układu, dla jego kolejnych położeń.



Rys. 1.5. Charakterystyka statyczna układu z prostowaniem fazoczułym.

Czułością k układu nazywa się stosunek przyrostu napięcia ΔU do przyrostu przemieszczenia rdzenia Δx (Rys. 1.5)

$$k = \frac{\Delta U}{\Delta x}. \quad (1.9)$$

Cechy czujników transformatorowych różnicowych:

- sygnał elektryczny proporcjonalny jest do przemieszczenia;
- możliwość pomiaru przemieszczeń statycznych i dynamicznych;
- 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 mierzonych drgań f_{\max} jest ograniczona częstotliwością f_G napięcia zasilającego generatora, przy czym przyjmuje się

$$f_{\max} \leq \left(\frac{1}{5} \div \frac{1}{10}\right) f_G. \quad (1.10)$$

Ruchomy trzpień (połączony z rdzeniem czujnika) styka się z obiektem drgającym - mierzone są więc 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 E w uzwojeniu poruszającym się w polu magnesu trwałego:

$$E = Blv, \quad (1.11)$$

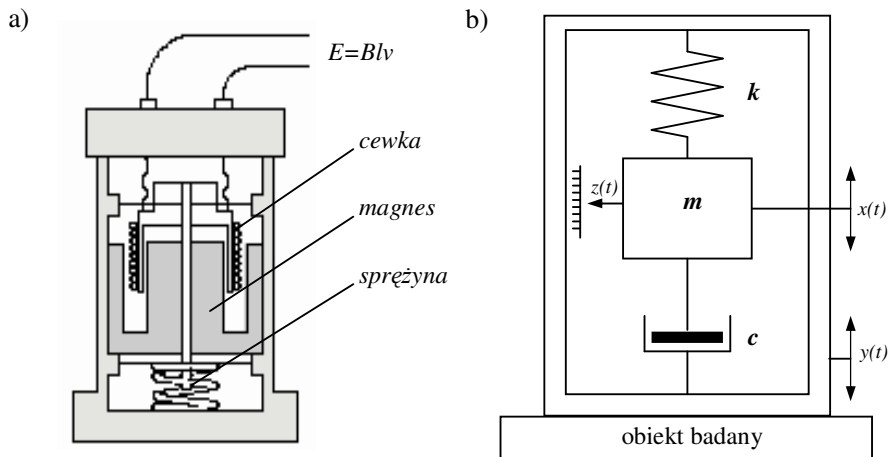
gdzie:

B – indukcja wytwarzana przez magnes trwały;

l – długość uzwojenia (zależy od liczby zwojów);

v – prędkość uzwojenia w polu magnesu (prędkość względna cewki i magnesu).

Czujnikami elektrodynamicznymi można mierzyć bezpośrednio prędkość drgań. Czujniki elektrodynamiczne są czujnikami generacyjnymi, tzn. nie wymagają zasilania, a same wytwarzają siłę elektromotoryczną



Rys. 1.6. Budowa i model układu mechanicznego czujnika elektrodynamicznego sejsmicznego.

W czujnikach elektrodynamicznych najczęściej cewka porusza się względem magnesu, ale są też rozwiązania z ruchomym magnesem. W obu przypadkach siła elektromotoryczna jest proporcjonalna do prędkości względnej cewki i magnesu.

Czujniki elektrodynamiczne budowane są jako czujniki drgań względnych i drgań bezwzględnych (sejsmiczne). Czujnikiem sejsmicznym nazywa się układ o jednym stopniu swobody posiadający masę sejsmiczną m , sprężynę o sztywności k i tłumik wiskotyczny o współczynniku tłumienia c . Obudowa czujnika przymocowana jest do obiektu drgającego (Rys. 1.6).

Na podstawie zasady d' Alemberta, można przedstawić równanie ruchu masy m

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0. \quad (1.12)$$

Sygnal wyjściowy (pomiarowy), zależy zwykle od ruchu względnego $z(t)$ (Rys. 1.6b) masy i obudowy:

$$z(t) = x(t) - y(t), \quad (1.13)$$

gdzie:

$x(t)$ - współrzędna opisująca ruch masy względem układu nieruchomego (względem ziemi),

$y(t)$ - współrzędna opisująca ruch obudowy czujnika, czyli ruch badanego obiektu.

Zatem równanie ruchu (1.12) można napisać w następującej postaci:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y}, \quad (1.14)$$

lub w postaci:

$$\ddot{z} + 2h\dot{z} + \alpha^2 z = -\ddot{y}, \quad (1.15)$$

gdzie:

$$\alpha = \sqrt{\frac{k}{m}} - \text{częstość kołowa drgań własnych układu;}$$

$$h = \frac{c}{2m} - \text{odniesiony do masy współczynnik tłumienia wiskotycznego;}$$

$$\varepsilon = \frac{h}{\alpha} - \text{bezwymiarowy współczynnik tłumienia.} \quad (1.16)$$

Jeśli wymuszenie drgań obiektu ma charakter harmoniczny opisany funkcją $y = y_0 \sin \omega t$, rozwiązanie równania (1.15) ma dwie składowe: przejściową o częstości kołowej drgań tłumionych $\lambda = \sqrt{\alpha^2 - h^2}$, zanikającą z prędkością i zależną od tłumienia względnego ε , oraz składowa ustalona drgań wymuszonych:

$$z = z_0 \sin(\omega t - \varphi). \quad (1.17)$$

Amplitudę z_0 i fazę drgań względnych φ (kąt przesunięcia fazowego) określają zależności:

$$z_0 = y_0 \frac{\omega^2}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2h\omega)^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{2h\omega}{\alpha^2 - \omega^2} \quad (1.18)$$

Stosunek amplitudy drgań względnych z_0 , do amplitudy drgań obiektu (obudowy) y_0 , jest czułością k przetwornika i wyraża się wzorem:

$$k = \frac{z_0}{y_0} = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2h\omega)^2}}. \quad (1.19)$$

Wykres stosunku amplitud drgań względnych i drgań wymuszających (mierzonych), w funkcji częstotliwości wymuszenia lub stosunku ω/α ma

wielorakie zastosowanie, ponieważ:

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

$$\frac{z_0}{y_0} = \frac{z_0 \omega}{y_0 \omega} = \frac{z_0 \omega^2}{y_0 \omega^2}, \quad (1.20)$$

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

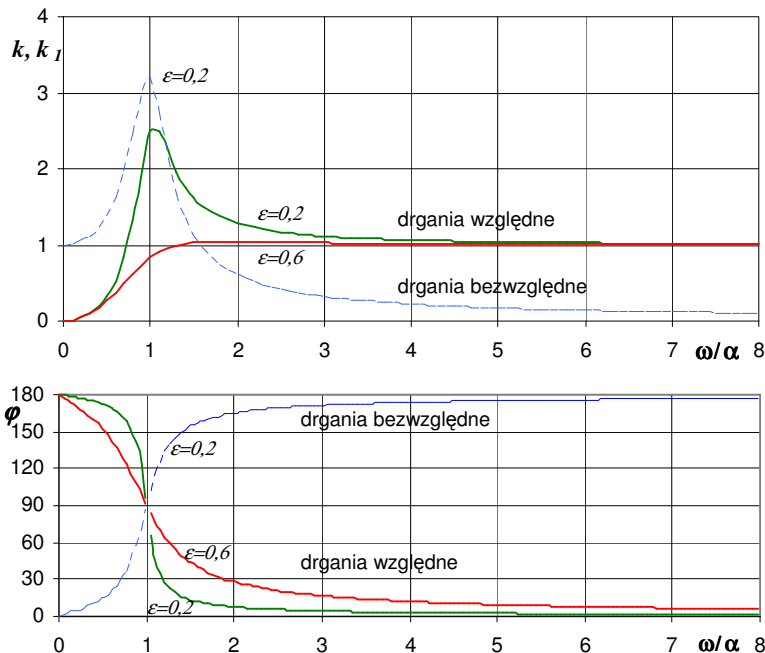
$y_0, y_0 \omega, y_0 \omega^2$ - amplitudy przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia drgań obudowy (mierzonych drgań);

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

Dla ruchu bezwzględnego x masy m , współczynnik przenoszenia $k_1 = \frac{x_0}{y_0}$

oraz kąt przesunięcia fazowego φ określają następujące zależności:

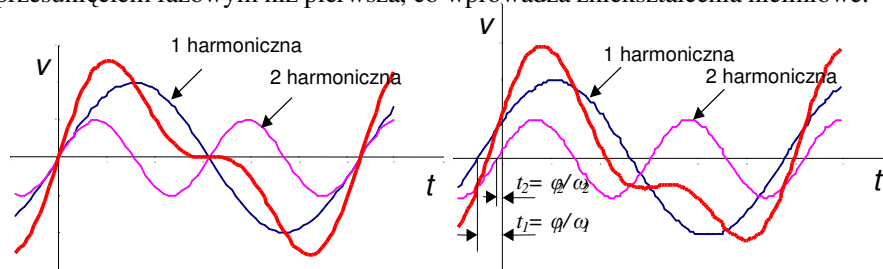
$$k_1 = \frac{x_0}{y_0} = \frac{\sqrt{\alpha^4 + (2h\omega)^2}}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2h\omega)^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{-2h\omega}{\alpha^2 - \omega^2}. \quad (1.21)$$



Rys. 1.7. Charakterystyka częstotliwościowa amplitudowa i fazowa czujnika sejsmicznego

Czujnik nie wprowadza błędu tylko w przypadku, gdy $z_0/y_0 = 1$ (Rys. 1.7). Praktycznie ma to miejsce, gdy częstość mierzonych drgań ω jest co najmniej 3 razy większa niż α . Masa sejsmiczna jest wtedy praktycznie nieruchoma względem ziemi. Przez odpowiedni dobór tłumienia, można uzyskać większy zakres płaskiej charakterystyki amplitudowej. Najkorzystniejszym jest współczynnik $\varepsilon = h/\alpha \approx 0,6$. Uwzględnienie poprawki amplitudy oraz poprawki kąta przesunięcia fazowego, pozwala rozszerzyć zakres pomiarowy czujnika na obszar częstotliwości bliskich, a nawet niższych od częstotliwości α .

Czujnik powinien dawać niezniekształcony obraz mierzonych drgań, czyli nie powinny występować zniekształcenia amplitudy i fazy. O ile błąd amplitudy przy dostatecznie dużej częstotliwości mierzonych drgań w stosunku do częstotliwości naturalnej czujnika jest pomijalny, to przesunięcie fazowe jest przyczyną zniekształceń nieliniowych złożonych przebiegów drgań (zawierających różne częstotliwości). Np. badany sygnał (Rys. 1.8), zawiera drugą harmoniczną, która przez czujnik zostanie odtworzona z innym przesunięciem fazowym niż pierwsza, co wprowadza zniekształcenia nieliniowe.

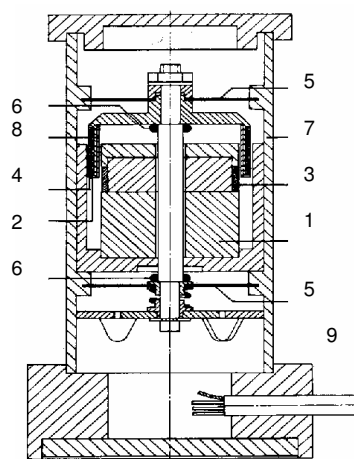


Rys. 1.8. Wpływ przesunięcia fazowego w czujniku elektrodynamicznym na zniekształcenia nieliniowe.

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 przez zwiększenie liczby zwojów cewki;
- mała rezystancja cewki jako źródła napięcia, (rzędu 10 k Ω), umożliwiająca 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 częstotliwość własna drgań wynosi 10 ÷ 20 Hz.

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 zmianę współczynnika tłumienia w celu skompensowania wpływu temperatury na współczynnik tłumienia oraz kompensację ugięcia statycznego sprężyn przy pomiarze drgań w kierunku pionowym – poprzez doprowadzenie do uzwojenia stałego prądu z zewnętrznego źródła.



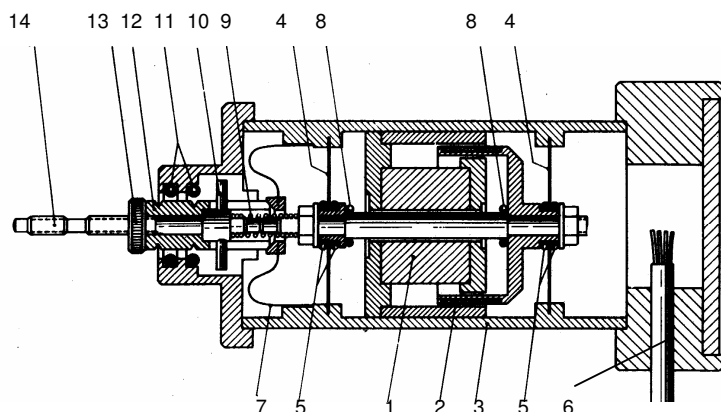
Rys. 1.9. Elektrodynamiczny czujnik sejsmiczny typu PR9266 i jego charakterystyki amplitudowe. Oznaczenia: 1 - magnes trwały, 2 - cewka pomiarowa, 3 - uzwojenie tłumiące, 4 - uzwojenie korekcyjne, 5 - sprężyny membranowe, 6 - ogranicznik, 7 - obudowa, 8 - kabel ekranowany (za zgodą firmy Philips).

Podstawowe dane techniczne czujnika PR9266 (Rys. 1.9):

- wymiary : średnica ok. 58 mm, wysokość 101 mm;
- masa czujnika 490 g;
- masa układu ruchomego czujnika 21 g;
- częstotliwość rezonansowa (bez tłumienia) w kierunku poziomym ok. 12 Hz;
- częstotliwość rezonansowa (bez tłumienia) w kierunku pionowym ok. 15 Hz;
- zakres częstotliwości mierzonych drgań $10 \div 1000$ Hz;
- współczynnik tłumienia ok. 0,6;
- czułość znamionowa $30 \text{ mV/mm}\cdot\text{s}^{-1}$;
- rezystancja cewki pomiarowej 2100Ω .

2.1.3 Czujnik elektrodynamiczny drgań względnych

W czujnikach drgań względnych, trzpień układu ruchomego czujnika (na ogół cewki) styka się z badanym obiektem drgającym, natomiast obudowa czujnika wymaga zamocowania w układzie odniesienia, który zwykle nie jest nieruchomy, a więc mierzone są drgania obiektu względem układu odniesienia.

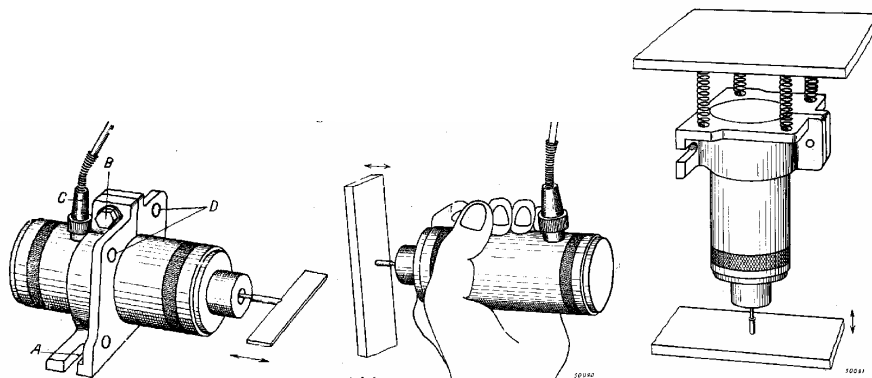


Rys. 1.10. Czujnik elektrodynamiczny typu PR9267 firmy Philips. Oznaczenia: 1 - magnes trwały, 2 - cewka pomiarowa, 3 - obudowa czujnika, 4 - membrany, 5 - pierścienie gumowe, 6 - kabel przyłączeniowy, 7 - sprężyna, 8 - ograniczniki, 9 - połączenie sprężyn, 10 - element napinający, 11 - pierścienie gumowe, 12 - element napinający, 13 - nakrętka, 14 - ruchomy trzpień; (za zgodą firmy Philips).

Podstawowe dane techniczne czujnika PR9267 (Rys. 1.10):

- zakres mierzonych częstotliwości $0 \div 1000$ Hz;
- maksymalna amplituda mierzonych drgań ± 1 mm, krótkotrwale ± 2 mm;
- maksymalne przyspieszenie mierzonych drgań 10 g ($98,1$ m/s²);
- minimalna mierzona prędkość $0,05$ mm/s;
- znamionowa czułość 30 mV/mm s⁻¹;
- masa czujnika 580 g;
- masa układu ruchomego czujnika 37 g.

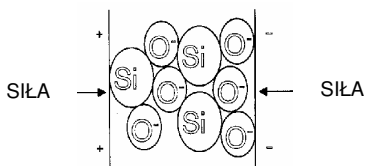
Przykłady pomiaru drgań czujnikiem drgań względnych przedstawione są na Rys. 1.11. Przy małej częstotliwości drgań układu odniesienia w stosunku do częstotliwości mierzonych drgań, błąd wynikający z ruchu obudowy może być niewielki, można np. czujnik trzymać ręką.



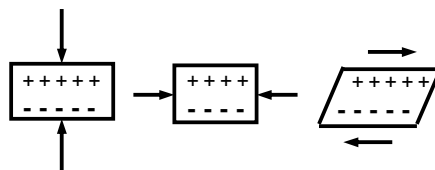
Rys. 1.11. Przykłady zastosowań czujnika elektrodynamicznego drgań względnych.

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, odkształczanych pod wpływem obciążeń mechanicznych.



Rys. 1.12. Efekt piezoelektryczny w siatce krystalicznej kwarcu.

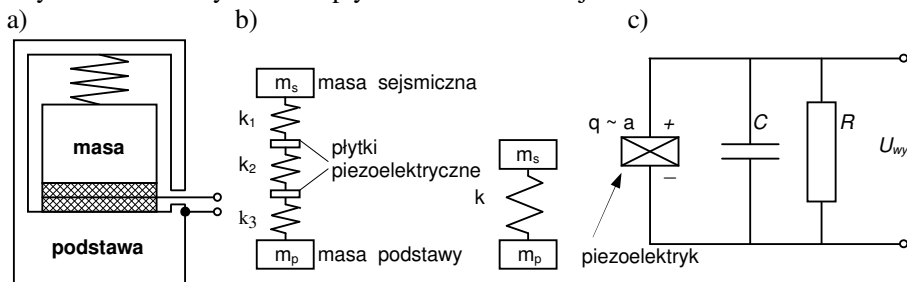


Rys.1.13. Efekt piezoelektryczny podłużny, poprzeczny i ścinania

Ładunki powstają przy naprężeniach ściskających, zginających i ścinających (Rys. 1.13). Czujniki piezoelektryczne stosuje się do pomiaru sił, przyspieszeń i ciśnień.

W przedstawionym na Rys. 1.14 czujniku, element przetwarzający składa się z dwóch płytek piezoelektryka, na których spoczywa masa m dociskana sprężyną o sztywności k , aby zapewnić stałe działanie siły bezwładności $F = ma$ podczas pomiarów. Cienkie metalowe elektrody (zwykle wykonane ze złota), służą do zbierania ładunków powstających na ściankach piezoelektryka. Sztywność

ścianek obudowy jest znacznie większa od sztywności k sprężyny, a więc sztywność obudowy nie ma wpływu na działanie czujnika.



Rys. 1.14. Piezoelektryczny czujnik przyspieszeń, a) schemat, b) zastępczy model mechaniczny, c) zastępczy model elektryczny.

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

$$q = kF = kma \quad (1.22)$$

Czujniki piezoelektryczne są czujnikami generacyjnymi, dają sygnał wtedy, gdy występuje zmiana obciążenia.

Piezoelektryczny czujnik przyspieszeń, którego budowę i model zastępczy przedstawiono na Rys. 1.14, można traktować jako słabo tłumiony układ masa - sprężyna o jednym stopniu swobody, opisany równaniem różniczkowym drugiego rzędu, którego rozwiązanie ma postać:

$$k_1 = \frac{a_y}{a_x} = \frac{\sqrt{\alpha^4 + (2h\omega)^2}}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + (2h\omega)^2}}, \quad (1.23)$$

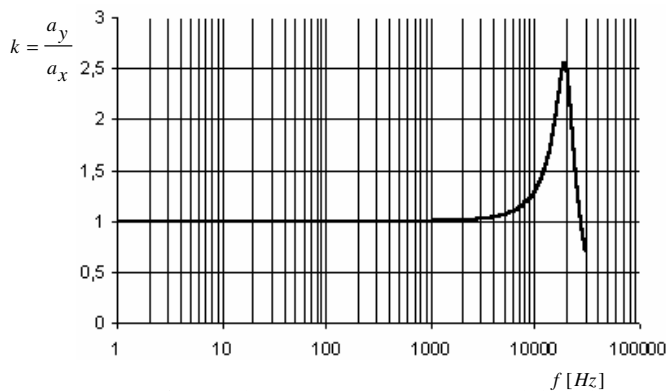
gdzie:

- 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.

Czujniki piezoelektryczne narzucają układowi pomiarowemu specjalne wymagania dotyczące zarówno rezystancji, jak i pojemności wejściowej użytej aparatury. Od ich wartości zależy zakres częstotliwości drgań mierzonych tymi czujnikami, jak również i czułość układów pomiarowych.

Przy skokowej zmianie wymuszenia, na skutek istniejącej rezystancji wewnętrznej czujnika R nastąpi rozładowanie pojemności w obwodzie RC w sposób wykładniczy ze stałą czasową $T = RC$ (Rys. 1.16a), zgodnie z zależnością:

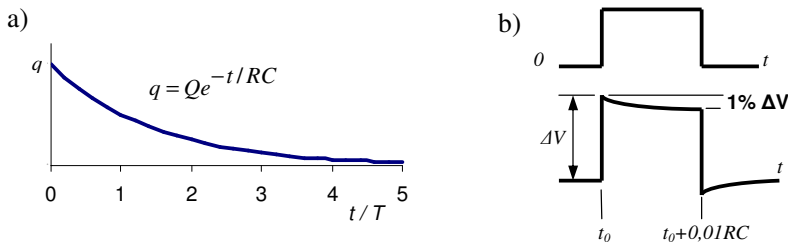
Komentarz [BJ1]:



Rys. 1.15. Przykładowa charakterystyka czujnika piezoelektrycznego

$$q = Q \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (1.24)$$

Na Rys. 1.16b pokazano przebieg sygnału wyjściowego w odpowiedzi na wymuszenie prostokątne.

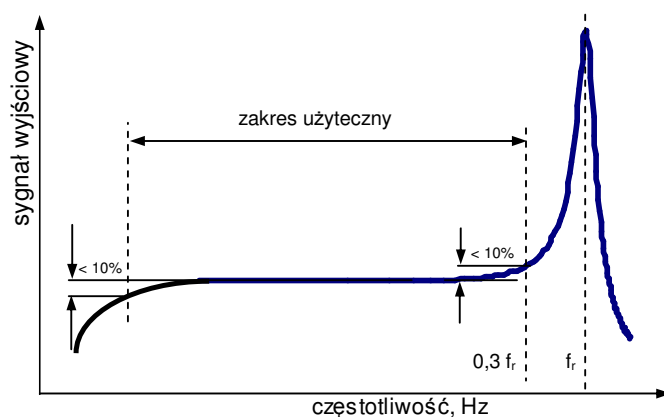


Rys. 1.16. Przebiegi: a) krzywej rozładowania, b) odpowiedzi czujnika na wymuszenie prostokątne.

Dla czujników piezoelektrycznych kwarcowych stała czasowa samoistnego rozładowania czujnika jest bardzo duża i wynosi około $10^2 \dots 10^4$ s, gdyż kwarc posiada rezystancję rzędu $10^{12} \Omega$. Pojemności są rzędu pikofaradów (10^{-12} F). Umożliwia to pomiary drgań quasistatycznych o częstotliwościach 10^{-2} Hz, a więc drgań o okresie rzędu minut, co przy górnej częstotliwości wynoszącej kilkadziesiąt kiloherców, (ograniczonej względami mechanicznymi), daje bardzo szeroki zakres stosowania czujników piezoelektrycznych. Wykorzystanie ich w pełnym zakresie zależy od rezystancji wejściowej aparatury użytej do pomiaru. Dołączenie oporności wejściowej aparatury powoduje zmianę stałej czasowej czujnika.

Praktycznie, górny zakres częstotliwości mierzonych drgań wynosi 0,3...0,5 częstotliwości rezonansowej – błąd nie przekracza wtedy 12%. Przy

częstotliwości $f = 0,3 f_r$ błąd wynosi około 10% (Rys. 1.17), dolny zakres częstotliwości jest ograniczony parametrami elektrycznymi czujnika i urządzeń bezpośrednio do niego dołączonych.



Rys. 1.17. Użyteczny zakres częstotliwości czujnika piezoelektrycznego.

Jeżeli czujniki mają dużą pojemność wewnętrzną, mogą być bezpośrednio dołączone do układu pomiarowego (oscylloskop, analizator) posiadającego dużą impedancję wejściową ($> 1M\Omega$). Na ogół jednak ta pojemność jest mała, rzędu pikofaradów. Dla umożliwienia pomiaru sygnału z czujnika bez pogarszania jego własności, stosuje się wzmacniacze. Wyjście czujnika o dużej impedancji jest we wzmacniaczu przekształcone na sygnał napięciowy o małej oporności wewnętrznej.

Istnieją dwa podstawowe typy przetworników piezoelektrycznych:

- z wyjściem ładunkowym – cechuje je duża impedancja wyjściowa elementu piezo-elektrycznego (bez wbudowanej wewnątrz elektroniki) i wymagają na ogół zewnętrznego wzmacniacza ładunkowego lub napięciowego w celu dalszego wykorzystania sygnału;
- z wewnętrznym wzmacniaczem — z wbudowanym scalonym układem wzmacniającym zasilanym z zewnątrz. Cechuje je mała impedancja wyjściowa. Produkują je różne firmy stosując własne nazwy, np. firma Kiestler - **PIEZOTRON**[®], firma PCB Piezotronics - **ICP**[®] (*Integrated Circuit Piezoelectric*), firma Brüel & Kjær - **DELTATRON**[®], firma Endevco - **ISOTRON**[®]. Amerykańska organizacja IEEE proponuje w swej normie nazwę **IEPE** – (przetworniki) piezoelektryczne ze zintegrowaną elektroniką (*Integrated Electronic Piezoelectric*).

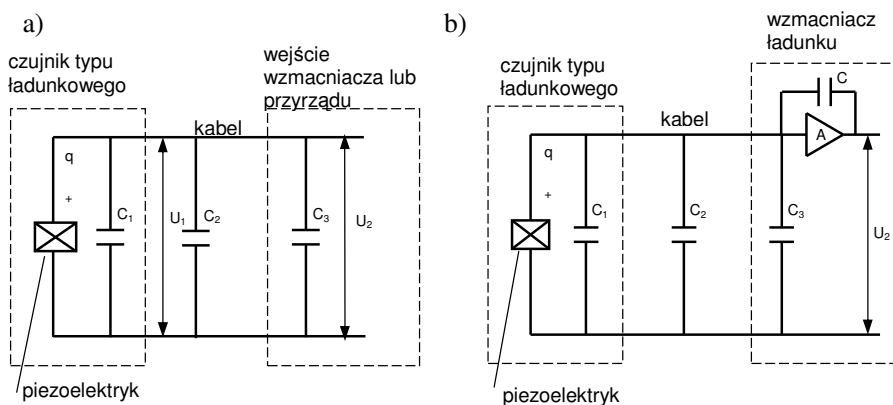
Na Rys. 1.18a przedstawiającym schemat układu pomiarowego czujnik – kabel – wzmacniacz napięcia lub inne urządzenie o dużej impedancji wejściowej, nie

pokazano rezystancji pomiędzy sygnałem a masą, zakładając, że jest duża ($>10^{12}$ omów). Dla otwartego (nieobciążonego) układu, napięcie wyjściowe przetwornika wyraża zależność:

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \quad (1.25)$$

gdzie: q – ładunek w pC;

C_1 – pojemność wewnętrzna czujnika (kryształu) w pF.



Rys. 1.18. Schemat układu: a) ze wzmacniaczem napięciowym, b) ze wzmacniaczem ładunkowym.

Napięcie mierzone na przyrządzie odczytowym, lub stopniu wejściowym wzmacniacza zależy od pojemności kabla i pojemności wejściowej dołączonego do czujnika układu:

$$U_2 = \frac{q}{C_1 + C_2 + C_3}, \quad (1.26)$$

gdzie: C_2 – pojemność kabla w pF;

C_3 – pojemność wejściowa wzmacniacza lub miernika w pF.

Zależność czułości napięciowej układu od całkowitej pojemności, poważnie ogranicza długość kabla (czułość podawana jest przez wytwórcę dla określonej długości kabla). Istotnym jest też, by kabel (o niskim poziomie szumów), łączący czujnik z przyrządem pomiarowym był suchy i czysty, a w przypadku pomiarów w warunkach wilgotnych, połączenia kabla z czujnikiem i z przyrządem powinny być uszczelnione.

We wzmacniaczu ładunku (Rys. 1.18b), w obwodzie sprzężenia zwrotnego umieszczony jest kondensator C_f . Rezystancja izolacji (pomiędzy sygnałem i masą), jako duża ($>10^{12} \Omega$) nie została pokazana na rysunku. Napięcie wyjściowe wzmacniacza wynosi:

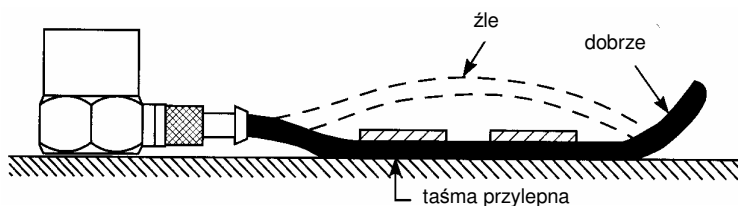
$$U_2 = \frac{qA}{C_1 + C_2 + C_3 - C_f(A-1)}, \quad (1.27)$$

gdzie: A – wzmacnienie napięciowe wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego.

Ponieważ A ma bardzo dużą wartość (rzędu 10^5), to $C_f(A-1) \gg (C_1 + C_2 + C_3)$. Napięcie wyjściowe zależy tylko od stosunku ładunku do pojemności kondensatora sprzężenia zwrotnego C_f , więc wpływ pojemności kabla jest pomijalny.

$$U_2 \approx -\frac{q}{C_f} \quad (1.28)$$

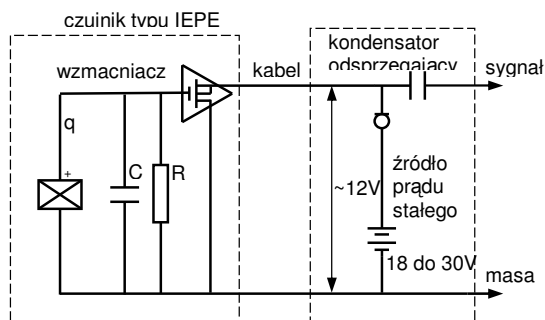
Podobnie jak dla wzmacniaczy napięciowych są ograniczenia zastosowań długich kabli we wzmacniaczach ładunkowych, ponieważ szumy na wyjściu wzmacniacza bezpośrednio zależą od stosunku całkowitej pojemności układu ($C_1 + C_2 + C_3$) do pojemności sprzężenia zwrotnego C_f . Ponadto duża impedancja czujnika 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. 1.19. 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.

Przedstawiony na Rys. 1.20 układ składa się z czujnika typu IEPE, zasilacza stabilizowanego 18 do 30V, obwodu zasilania stałym prądem oraz kondensatora odsprężającego (odcinającego składową stałą napięcia polaryzacji). Na wyjściu otrzymujemy sygnał do pomiaru lub analizy.



Rys. 1.20. Przykład toru pomiarowego czujnika ze zintegrowaną elektroniką.

Cechy czujników piezoelektrycznych ze zintegrowaną elektroniką:

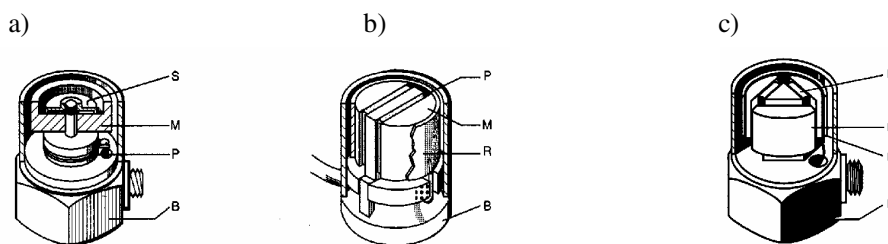
- nie wymagają specjalnych kabli – wystarcza zwykły kabel dwużyłowy lub koncentryczny;
- stała czułość niezależna od długości kabla;
- zasilanie ze źródła prądowego umożliwia stosowanie tego samego dwużyłowego kabla również do przesyłania sygnału z czujnika;
- niska impedancja wyjściowa – poniżej 100 Ω ;
- zwarta budowa;
- koszt kanału pomiarowego jest mniejszy w porównaniu z zewnętrznym wzmacniaczem;
- ograniczony zakres temperatur (125°C dla zwykłych konstrukcji, 150°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 piezoelektryczne do zastosowań ogólnych, precyzyjne, miniaturowe, do pomiarów w wysokich lub niskich temperaturach, do pomiaru udarów, oraz jako czujniki trójosiowe. Czujnik trójosiowy umożliwia pomiar przyspieszeń w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach.

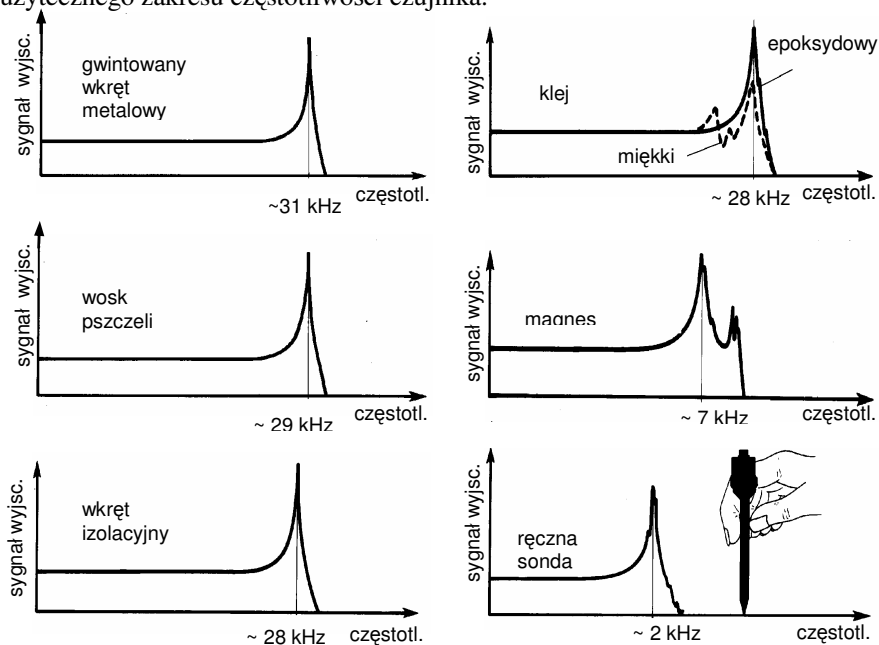
W większości produkowanych obecnie czujników wykorzystuje się piezoelektryczny efekt ścinania np. typ Shear[®] firmy PCB, czy Planar Shear, DeltaShear[®], ThetaShear[®] firmy Brüel & Kjær, wykazujące małą wrażliwość na niepożądane wpływy otoczenia np. temperaturę, ciśnienie akustyczne, dużą

culość w stosunku do masy czujnika, małą nieliniowość charakterystyki częstotliwościowej. Na Rys. 1.21 pokazano przykłady rozwiązań konstrukcyjnych czujników.



Rys. 1.21. Czujniki typu Shear[®], a – tradycyjny typ ściskany, b – typ Planar Shear, c – typ Delta Shear[®]. Oznaczenia: S-sprężyna, M-masa sejsmiczna, P-element piezoelektryczny, B- podstawa, R- pierścień ściskający.

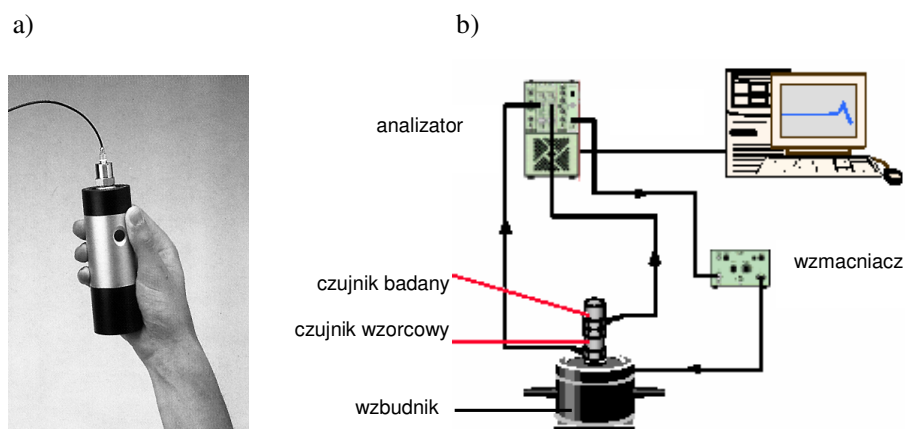
Istotnym dla poprawnego przeprowadzenia pomiarów jest sposób mocowania czujników na mierzonym obiekcie. Niewłaściwe (luźne) zamocowanie powoduje obniżenie częstotliwości drgań własnych czujnika (Rys. 1.22), a więc zawężenie użytecznego zakresu częstotliwości czujnika.



Rys. 1.22. 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 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.

Czujniki piezoelektryczne mają stabilną czułość, jednak czasami obowiązujące normy wymagają np. sprawdzenia czułości przed i po przeprowadzeniu pomiarów. Do tego celu służą przenośne kalibratory umożliwiające sprawdzenie czujników z przyspieszeniem 10 ms^{-2} przy częstotliwości kołowej $\omega = 1000 \text{ rad/s}$ (Rys. 1.23a) lub inne wzbudniki dające wzorcowy sygnał przyspieszenia. Zestaw pomiarowy z Rys. 1.23b umożliwia wzorcowanie czujników w całym zakresie częstotliwości.



Rys. 1.23. Przykład sprawdzenia czułości czujnika a) przy pomocy przenośnego kalibratora oraz b) wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej przy pomocy wzbudnika kalibracyjnego (za zgodą firmy Bruel&Kjaer).

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.

3. Stanowisko pomiarowe

Do pomiarów wykorzystuje się następującą aparaturę:

1. Pomiar przemieszczeń: śruba mikrometryczna, czujnik indukcyjny transformatorowy różnicowy wraz z miernikiem, woltomierz, oscyloskop.
2. Pomiar prędkości: czujnik elektrodynamiczny sejsmiczny z miernikiem drgań, oscyloskop.
3. Pomiar przyspieszeń: czujnik piezoelektryczny sejsmiczny z miernikiem drgań, stolik do cechowania czujników, oscyloskop.

Ćwiczenie polega na pomiarze parametrów drgań różnych obiektów. Przed pomiarami należy przeprowadzić wzorcowanie czujników wraz z układem pomiarowym.

4. Przebieg ćwiczenia

Przeprowadzić pomiary drgań obiektu wskazanego przez prowadzącego ćwiczenie. W tym celu należy:

- a) dobrać odpowiedni czujnik,
- b) sporządzić tabelę pomiarów,
- c) przeprowadzić wzorcowanie czujnika,
- d) przeprowadzić pomiary parametrów drgań (amplitudy i częstotliwości),
- e) dla czujnika elektrodynamicznego uwzględnić poprawkę.

5. Literatura

1. Parszewski Z.: Dynamika i drgania maszyn, WNT, Warszawa 1992;
2. Hagel R., Zakrzewski J.: Miernictwo dynamiczne, WNT, Warszawa 1984;
3. Szumielewicz B., Słomski B., Styburski W.: Pomiary elektroniczne w technice, WNT, Warszawa 1982;
4. Cempel C.: Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn, WNT, Warszawa 1982;
5. Engel Z.: Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, PWN, Warszawa 1993;
6. Katalogi firmy Philips;
7. Katalogi firmy Brüel & Kjær;

6. Sprawozdanie z wykonania ćwiczenia winno zawierać:

1. Schemat układu pomiarowego.
2. Tabelę z wynikami pomiarów badanego obiektu.
3. Wnioski.