

**WAT – WYDZIAŁ ELEKTRONIKI
INSTYTUT SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH**

Przedmiot: CZUJNIKI I PRZETWORNIKI
Ćwiczenie nr 5
WSTĘP TEORETYCZNY

Temat: Przetworniki piezoelektryczne
/POMIARY DRGAŃ PRZY ZASTOSOWANIU PRZETWORNIKÓW
PIEZOELEKTRYCZNYCH/

Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest zapoznanie ze specyfiką wykonywania pomiarów drgań, wykorzystywanym do tego celu oprzyrządowaniem pomiarowym oraz procedurami sprawdzeń przetworników piezoelektrycznych.

1. WPROWADZENIE

Drgania (wibracje) są zjawiskiem dynamicznym obserwowanym w postaci oscylacji wykonywanych w stosunku do pewnego położenia równowagi. Powstają one w wyniku przekazywania lub gromadzenia energii pochodzącej od działania jednej lub wielu sił. Pomiaru drgań dokonuje się z wielu powodów. W ogólności wszystkie niekontrolowane wibracje są zjawiskiem niekorzystnym, z reguły powodującym wzrost szumów i naprężeń mechanicznych. Rejestrowany poziom drgań i ich charakter mogą ponadto stanowić symptom ewentualnego uszkodzenia obiektu. Analiza drgań ze względu na swoją prostotę oraz możliwość prowadzenia pomiaru bez przerywania pracy maszyn jest obok analizy hałasu i emisji akustycznej jedną z najpopularniejszych technik diagnostyki obiektów.

Podstawą przeprowadzenia pomiarów drgań jest zastosowanie odpowiedniego rodzaju i wymaganej klasy przetwornika. Podziału przetworników drgań najczęściej dokonuje się ze względu na rodzaj mierzonej wielkości (przetworniki przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia) oraz ze względu na fizyczną zasadę przetwarzania (przetworniki elektrodynamiczne, piezoelektryczne, piezorezystancyjne, indukcyjne, pojemnościowe, rezystancyjne, optyczne, itd.). Szczegółowy opis budowy, własności metrologicznych i zakresu zastosowań powyższych rodzajów przetworników można znaleźć w [1][2].

Celem niniejszego ćwiczenia jest zapoznanie z oprzyrządowaniem i zagadnieniami pomiaru drgań za pomocą piezoelektrycznych czujników przyspieszenia, popularnie zwanych akcelerometrami. Przetworniki te z uwagi na dużą czułość, bardzo szeroki zakres dynamiczny i częstotliwościowy oraz wysoką odporność na wpływ szeroko rozumianych czynników środowiskowych są współcześnie uważane za najlepsze w badaniach diagnostycznych realizowanych nie tylko na

potrzeby techniki, ale również medycyny, ergonomii, ochrony środowiska itp.

2. PARAMETRY DRGAŃ

Jedną z podstawowych zalet akcelerometrów jest fakt, iż uzyskiwany sygnał przyspieszenia może być na drodze elektronicznej poddany całkowaniu celem uzyskania wartości proporcjonalnych do prędkości lub przemieszczenia.

Ze względu na błędy wnoszone przez układy rzeczywistych integratorów wszędzie tam, gdzie nie ma istotnych przeciwwskazań jako mierzony parametr należy wykorzystać przyspieszenie. Często jest jednak pożądane zminimalizowanie wymagań na zakres dynamiczny sprzętu pomiarowego a przez to zwiększenie w pomiarze stosunku sygnał/szum. Osiąga się to przez wykorzystanie parametru zapewniającego możliwie płaską charakterystykę częstotliwościową. Rys. A.1. przedstawia porównanie charakterystyk częstotliwościowych przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia pewnej struktury drgającej, z którego wynika, że to prędkość a nie przyspieszenie charakteryzuje się największą „płaskością” w dziedzinie częstotliwości. Szacuje się [3], że w pomiarach drgań maszyn z elementami wirującymi w 70% przypadków wykorzystuje się prędkość a w 30% przyspieszenie. Przemieszczenie wykorzystuje się bardzo rzadko, głównie w pomiarach drgań niskoczęstotliwościowych o dużym poziomie (struktury takie jak okręty, budynki, mosty, itp.).

Dla drgania, którego przyspieszenie a ma charakter harmoniczny:

$$a = a_o \sin \omega t \quad (\text{A.1})$$

pierwsze całkowanie dostarcza parametru prędkość:

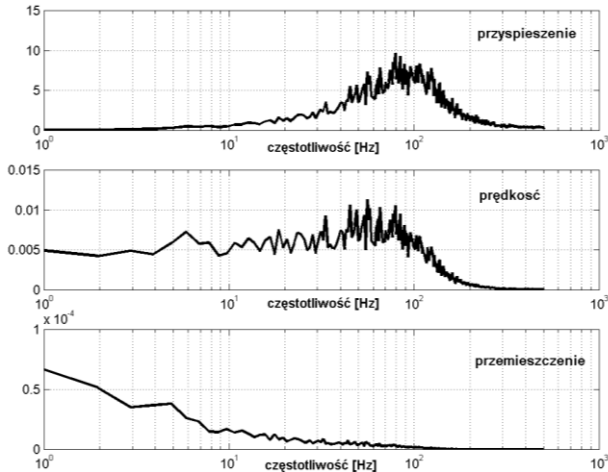
$$V = \int a dt = -\frac{a_o}{\omega} \cos \omega t = v_o \cos \omega t, \quad (\text{A.2})$$

gdzie: $v_o = -\frac{a_o}{\omega}$.

Drugie całkowanie pozwala uzyskać przemieszczenie:

$$x = \int V dt = -\frac{a_o}{\omega^2} \sin \omega t = x_o \sin \omega t, \quad (\text{A.3})$$

gdzie $x_o = -\frac{a_o}{\omega^2}$.



Rys A.1. Charakterystyki częstotliwościowe przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia pewnej struktury drgającej.

Dla drgania o pulsacji $\omega=1000$ rad/s (częstotliwość ok. 159.2Hz) wartości liczbowe amplitud a_o , v_o , x_o różnią się więc tylko położeniem przecinka. Dzięki temu częstotliwość 159.2Hz jest specjalnie uprzywilejowana w pomiarach kalibracyjnych – pozwala łatwo wyznaczyć wartości np. prędkości i przemieszczenia na podstawie tylko pomiaru przyspieszenia.

Wybrany parametr drgań jako wielkość zależną od czasu charakteryzuje się w sposób klasyczny tzn. przez podanie jednej z wartości charakterystycznych – wartości skutecznej, szczytowej albo międzyszczytowej lub średniej.

3. CHARAKTERYSTYKA AKCELEROMETRÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH

3.1. Opis efektu piezoelektrycznego

Niektóre związki krystaliczne, dzięki specjalnej konstrukcji molekularnej mają właściwości piezoelektryczne (lub elektrostrykcyjne) polegające na tym, że przy deformacji kryształu pojawiają się na jego odpowiednich ściankach ładunki elektryczne. Istnieje również zjawisko odwrotne – doprowadzenie pola elektrycznego do odpowiednich ścianek kryształu powoduje zmianę jego wymiarów. Przyczyną pojawienia się ładunków na ściankach kryształu są wzajemne zmiany położenia dodatnich i ujemnych jonów kryształu.

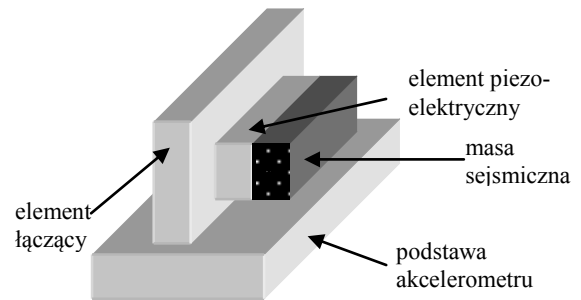
W zależności od struktury kryształu deformacje generujące efekt piezoelektryczny mogą być powodowane zarówno jego ściskaniem i rozciąganiem jak i ścinaniem.

Zjawisko piezoelektryczne występuje najsilniej w dielektrykach o dużej przenikalności elektrycznej, tzn. ferroelektrykach jak np. sól Seignette'a, tytanian baru czy fosforan

potasu. Dużą wytrzymałością mechaniczną i małą wrażliwością zjawiska piezoelektrycznego na zmiany temperatury charakteryzuje się kwarc (SiO_2). Praktyczne zastosowanie jako piezoelektryki w akcelerometrach mają jednakże ceramiki ferroelektryczne. Mogą być one wytwarzane w dowolnym kształcie (w przeciwieństwie np. do kryształów kwarcu) i w dowolnym, zapewniającym najlepsze właściwości w danej aplikacji składzie. Szersze informacje dotyczące właściwości różnych materiałów piezoelektrycznych jak i samego zjawiska można znaleźć w literaturze [4][5].

3.2. Model mechaniczny przetwornika piezoelektrycznego

Schemat najprostszej konstrukcji akcelerometru przedstawia rys. A.2.



Rys. A.2. Uproszczony schemat akcelerometru piezoelektrycznego.

Element piezoelektryczny w układzie z rys. A.2 zachowuje się jak „sprężyna” łącząca podstawę akcelerometru z elementem inercyjnym, tzw. masą sejsmiczną. Gdy akcelerometr poddany jest wibracjom, na element piezoelektryczny oddziałuje siła równa iloczynowi przyspieszenia elementu sejsmicznego i jego masy. Element piezoelektryczny generuje ładunek proporcjonalny do przyłożonej siły. Ponieważ jednak masa sejsmiczna jest stała, powstający ładunek jest zarazem proporcjonalny do jej przyspieszenia. Przyspieszenie masy sejsmicznej jest co do amplitudy i fazy równe przyspieszeniu podstawy akcelerometru a przez to równe również przyspieszeniu powierzchni, na której jest ona zamocowana. Ekwiwalentny model mechaniczny (inercyjny) powyższej struktury przedstawiony jest na rys. A.3.

W modelu tym występują następujące siły:

– siła sprężyny:

$$F = k(x_s - x_b - L) \quad (\text{A.4})$$

– siła oddziałująca na sprężynę:

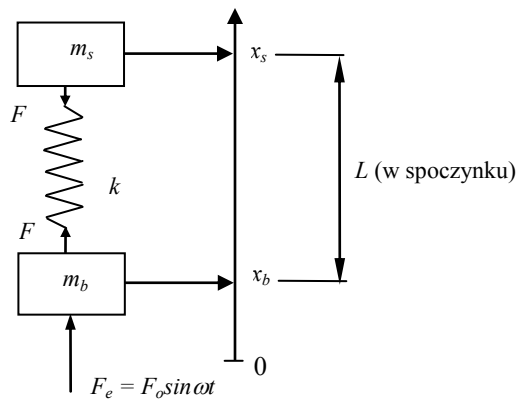
$$F + F_e = m_b \ddot{x}_b, \quad (\text{A.5})$$

– siła oddziałująca na masę sejsmiczną:

$$m_s \ddot{x}_s = -F \quad (\text{A.6})$$

Równanie ruchu wynikające w sposób oczywisty z powyższych równań przedstawia się następująco:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_s - \ddot{x}_b &= -\frac{F}{m_s} - \frac{F + F_e}{m_b} = \\ &= -\frac{k}{\mu} (x_s - x_b - L) - \frac{F_e}{m_b} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$



Rys A.3 Model mechaniczny akcelometru.

Oznaczenia:

- x_s – przesunięcie masy sejsmicznej,
- x_b – przesunięcie podstawy,
- m_s – masa sejsmiczna,
- m_b – masa podstawy,
- L – odległość w spoczynku między masami ekwiwalentnego modelu inercyjnego,
- k – ekwiwalentna sztywność elementu piezoelektrycznego,
- F_e – wymuszenie harmoniczne,
- ω_n – częstotliwość rezonansu własnego akcelometru,
- ω_m – częstotliwość rezonansu mocowania.

$$\text{lub: } \mu \ddot{r} = -kr - \frac{\mu}{m_b} F_0 \sin \omega t,$$

$$\text{gdzie: } \frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b} \text{ lub } \mu = \frac{m_s m_b}{m_s + m_b}, \quad r = x_s - x_b - L.$$

μ jest często określane pojęciem „masy zredukowanej” a r jest przemieszczeniem masy sejsmicznej względem położenia spoczynkowego.

Przypadek drgań swobodnych

W wypadku braku oddziaływania zewnętrznego pobudzenia, tzn. $F_e = 0$, równanie ruchu redukuje się do postaci:

$$\mu \ddot{r} = -kr. \quad (\text{A.8})$$

Powyższe równanie różniczkowe można łatwo rozwiązać zakładając harmoniczny charakter przemieszczenia w ruchu swobodnym $r = R \sin \omega_n t$. Wówczas:

$$-\mu R \omega_n^2 \sin \omega_n t = -kR \sin \omega_n t. \quad (\text{A.9})$$

Stąd pulsacja drgań własnych akcelometru wynosi:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{\mu}. \quad (\text{A.10})$$

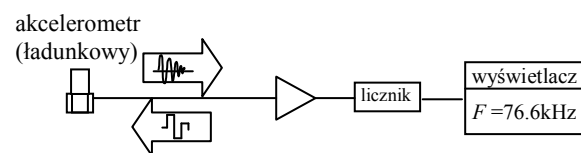
W postaci jawnej:

$$\omega_n^2 = k \left(\frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b} \right). \quad (\text{A.11})$$

W przypadku doskonale sztywnego połączenia akcelometru z drgającą strukturą wartość m_b wzrasta i pulsacja rezonansowa maleje. W przypadku idealnym, tzn. gdy $m_b \rightarrow \infty$ otrzymuje się:

$$\omega_n^2 = \omega_m^2 = \frac{k}{m_s}. \quad (\text{A.12})$$

ω_m jest pulsacją tzw. rezonansu zamocowania czyli pulsacją rezonansu powstającego w układzie masa sejsmiczna–sprężyna. Jest to parametr często podawany w danych katalogowych akcelometrów (ang. *mounted resonance frequency*) jako parametr determinujący teoretyczny zakres częstotliwości pracy akcelometru. W praktyce nie jest jednak możliwe zamocowanie akcelometru na strukturze o nieskończenie dużej masie i w sposób doskonale sztywny. Dlatego też rzeczywista częstotliwość rezonansowa akcelometru różni się od podawanej w katalogu częstotliwości zamocowania¹. Innymi słowy postaci charakterystyk częstotliwościowych akcelometrów zależą od własności struktur, na których są mocowane (masy, sprężystości, twardości itp.) oraz od techniki zamocowania. Celem pełnego wykorzystania oferowanego przez producenta pasma przenoszenia akcelometru, dane katalogowe (p. np. 4375) często podają zalecenia co do wstępnego przygotowania powierzchni styku drgająca struktura–akcelometr oraz zalecenia co do sposobu zamocowania. Firma Brüel&Kjær oferuje ponadto możliwość przeprowadzenia praktycznego testu rzeczywistego rezonansu zamocowania przez wykorzystanie odpowiedniej opcji wzmacniacza pomiarowego. Opcja ta polega na wysłaniu do akcelometru przewodem sygnałowym krótkiego impulsu napięciowego, który po konwersji przez materiał piezoelektryczny w impuls mechaniczny wprawia w drganie masę sejsmiczną. Wzmacniacz przełącza się wówczas samoczynnie w tryb pomiarowy dokonując pomiaru czasu T trwania N okresów odpowiedzi akcelometru. Zmierzona częstotliwość jest wtedy efektem prostego ilorazu $f_{mierz} = N/T$ i pojawia się na wyświetlaczu wzmacniacza – rys. A.4.



Rys. A.4. Schemat testu rezonansu zamocowania.

Powyższa technika umożliwia nie tylko sprawdzenie czy akcelometr jest zamocowany czy też nie lub czy jest w ogóle dołączony do przewodu. Pozwala również stwierdzić jakość istniejącego połączenia mechanicznego (zbyt miękkie, zbyt krótka śruba mocująca, zbyt duża śruba mocująca, zbyt duża masa akcelometru w stosunku do masy struktury itp.) Testu rezonansu zamocowania nie wykonuje się na akcelometrach z wyjściem napięciowym z uwagi na możliwość uszkodzenia wbudowanego w czujnik przedwzmacniacza, który nie jest układem bilateralnym (!).

¹ wartość katalogowa jest notabene uzyskiwana na drodze empirycznej w warunkach unormowanego zamocowania na głowicy stalowej o masie 180 g [3]

Przypadek drgań wymuszonych

W warunkach wymuszenia równanie ruchu (A.7) przyjmuje postać:

$$\ddot{r} + \omega_n^2 r + \frac{F_o}{m_b} \sin \omega t = 0. \quad (\text{A.13})$$

Postulując jego rozwiązanie w postaci funkcji harmoniczej o amplitudzie R i pulsacji ω otrzymuje się:

$$-\omega^2 R \sin \omega t + \omega_n^2 R \sin \omega t + \frac{F_o}{m_b} \sin \omega t = 0. \quad (\text{A.14})$$

Stąd wynika, że:

$$R(\omega_n^2 - \omega^2) + \frac{F_o}{m_b} = 0, \quad (\text{A.15})$$

$$R = -\frac{F_o}{m_b(\omega_n^2 - \omega^2)}. \quad (\text{A.16})$$

Przy pulsacjach znacznie mniejszych od pulsacji rezonansu własnego, czyli $\omega \ll \omega_n$, amplituda przemieszczenia $R = R_o$ wynosi:

$$R_o = -\frac{F_o}{m_b \omega_n^2}. \quad (\text{A.17})$$

Oznaczając przez A stosunek amplitudy przemieszczenia dla dowolnych pulsacji do amplitudy R_o otrzymuje się:

$$\frac{R}{R_o} = A = \frac{-\frac{F_o}{m_b(\omega_n^2 - \omega^2)}}{-\frac{F_o}{m_b \omega_n^2}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}. \quad (\text{A.18})$$

Powyższy wynik wskazuje, że gdy pulsacja wymuszenia zbliża się do pulsacji rezonansu własnego, amplituda przemieszczenia pomiędzy podstawą akcelerometru a jego masą sejsmiczną rośnie. W efekcie rośnie również wartość ładunku generowanego na wyjściu przetwornika.

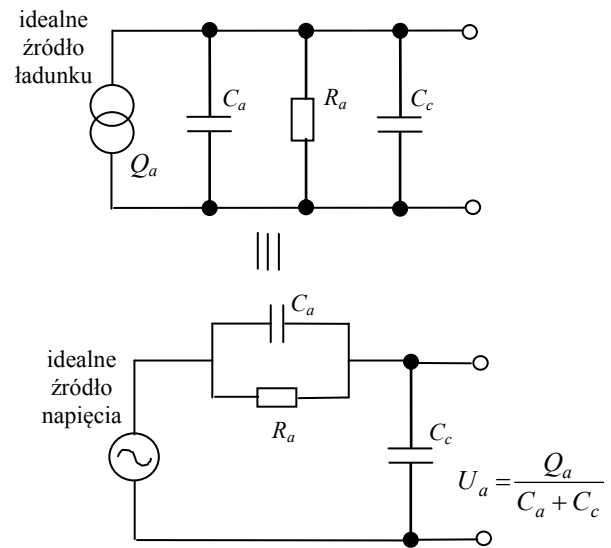
Przy spełnieniu warunków równania (A.12) zależność (A.18) przyjmuje postać:

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2}, \quad (\text{A.19})$$

z której zależności wynika, że zakres częstotliwości pracy akcelerometru jest tym szerszy im większa jest częstotliwość rezonansu zamocowania. Wymaga to jednakże (zgodnie z (A.12)) zastosowania albo sztywniejszego materiału piezoelektrycznego albo mniejszej masy sejsmicznej. Wobec raczej ustalonej sztywności piezoelektryków, jedynym sposobem poszerzenia zakresu pracy pozostaje redukcja masy sejsmicznej. Zmniejszeniu ulega jednak przy tym siła oddziaływania na materiał piezoelektryczny, a więc pogarsza się czułość. W efekcie spotykane na rynku akcelerometry przeznaczone do pomiaru drgań o dużych częstotliwościach są mniej czułe od akcelerometrów konstruowanych do pomiaru drgań o małych częstotliwościach.

3.3. Model elektryczny przetwornika akcelerometrycznego

Efekt piezoelektryczny sprawia, że akcelerometr poddany działaniu siły może być traktowany jako źródło ładunku. Ścianki elementu piezoelektrycznego, na których gromadzi się ładunek zachowują się jak kondensator o pojemności C_a i o bardzo wysokiej rezystancji wewnętrznej R_a . Ponieważ istnienie ładunku nierozdzielnie wiąże się z istnieniem różnicy potencjałów na okładzinach kondensatora, akcelerometr może być zamodelowany albo idealnym źródłem ładunku – połączonym równolegle z pojemnością C_a albo idealnym źródłem napięcia połączonym szeregowo z pojemnością C_a . Oba ekwiwalentne obwody zastępcze z uwzględnieniem obciążenia przetwornika przewodem sygnałowym o pojemności C_c przedstawia rysunek A.5.



Rys. A.5. Ekwiwalentne obwody zastępcze przetwornika piezoelektrycznego.

W praktyce wybór rodzaju modelu jest zależny od rodzaju wzmacniacza współpracującego z akcelerometrem. Zastosowanie tzw. wzmacniacza ładunku wymusza posługiwanie się modelem ładunkowym i związaną z nim czułością ładunkową akcelerometru wyrażoną wartością ładunku (z reguły w pC) przypadającą na jednostkę przyspieszenia:

$$S_{qa} = \frac{Q_a}{\text{jednostka przyspieszenia}} \left[\frac{\text{pC}}{\text{ms}^{-2}} \right] \left[\frac{\text{pC}}{\text{g}} \right]. \quad (\text{A.20})$$

Podobnie czułość napięciową wyraża się przez stosunek:

$$S_{va} = \frac{U_a}{\text{jednostka przyspieszenia}} \left[\frac{\text{mV}}{\text{ms}^{-2}} \right] \left[\frac{\text{mV}}{\text{g}} \right]. \quad (\text{A.21})$$

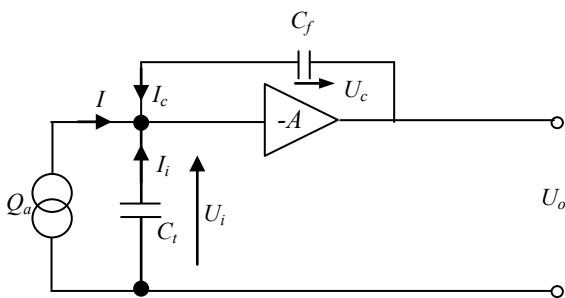
Przedstawione powyżej schematy obwodów zastępczych wskazują, że napięcie U_a otrzymywane na wyjściu akcelerometru obciążonego przewodem sygnałowym jest odwrotnie proporcjonalne do sumy pojemności własnej akcelerometru i pojemności przewodu. A zatem, jakkolwiek zmiana tej ostatniej, spowodowana np. innym rodzajem kabla lub zmianą jego długości, prowadzi do zmiany czułości napięciowej. Jest to zasadnicza wada stosowania wzmacniaczy napięciowych współpracujących z akcelerometrami, wymagająca dodatkowej kalibracji przy każdorazowej zmianie warunków odbierania sygnałów. Wady tej nie posiadają wzmacniacze

ładunkowe – reagują one na wartość generowanego ładunku elektrycznego, który jest niezależny od pojemności obciążenia.

4. CHARAKTERYSTYKA PRZEDWZMACNIACZY

4.1. Wzmacniacz ładunkowy

Wzmacniacz ładunkowy jest wzmacniaczem, którego napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do wejściowego ładunku elektrycznego. Jego budowa opiera się na wykorzystaniu wzmacniacza operacyjnego objętego pojemnościową pętlą sprzężenia zwrotnego pracującego jako integrator prądu powstałego z rozładowania ładunku zgromadzonego na kontaktach elementu piezoelektrycznego. Uproszczony schemat układu wzmacniacza z dołączonym akcelerometrem przedstawia rys. A.6.



Rys. A.6. Schemat uproszczony wzmacniacza ładunkowego z dołączonym akcelerometrem.

W układzie tym przyjęto jako duże i pominięto rezystancje: wewnętrzną akcelerometru, przedwzmacniacza i obwodu sprzężenia zwrotnego. Znaczenie wyróżnionych na rys. A.6 wielkości jest następujące:

Q_a – ładunek wygenerowany przez ładunek elektryczny,
 $C_t = C_a + C_c + C_p$ – pojemność całkowita będąca sumą pojemności akcelerometru C_a , pojemności przewodu łączącego akcelerometr ze wzmacniaczem C_c i pojemności wejściowej wzmacniacza C_p ,

I – prąd wyjściowy z akcelerometru,

I_i – prąd płynący przez C_t ,

I_c – prąd płynący przez pojemność sprzężenia zwrotnego C_f

U_c – napięcie na pojemności sprzężenia zwrotnego.

Napięcie wejściowe i wyjściowe, U_i i U_o powiązane są zależnością:

$$U_o = -A \cdot U_i, \quad (\text{A.22})$$

gdzie A jest wzmocnieniem. Równania na sumy napięć i prądów zgodnie z prawami Kirchoffa są następujące:

$$U_c = U_o - U_i = U_o - \frac{U_o}{-A} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) U_o, \quad (\text{A.23})$$

$$I + I_i + I_c = 0. \quad (\text{A.24})$$

Wykorzystując zapis wartości prądów w kategoriach parametrów obwodu:

$$I = \frac{dQ_a}{dt}, \quad (\text{A.25})$$

$$I_c = C_f \frac{dU_c}{dt} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f \frac{dU_o}{dt}, \quad (\text{A.26})$$

$$I_i = -C_t \frac{dU_i}{dt} = \frac{1}{A} C_t \frac{dU_o}{dt} \quad (\text{A.27})$$

otrzymuje się:

$$\frac{dQ_a}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f \frac{dU_o}{dt} - \frac{1}{A} C_t \frac{dU_o}{dt}. \quad (\text{A.28})$$

Rozwiązując powyższe równanie przez obustronne całkowanie uzyskuje się wyrażenie na wartość napięcia wyjściowego ze wzmacniacza:

$$U_o = \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f + \frac{1}{A} C_t}, \quad (\text{A.29})$$

które przy założeniu A rzędu 10^5 może być uproszczone do postaci:

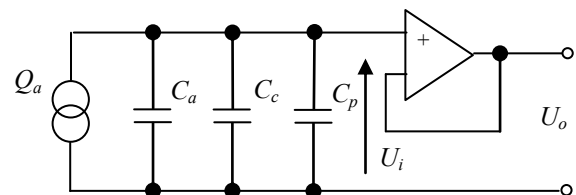
$$U_o = -\frac{Q_a}{C_f}. \quad (\text{A.30})$$

A zatem napięcie wyjściowe wzmacniacza z rys. A.6 jest proporcjonalne wyłącznie do ładunku powstałego na wyjściu akcelerometru (i nie zależy zarówno od pojemności wejściowej jak i pojemności przewodów). Tym samym jest też proporcjonalne do przyspieszenia. Sterowanie wypadkową czułości układu akcelerometr – wzmacniacz odbywa się przez zmianę pojemności C_f .

4.2. Wzmacniacz napięciowy

Konstrukcja wzmacniacza współpracującego z akcelerometrem jest znacznie prostsza a przez to tańsza od konstrukcji wzmacniacza ładunkowego. Podstawowym wymaganiem jest uzyskanie dużej impedancji wejściowej. Klasyczne rozwiązanie stanowi zastosowanie wtórnika napięciowego o wzmocnieniu równym 1, którego uproszczony schemat wraz z dołączonym akcelerometrem jest przedstawiony na rys. A.7.

W układzie powyższym również jako duże pominięto war-



Rys. A.7. Uproszczony schemat wzmacniacza napięciowego z dołączonym akcelerometrem (C_a – pojemność akcelerometru, C_c – pojemność przewodu, C_p – pojemność wejściowa wzmacniacza).

tość rezystancji wewnętrznej akcelerometru oraz rezystancji wejściowej wtórnika. Napięcie wejściowe wzmacniacza, U_i a zarazem napięcie wyjściowe U_o jest równe:

$$U_i = \frac{Q_a}{C_a + C_c + C_p} = U_o. \quad (\text{A.31})$$

Uwzględniając napięcie na wyjściu akcelerometru nie obciążonego przewodem:

$$U_a = \frac{Q_a}{C_a}, \quad (\text{A.32})$$

otrzymuje się:

$$U_o = U_i = \frac{U_a \cdot C_a}{C_a + C_c + C_p}. \quad (\text{A.33})$$

Wypadkową czułość napięciową układu akcelerometr – wzmacniacz napięcia otrzymuje się dzieląc U_o przez odpowiadające mu przyspieszenie a [ms^{-2}], czyli:

$$\begin{aligned} S_v &= \frac{U_o}{a} = \frac{U_a \cdot C_a}{(C_a + C_c + C_p) \cdot a} = \\ &= \frac{U_a}{a} \frac{C_a}{(C_a + C_c + C_p)} = S_{va} \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p} \end{aligned} \quad (\text{A.34})$$

Wielkość

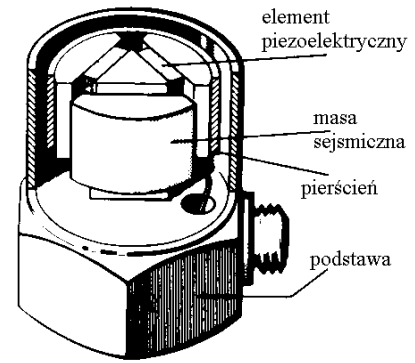
$$S_{va} = \frac{U_a}{a} \left[\frac{V}{\text{ms}^{-2}} \right]$$

jest czułością napięciową akcelerometru nie obciążonego. A zatem wobec ustalonej wartości C_a (i w zasadzie C_p – przy korzystaniu cały czas z tego samego wzmacniacza), czułość wypadkowa zależy od pojemności przewodu sygnałowego. Jest to oczywiście zjawisko wysoce niepożądane ponieważ dany akcelerometr może być używany wyłącznie z tym przewodem, z którym był fabrycznie kalibrowany. Zmiana przewodu wymaga powtórnej recalibracji.

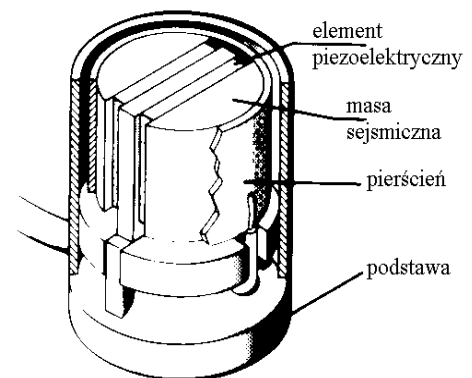
5. OBJAŚNIENIA NAZW HANDLOWYCH STOSOWANYCH W SPRZĘCIE DO POMIARU DRGAŃ

Konstrukcje mechaniczne oraz elektroniczne wykorzystywane w oprzyrządowaniu do pomiaru drgań są z reguły chronione prawem patentowym. Konstrukcje te stanowią już pewnego rodzaju kanon i w wielu katalogach ich szczególne własności sygnalizowane są zarezerwowanymi dla nich nazwami handlowymi, których wyjaśnienia znajdują się poniżej.

1. **DeltaShear® Design** jest konstrukcją akcelerometrów, w których stosuje się trzy masy sejsmiczne i trzy elementy piezoelektryczne tworzące wokół bazy strukturę trójkąta (deltę) – rys. A.8. Deformacją generującą efekt piezoelektryczny jest ściskanie (ang. *shear*). Niezawodność mechaniczną konstrukcji zapewnia pierścień opasujący masy sejsmiczne, który pełni jednocześnie rolę polaryzatora (wstępny nacisk zapewniający wysoki stopień liniowości charakterystyki przetwarzania) i odbiorcy ładunku. Konstrukcja ta zapewnia bardzo duży stosunek czułości do masy w porównaniu z innymi oraz dużą częstotliwość rezonansu własnego. Zapewnia również wysoką odporność na zmiany temperatury.
2. **PlanarShear Design** jest konstrukcją podobną do DeltaShear®, ale prostszą a przez to i tańszą. Składają się na nią dwie masy sejsmiczne oraz dwa elementy



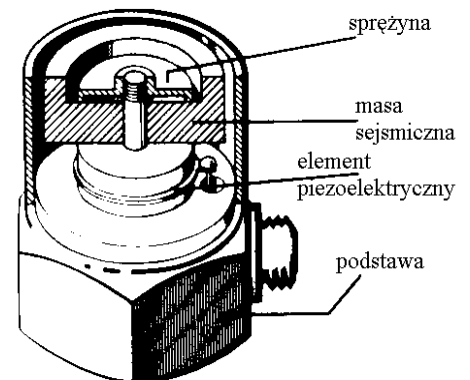
Rys. A.8. Przekrój przez konstrukcję DeltaShear®.



Rys. A.9. Przekrój przez konstrukcję PlanarShear.

piezoelektryczne opasane pierścieniem wokół bazy – rys. A.9.

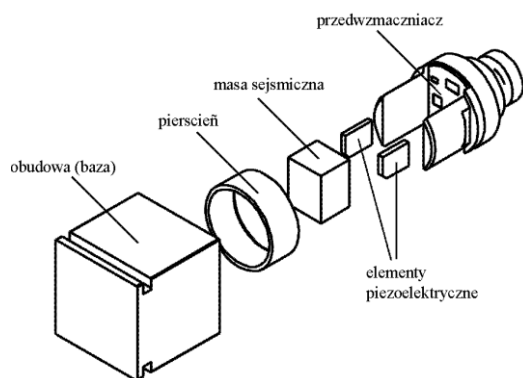
3. **ThetaShear® Design** – jest konstrukcją podobną do PlanarShear z tym, że zamiast dwóch mas sejsmicznych umieszczonych na zewnątrz dwóch elementów piezoelektrycznych zawiera jedną masę wewnętrzną pobudzającą dwie zewnętrzne płytki piezoelektryczne. Całość opasana jest pierścieniem pełniącym jak w poprzednich konstrukcjach rolę polaryzatora i odbiorcy ładunku – rys. A.11.
4. **Centre Mounted Compression Design** – jest tradycyjną konstrukcją, w której element piezoelektryczny reagują-



Rys. A.10. Przekrój przez konstrukcję Centre Mounted Compression.

cy na ściskanie dociskany jest do bazy przez masę sejsmiczną za pomocą sprężyny – rys. A.10. Zaletą tej konstrukcji jest płaska w porównaniu z innymi charakterystyka częstotliwościowa. Wadą – bezpośredni kontakt elementu piezoelektrycznego z bazą, co przy jej ewentualnych ugięciach mechanicznych i dylatacji temperaturowej sprawia, że sygnał wyjściowy jest obarczony błędem. Z powyższych względów rozwiązanie to stosuje się do pomiarów drgań o wysokim poziomie (udarów), gdzie sygnał błędu jest pomijalnie mały w porównaniu do sygnałów użytecznych oraz w konstrukcji akcelerometrów przeznaczonych do kalibracji innych przetworników drgań. Akcelerometry takie pracują bowiem z reguły w unormowanych warunkach mechanicznych i temperaturowych (p. Standardowy Akcelerometr Odniesienia B&K 8305).

5. **DeltaTron®** – jest określeniem używanym w odniesieniu zarówno do przetworników jak i wzmacniaczy. Akcelerometr typu DeltaTron® jest przetwornikiem inteligentnym² (ang. *smart transducer*), wyposażonym we wbudowany przedwzmacniacz, którego napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do przyspieszenia. Jest to tzw. akcelerometr z wyjściem napięciowym. Zasilanie zintegrowanego z czujnikiem przedwzmacniacza odbywa się za pomocą przewodu sygnałowego. Sygnał wyjściowy z przetwornika powstaje przez modulację napięcia zasilającego. Przykładową konstrukcję akcelerometru DeltaTron® i jednocześnie ThetaShear® przedstawia rys. A.11.



Rys. A.11. Przekrój przez konstrukcję DeltaTron®, ThetaShear®.

Wzmacniacz typu Delta Tron® jest wzmacniaczem napięciowym, którego wejście wyposażone jest w generator prądu zasilającego przetwornik (4mA lub 10mA). Wzmacniacz taki może współpracować wyłącznie z przetwornikiem typu DeltaTron®.

6. **UniGain®** – jest określeniem akcelerometrów, których czułość z błędem mniejszym od gwarantowanych 2% równa jest liczbowo jednej z wygodnych wartości 1; 3.16; 10 lub 31.6. Akcelerometr typu UniGain® może być więc bez konieczności dodatkowej kalibracji zastąpiony akcelerometrem tego samego typu. Jednocześnie z uwagi na to, że powyższe wartości są w stosunku do siebie oddalone o 10dB, zmiana nawet typu akcelerometru w układzie wymaga zmiany jedynie wzmocnienia

wzmacniacza o wielokrotność 10dB. Własność UniGain® uzyskuje się na etapie produkcji przez precyzyjny dobór wartości masy sejsmicznej.

6. LITERATURA

- [1] J. Morel, „Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego”, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa, 1992.
- [2] J. Missala, T. Missala, „Elektryczne pomiary wielkości mechanicznych”, PWN, Warszawa, 1971.
- [3] M. Serridge, T. R. Licht, „Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook”, Brüel&Kjaer, Neaum-Dania, 1987.
- [4] Chwaleba, J. Czajewski, „Przetworniki pomiarowe wielkości fizycznych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1993.
- [5] M. Łapiński, W. Włodarski, „Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych”, WNT, Warszawa, 1970.
- [6] „Dziennik Urzędowy Miar i Pobierania Nr 14”, Warszawa, 1995.

² wg. protokołu IEEE – P1451.4.