

# POMIARY DRGAŃ

Istnieje wiele niekorzystnych efektów istnienia zjawiska drgań mechanicznych. Jednym z nich jest uciążliwy hałas generowany przez drgające maszyny. Innymi problemami wynikającymi z istnienia drgań mechanicznych są szybsze zużycie części maszyn w wyniku zmęczenia materiału i uszkodzeń spowodowanych poluzowaniem mocowań.

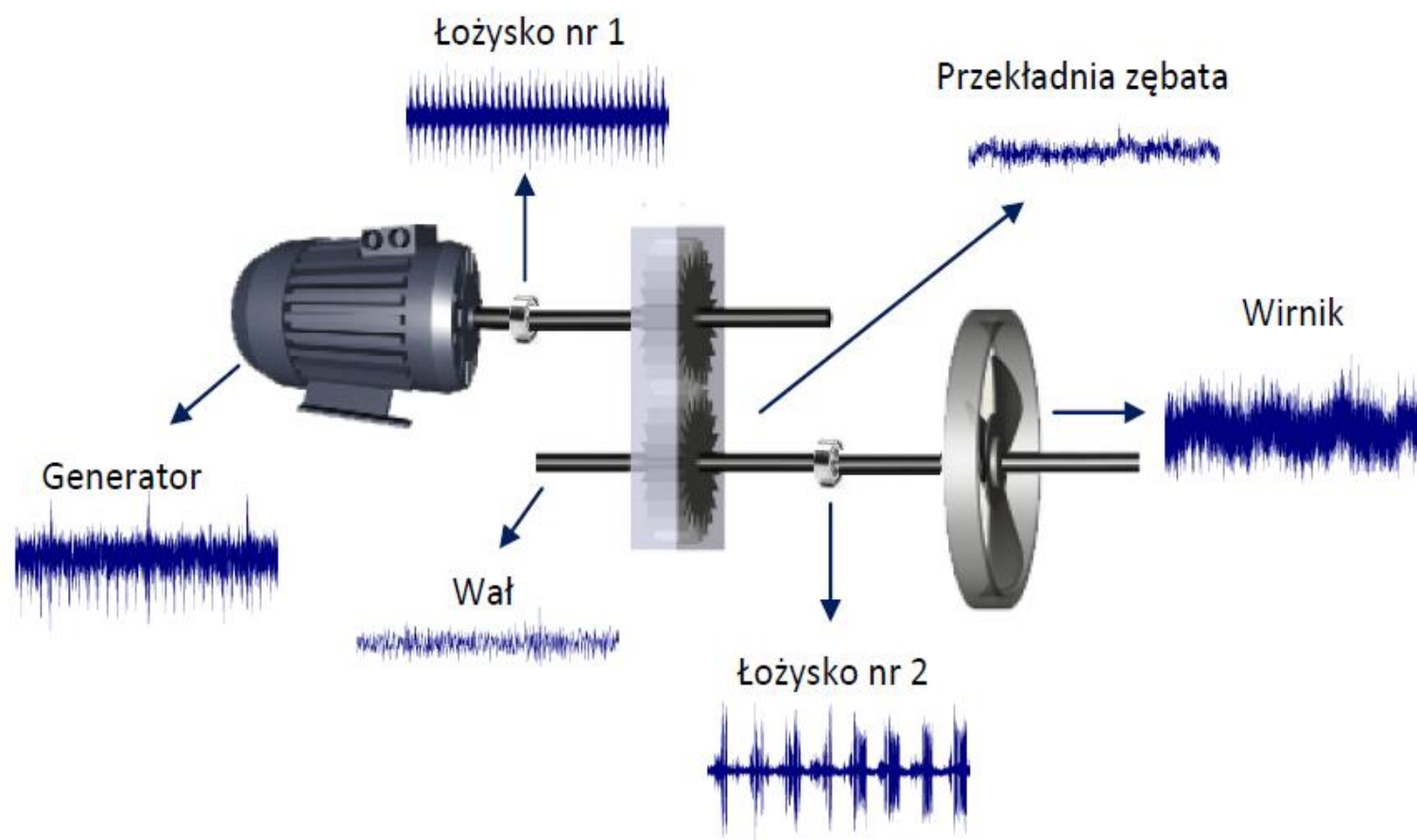
Ponadto drgania z pobliskich źródeł (przejeżdżające pojazdy, drgające maszyny, itd.) mogą znacząco osłabić konstrukcje budynków, a rezonans konstrukcji (np. mostu lub drapacza chmur spowodowany silnym wiatrem lub wstrząsami ziemi) może doprowadzić do katastrofy.

Procesy wibroakustyczne zawsze towarzyszą pracy maszyn. Objawiają się one w postaci drgań i hałasu obserwowanych obiektów i uznawane są za procesy resztkowe powstające podczas wykonywania przez maszynę jej właściwego zadania.

Z końcem lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia zauważono, iż zmiana charakteru procesów wibroakustycznych może być związana ze zmianą stanu technicznego maszyny.

Zaczęto, więc rejestrować sygnały wibroakustyczne, ze szczególnym uwzględnieniem sygnałów drganiowych, generowanych przez pracujące obiekty techniczne.

Każdy element pracującej maszyny generuje właściwy dla siebie sygnał drganiowy. Inne, więc będą drgania generowane przez pracujący silnik elektryczny, inne przez przekładnię zębatą a jeszcze inne przez niewyważony wał.



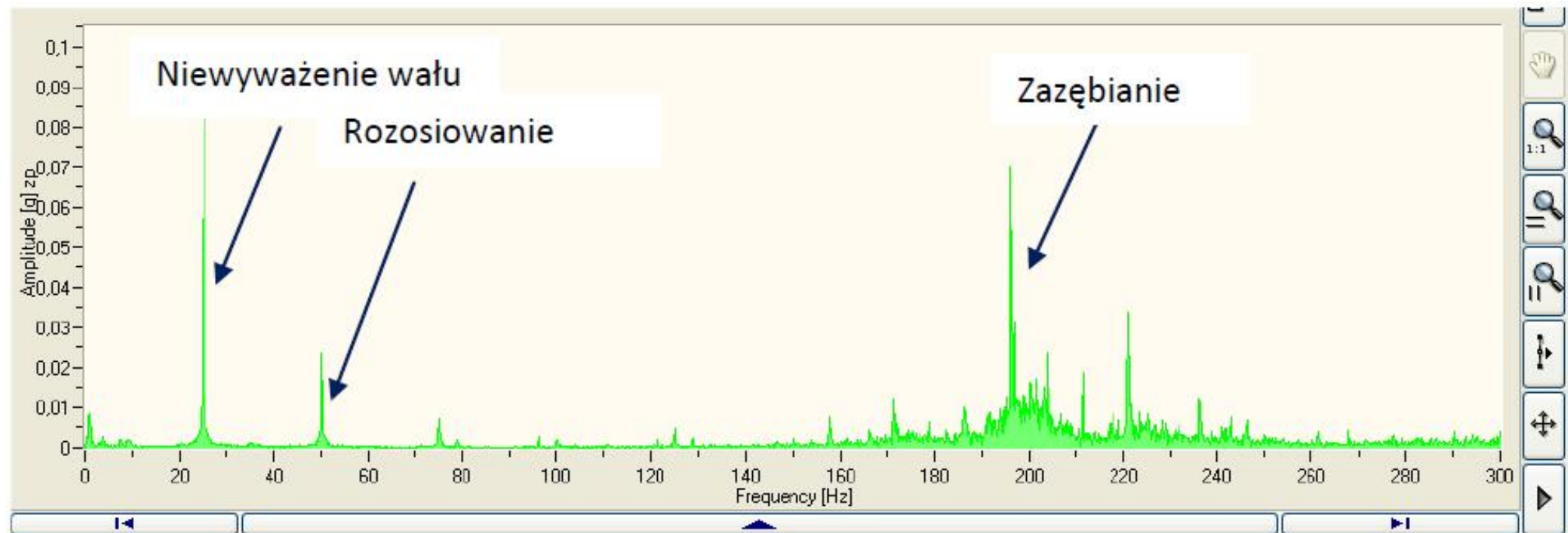
Drgania generowane przez poszczególne komponenty układu kinematycznego.

Zarejestrowany przez specjalistyczne oprzyrządowanie sygnał drganiowy zawiera jednocześnie informacje o pracy wszystkich elementów będących w zasięgu użytego do pomiaru sensora. Charakter takiego sygnału zależy od m.in. od kinematyki, prędkości obrotowej czy mocy.

We wczesnych etapach diagnostyki drganiowej zakładano, że sygnał zmierzony na obudowie łożyska zawierać będzie głównie komponenty charakterystyczne dla pracy wału, na którym łożysko jest osadzone. Podobnie, umieszczenie czujnika drgań na obudowie przekładni równoległej da nam w skutek pomiaru informacje związane głównie z procesem zazębienia.

Wskaźnikiem stopnia zużycia poszczególnych elementów w takim podejściu są proste analizy na sygnale drganiowym związane z mierzeniem energii sygnału czy amplitudy międzyszczytowej.

W dalszym jednak ciągu nie było możliwe skutecznie diagnozowanie maszyn o bardziej złożonej kinematyce. Wzrosty ogólnych poziomów wibracji, jak to zakładano pierwotnie, pozwalały co prawda na detekcję rozwoju uszkodzenia jednego z elementów maszyny, nie pozwalały jednak na jego jednoznaczną identyfikację. Z pomocą przyszedł rozwój technik cyfrowego przetwarzania sygnałów, który pozwolił na implementację do systemów monitoringu analizy częstotliwościowej. Dzięki niej możliwe jest przedstawienie sygnału drganiowego w postaci widma zawierającego informacje o energii poszczególnych elementów.

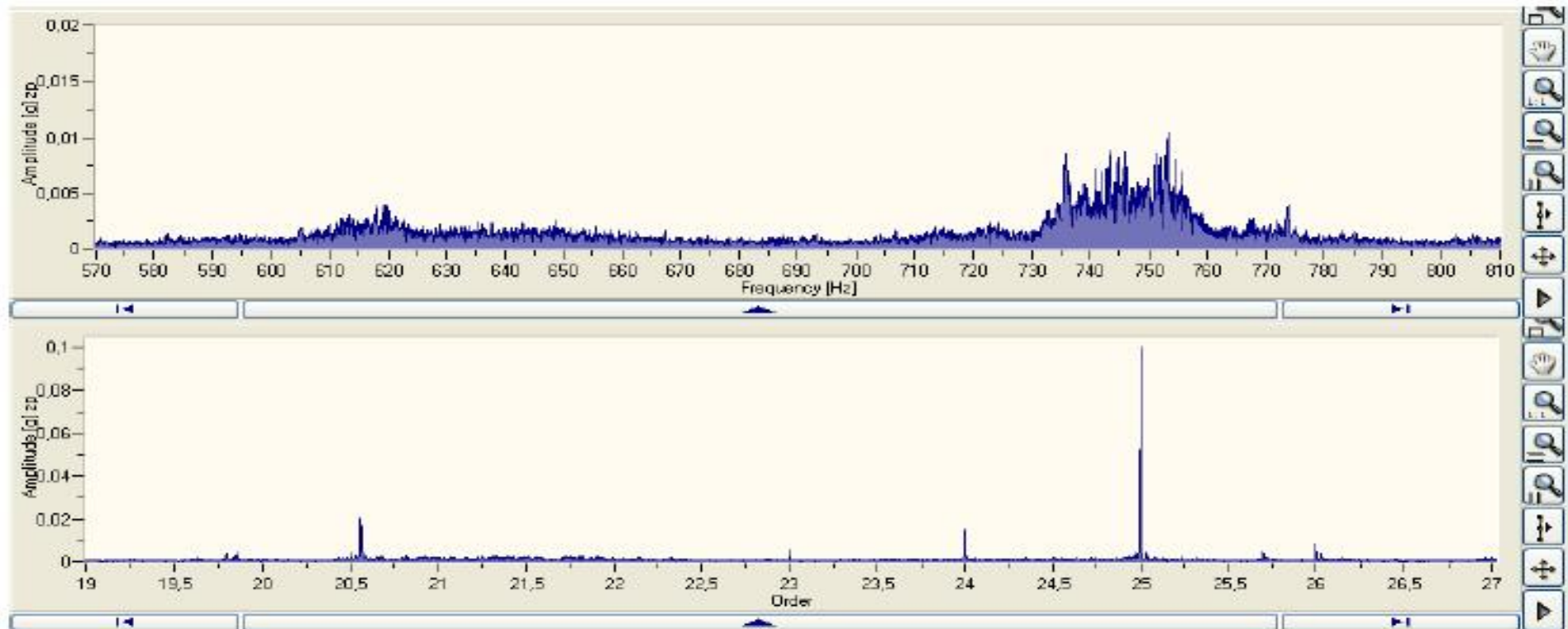


Widmo drgań

Szeroką grupę maszyn z różnych gałęzi przemysłu stanowią maszyny pracujące w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Doskonałym przykładem takich obiektów są turbiny wiatrowe, dla których parametry takie jak prędkość obrotowa i generowana moc mogą w przeciągu kilku minut zmieniać się nawet o kilkadziesiąt procent.

Dla takich maszyn niemożliwe jest zastosowanie analizy częstotliwościowej, ponieważ linie widmowe stają się rozmyte i ich jednoznaczna identyfikacja staje się niemożliwa.

Rozwiązaniem tego problemu stało się wprowadzenie do technik diagnostyki wibroakustycznej analizy rzędów. Jednym z jej fundamentalnych założeń jest ciągły pomiar prędkości obrotowej zsynchronizowany z rejestracją sygnału drganiowego. Dzięki tej metodzie możliwe jest całkowite uniezależnienie się od zmiennych warunków eksploatacyjnych.



Widmo sygnału drganiowego maszyny o zmiennej prędkości obrotowej przed zastosowaniem analizy rzędów (góra) i po jej zastosowaniu (dół).



Równanie ruchu układu drgającego o masie  $m$ , tłumieniu  $b$  i sprężystości  $c$ , za jaki można traktować badaną listwę z czujnikiem, ma następującą postać:

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + c \cdot x = 0 \quad (1)$$

Wprowadzając oznaczenia:

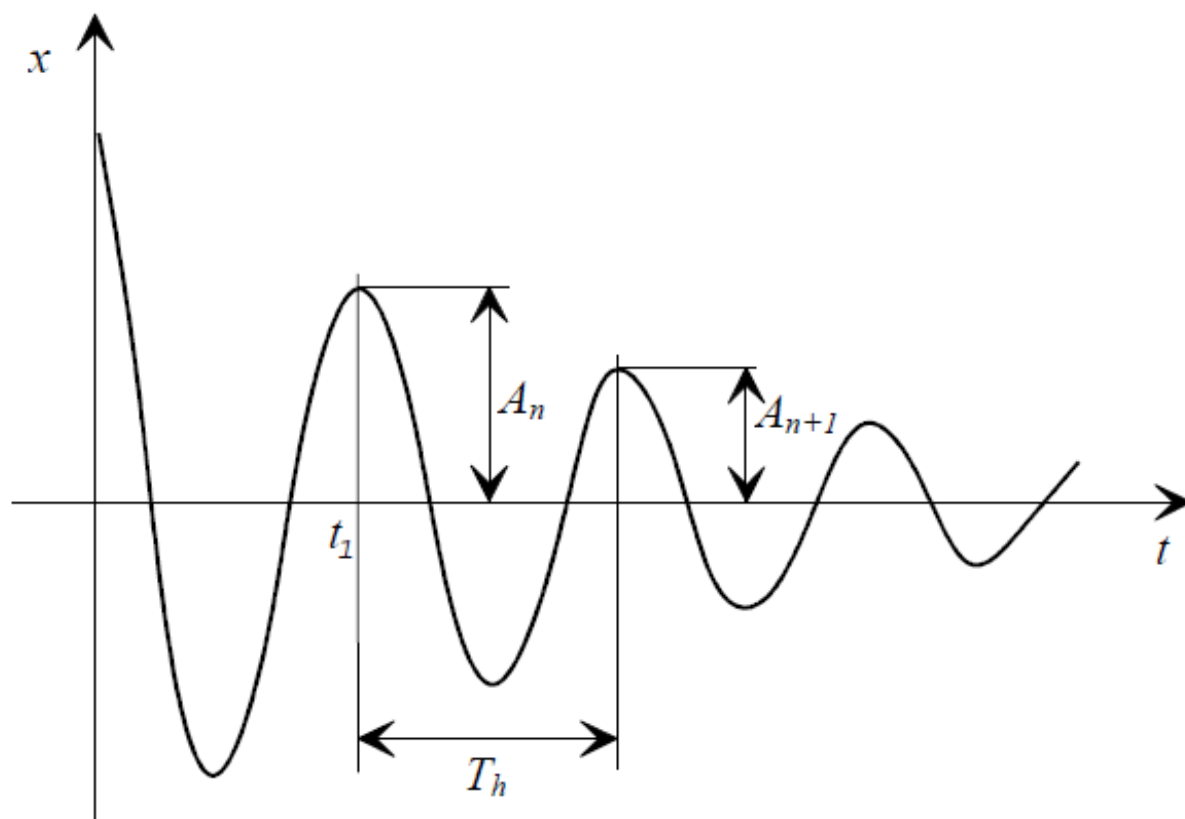
- Częstość drgań własnych:  $\omega_o = \sqrt{\frac{c}{m}}$  ;
- Współczynnik tłumienia:  $\delta = \frac{b}{2 \cdot m}$
- Bezwymiarowy (względny) współczynnik tłumienia:  $D = \frac{b}{2 \cdot m \cdot \omega_o} = \frac{\delta}{\omega_o}$

rozwiązanie równania ruchu (1) dla drgań tłumionych ( $D < 1$ ) ma postać:

$$x(t) = X_o \cdot e^{-D \cdot \omega_o \cdot t} \cdot \sin(\omega_h \cdot t + \phi) \quad (2)$$

gdzie:

$$\omega_h = \omega_o \cdot \sqrt{1 - D^2} = \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} .$$



Dwie kolejne maksymalne wartości wychyleń  $x$  dla czasu  $t_1$  i  $t_1 + T_h$  mają wartości:

$$x(t_1) = A_n = X_o \cdot e^{-D \cdot \omega_o \cdot t_1}$$

$$x(t_1 + T_h) = A_{n+1} = X_o \cdot e^{-D \cdot \omega_o \cdot (t_1 + T_h)}$$

Iloraz tych amplitud pozwala na obliczenie tzw. logarytmicznego dekrementu drgań  $\Delta$ :

$$\Delta = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) = \ln\left(\frac{X_o \cdot e^{-D \cdot \omega_o \cdot (t_1)}}{X_o \cdot e^{-D \cdot \omega_o \cdot (t_1 + T_h)}}\right) = \ln\left(e^{D \cdot \omega_o \cdot T_h}\right) = D \cdot \omega_o \cdot T_h = \delta \cdot T_h \quad (3)$$

Wartość logarytmicznego dekrementu drgań tłumionych również można wyznaczyć mierząc dowolne dwie oddalone od siebie o  $k$  okresów amplitudy przebiegu drgającego, ponieważ:

$$\frac{1}{k} \ln \left( \frac{A_n}{A_{n+k}} \right) = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{X_o \cdot e^{-D \cdot \omega_o \cdot (t_1)}}{X_o \cdot e^{-D \cdot \omega_o \cdot (t_1 + kT_h)}} \right) = \frac{1}{k} \ln \left( e^{D \cdot \omega_o \cdot kT_h} \right) = \frac{1}{k} k \cdot D \cdot \omega_o \cdot T_h = \Delta \quad (4)$$

Natomiast na podstawie pomiaru okresu drgań tłumionych  $T_h$  obliczamy częstotliwości drgań tłumionych  $\omega_h$  i drgań własnych  $\omega_o$  układu:

$$\omega_h = \frac{2\pi}{T_h}, \quad \omega_o = \sqrt{\omega_h^2 + \delta^2}, \quad \text{gdzie: } \delta = \frac{\Delta}{T_h} \quad (5)$$

## Metody pomiaru drgań mechanicznych

Proces pomiaru drgań mechanicznych generowanych przez pewien obiekt jest podstawą do ich dalszej analizy i opisu. Pomiaru tego można dokonać na trzy sposoby – poprzez pomiar **przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia**.

Te trzy wielkości mogą być przekształcane na inną wielkość, którą można łatwo zmierzyć (zwykle wielkość elektryczną, taką jak napięcie) za pomocą czujników odpowiednio przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia.

W związku z tym że wielkości reprezentujące drgania mechaniczne są ze sobą powiązane, możliwe jest otrzymanie jednego parametru ruchu z innego poprzez wykonanie różniczkowania lub całkowania po czasie. Jednak wybór rodzaju czujnika nie jest dowolny.

W zależności od częstotliwości i poziomu drgań dany rodzaj przetwornika może być bardziej właściwy od innego.

Czujniki przemieszczenia mierzą względny ruch dwóch elementów (odległość pomiędzy nimi) lub bezwzględny ruch całej struktury w odniesieniu do nieruchomego punktu. Czujniki te mogą być wykonane jako bezdotykowe sondy zbliżeniowe (przemieszczenie względne) lub czujniki przyspieszenia z podwójnym całkowaniem (ruch bezwzględny).

Czujniki przemieszczenia są najbardziej odpowiednie do pomiaru drgań o niskiej częstotliwości i amplitudzie. Typowy czujnik przemieszczenia jest sondą, w której zmiany prądu elektrycznego w cewce umieszczonej w końcówce sondy są zamieniane na zmienne napięcie. Zmiany prądu zachodzą w wyniku powstania prądu wirowego w przewodzącej powierzchni, która znajduje się w polu elektromagnetycznym wytworzonym przez sondę. Im mniejsza odległość pomiędzy sondą a powierzchnią, tym większe zmiany prądu.

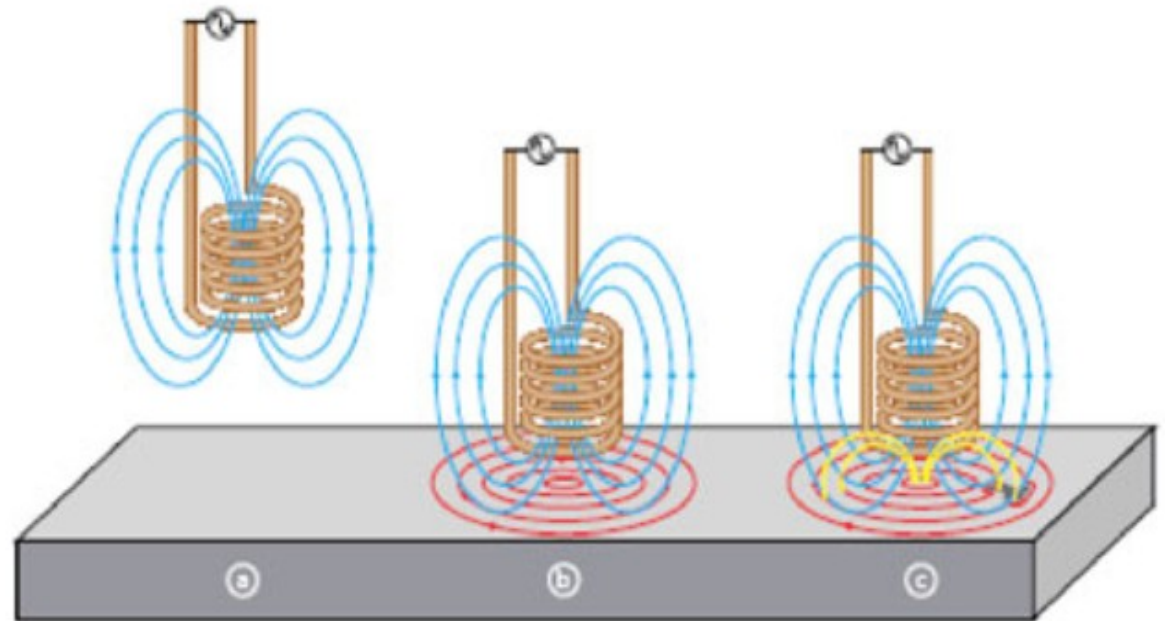
## Konstrukcja czujnika – cz. wiroprowodowy

wymaganie: aby móc zastosować czujnik wiroprowodowy element nadzorowany musi być wykonany z materiału przewodzącego (np. stal, miedź, aluminium).

Czujnik wiroprowodowy składa się dwóch elementów: tj. właściwego czujnika oraz z oscylatora-demodulatora. Właściwy czujnik to cewka z uzwojeniem nawiniętym na izolator ceramiczny lub wykonany z tworzywa sztucznego.



Abb. 4.1: Ungeschirmter Sensor



## Zalety czujników wiroprowodowych

- równoczesny pomiar drgań wału oraz położenia statycznego czopa,
- duży użyteczny zakres częstotliwości (od 0 do 5/10 kHz i wyżej),
- liniowa charakterystyka przy dużym zakresie przemieszczeń do kilku mm (np. czujnik PR 6426 0 - 2000 mm),
- duża dokładność ( $< 1.2\%$ ) przy względnie prostej konstrukcji czujnika (ale złożona elektronika dla zachowania odp. stosunku sygnału do szumu),
- łatwość kalibracji,
- niewrażliwość na pola zakłócające o niskich częstotliwościach,
- możliwość instalacji w trudnych warunkach,
- możliwość przesyłania sygnału na duże odległości (do 300 m) co jest wynikiem małej rezystancji układu oscylatora

## Wady czujników wiroprowadowych:

- zależność charakterystyki czujnika od przenikalności magnetycznej wału,
- wpływ na jakość sygnału niejednorodności struktury wału oraz nierówności jego powierzchni (runout),
- wpływ ciśnienia (szczególnie jego zmian) na czułość czujnika,
- duży stosunek składowej stałej do składowej zmiennej (wymagający dwóch torów przetwarzania dla AC i DC),



## Czujnik prędkości z masą sejsmiczną

Czujniki prędkości są najstarszym typem czujników drgań. Ze względu na swoją budowę nazywane są czujnikami z masą sejsmiczną.

Czujnik prędkości pozwala pomiaru drgań bezwzględnych i montowany jest bezpośrednio na drgającym elemencie maszyny.

Dane techniczne czujnika Philips PR 9266

Wymiary: wysokość 101 mm, średnica 58 mm,

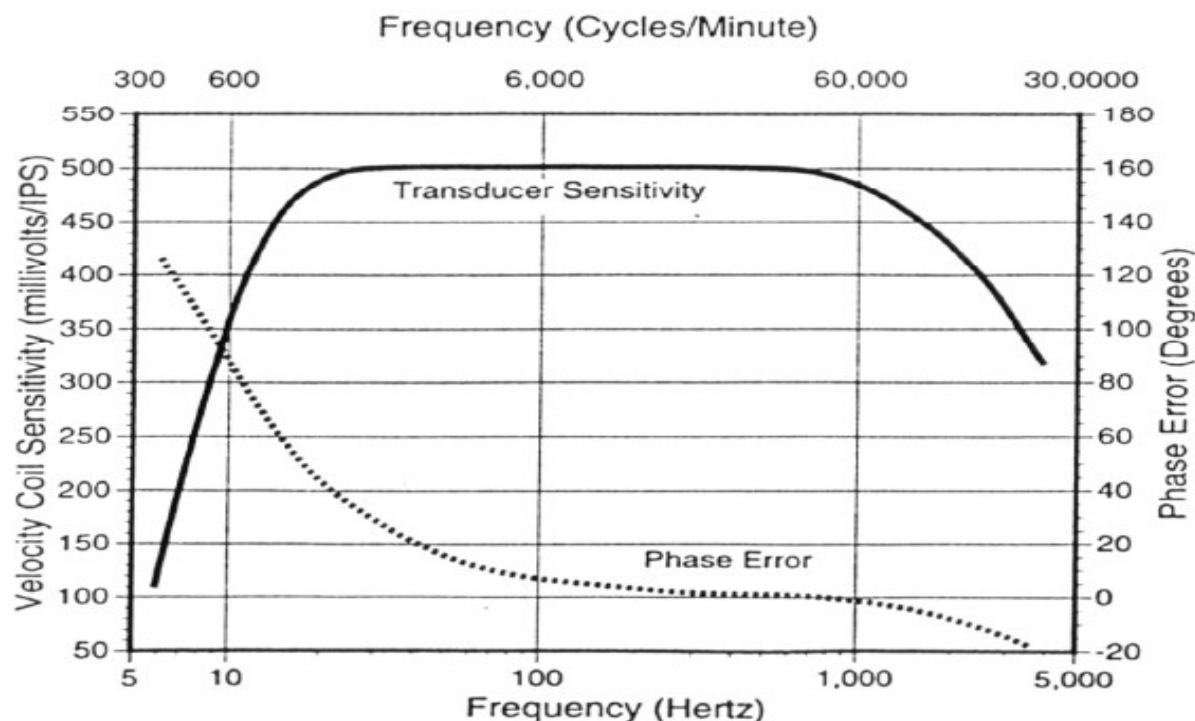
masa : 490 g

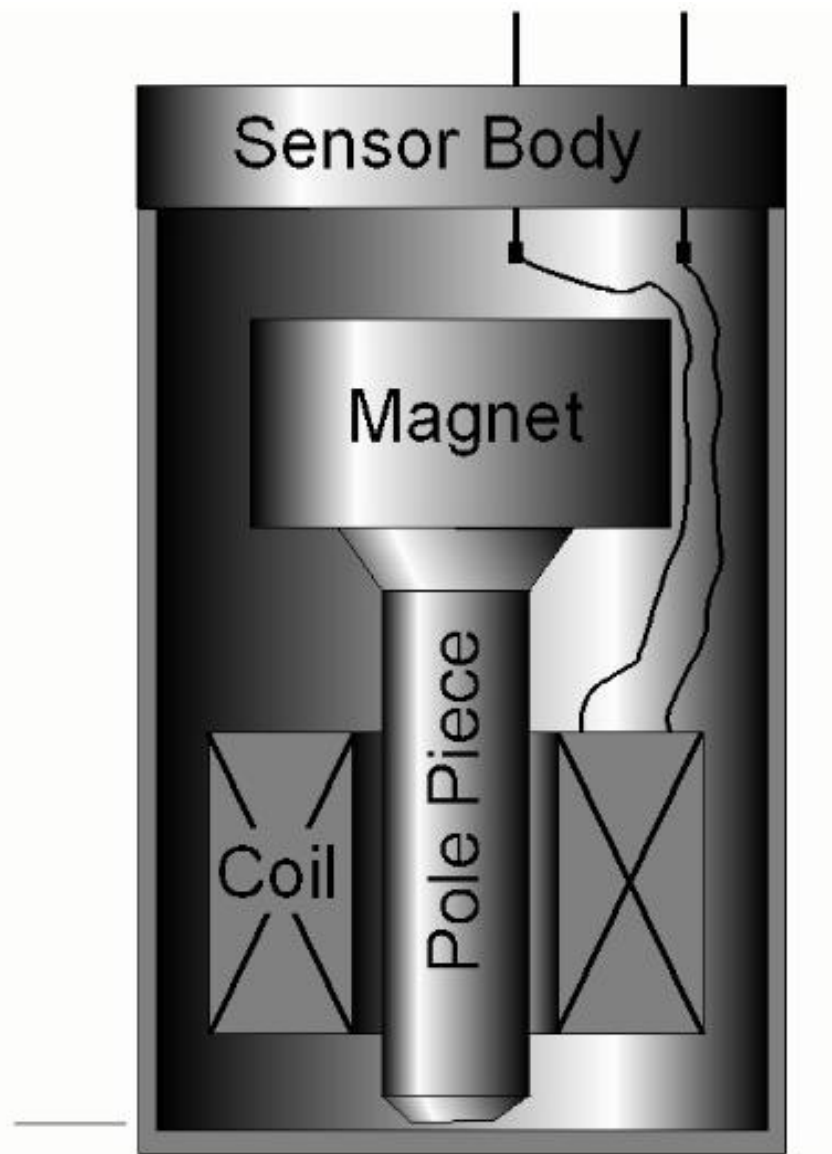
masa układu inercyjnego: 21 g,

pasmo częstotliwości 10 – 1000 Hz,

górną graniczną częstotliwość (- 3dB): ~2000 Hz,

czułość: 30 mV/mm.s-1





Czujniki prędkości są z reguły konstruowane jako układy elektromagnetyczne z cewką i magnesem.

Im szybszy jest ruch magnesu, który poddany jest działaniu sił bezwładności, tym większa siła elektromotoryczna jest indukowana w cewce.

Istnieją także czujniki prędkości zbudowane jako czujniki przyspieszenia z wewnętrznym całkowaniem.

Czujniki prędkości są używane w pomiarach drgań o niskich do średnich częstotliwościach.

## Zasada działania:

- ruch drgający badanego elementu przenosi się na drgania obudowy i cewki,
- miękka sprężyna powoduje, że magnes stały jest praktycznie nieruchomy,
- ruch względny pomiędzy magnesem stałym i cewką powoduje, że linie pola magnetycznego magnesu przecinają cewkę powodując napięcie proporcjonalne do prędkości drgań obudowy.

## Zalety czujników prędkości:

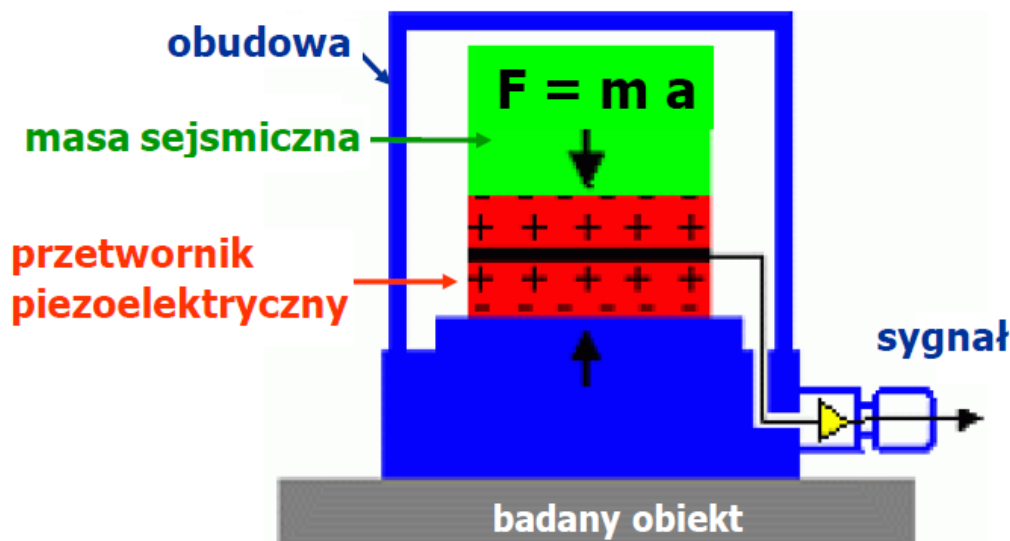
- pomiar drgań bezwzględnych,
- dobra charakterystyka osiowa – czujnik teoretycznie nieczuły na drgania poprzeczne,
- możliwa zmiana charakterystyki rezonansowej (rezonans w dolnym zakresie częstotliwości) przez zmianę tłumienia wprowadzaną poprzez cewkę korekcyjną,
- pasmo częstotliwości 10 – 1500 Hz (przy 3dB dokładności); dolny zakres ograniczony jest częstotliwością własną a górny bezwładnością masy sejsmicznej,
- brak konieczności zasilania czujnika,
- łatwość montażu

## Wady czujników prędkości

- zniekształcenie amplitudy i fazy poniżej 50 Hz,
- podatność na uszkodzenia elementów mechanicznych czujnika,
- czujnik jedynie do pomiarów dynamicznych (składową stałą napięcia można
- wykorzystać do wykrywania uszkodzeń toru pomiarowego),
- czułość temperaturowa poza wąskim zakresem 0 – 120C,
- dokładność pomiarowa bardzo silnie zależy od użytych materiałów i dokładności
- wykonania elementów czujnika,

Czujniki przyspieszenia, zwane **akcelerometrami**, mierzą przyspieszenie poprzez pomiar siły bezwładności działającej na masę pomiarową.

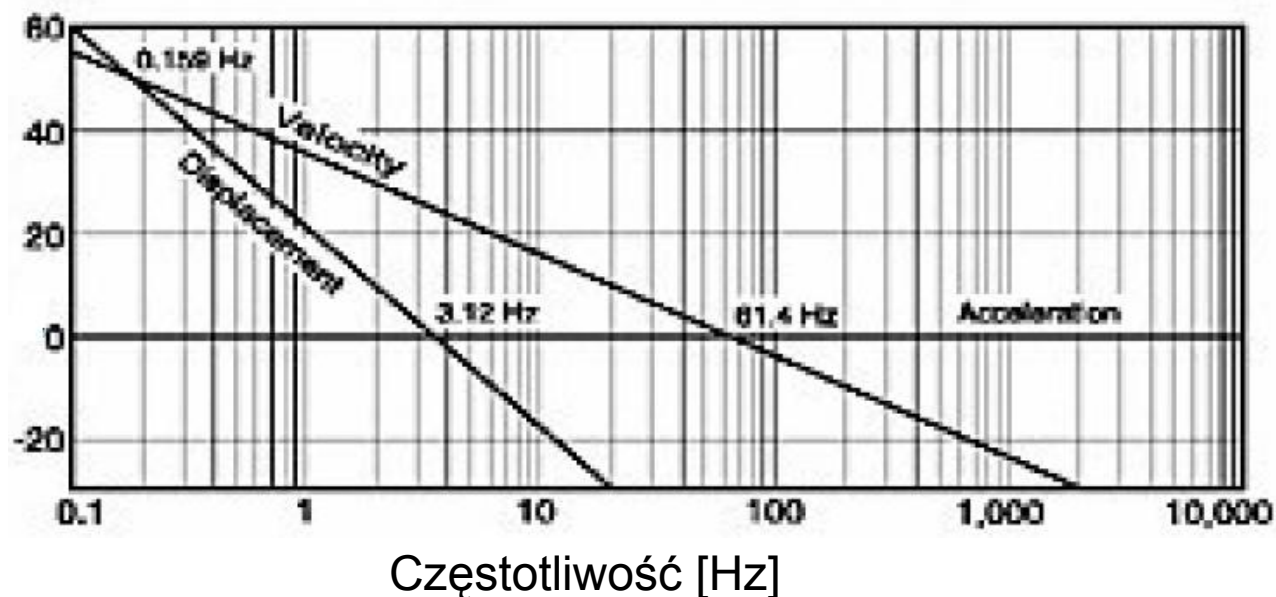
Model mechaniczny czujnika jest pokazany na rys.



Siła bezwładności działająca na masę zawieszoną na połączeniu elastycznym (takim jak sprężyna) jest proporcjonalna do przyspieszenia zgodnie z drugim prawem Newtona i powoduje powstanie równej co do wielkości siły elastycznej w połączeniu zgodnie z trzecim prawem Newtona. Istnienie siły elastycznej skutkuje proporcjonalnym odkształceniem, które może być mierzone na różne sposoby.

Czujniki przyspieszenia są odpowiednie do pomiarów drgań o niskich do wysokich częstotliwościach, co czyni je bardzo wszechstronnymi.

Czułość pomiarowa w stosunku do czułości akcelerometru [dB]



Rys. 5. Wykres czułości czujników przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia w funkcji częstotliwości

Czułość różnych rodzajów czujników w funkcji częstotliwości obrazuje Rys. 5. Jak widać, czujniki przyspieszenia oferują najlepszą czułość w szerokim paśmie częstotliwości i ich użycie jest polecane w większości zastosowań związanych z monitoringiem stanu technicznego maszyn i diagnostyką.



## Piezoelektryczne czujniki przyspieszenia

W akcelerometrach piezoelektrycznych wykorzystywane jest zjawisko Piezoelektryczne. Zewnętrzna zmienna siła działająca na kawałek kryształu dielektryka powoduje indukcję ładunku powierzchniowego proporcjonalnego do wielkości siły, a więc do przyspieszenia.

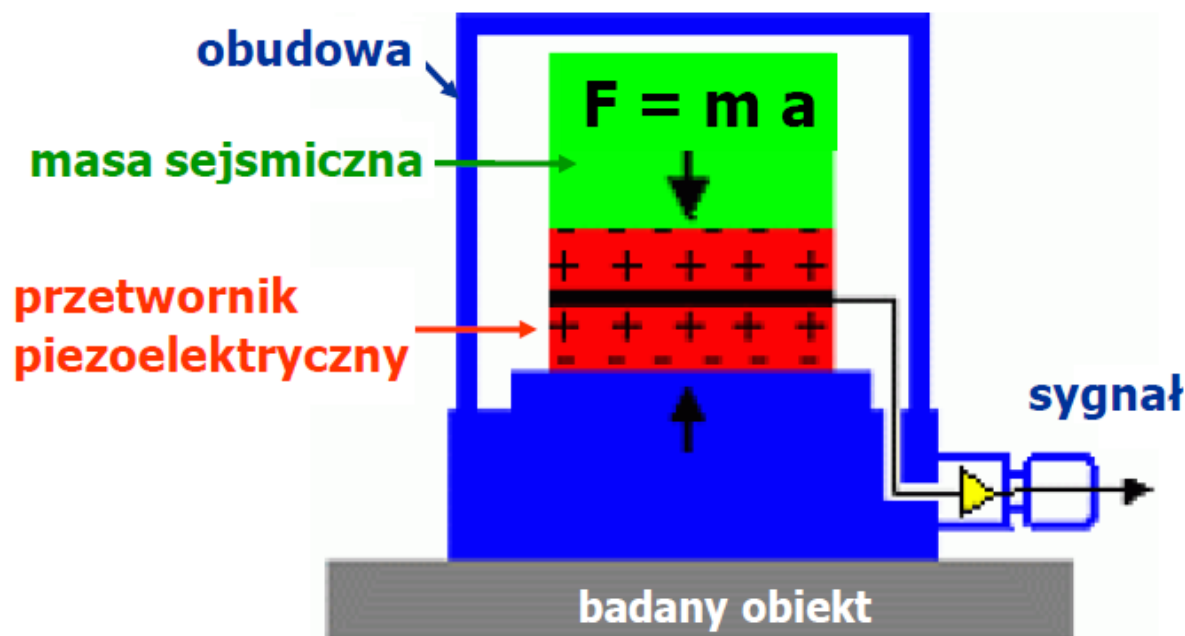
Materiałami piezoelektrycznymi używanymi do produkcji akcelerometrów są kwarc, ceramiki syntetyczne, takie jak cyrkonian-tytanian ołowiu (PZT) oraz tworzywa sztuczne takie jak poli(fluorek winylodenu) (PVdF).

Akcelerometry kwarcowe wykazują niższą czułość i wyższy poziom szumu niż czujniki wykonane z materiałów piezoceramicznych.

Materiały piezoelektryczne mogą mieć różne kształty. Zwykle mają formę cienkich sztabek lub płytek. Krysztal musi być dokładnie przycięty w określonym kierunku do jego osi.

W przypadku akcelermetrów krysztal zwykle jest cięty w ten sposób, że jest on czuły na siły ścinające.

Ta konfiguracja powoduje indukcję ładunku na obciążonych powierzchniach i umożliwia na szeregowo połączenie mechaniczne oraz elektryczne elementów w celu zwiększenia indukowanego ładunku.



Rys. 3. Budowa czujnika przyspieszenia

Można wyróżnić dwa rodzaje akcelerometrów piezoelektrycznych – czujniki wysoko i niskoimpedancyjne (ICP – ze zintegrowanym wzmacniaczem) .

Czujniki wysokoimpedancyjne mają wyjście ładunkowe i wymagają dodatkowego wzmacniacza ładunku pełniącego rolę przetwornika ładunek-napięcie.

Akcelerometry niskoimpedancyjne mają zintegrowany wzmacniacz ładunku i parametrem wyjściowym jest napięcie. Wzmacniacz ładunku jest zazwyczaj wzmacniaczem napięcia o dużym wzmocnieniu zbudowanym z wejściem zbudowanym na tranzystorach polowych (JFET lub MOSFET), co zapewnia dużą rezystancję izolacji.

W przypadku czujników niskoimpedancyjnych, niezbędne jest ich zewnętrzne zasilanie.

Do zalet akcelerometrów piezoelektrycznych należy wysoka rozdzielczość pomiarowa, stosunkowo mały poziom szumu i szerokie pasmo częstotliwościowe mierzonych drgań w związku z wysokimi częstotliwościami rezonansowymi.

## Zalety czujników przyśpieszenia

- pomiar drgań bezwzględnych,
- generowany sygnał elektryczny jest proporcjonalny do przyśpieszenia ruchu drgającego,
- duża czułość i dynamika sygnału wyjściowego (ok. 90 dB),
- pasmo częstotliwości 10 Hz – 30 kHz (przy 3dB dokładności);
- praca czujnika poniżej częstotliwości własnej,
- płaska charakterystyka fazowa w paśmie przenoszenia,
- duża żywotność i wytrzymałość wynikająca min. z braku ruchomych elementów,
- małe wymiary i łatwość montażu,
- specjalne konstrukcje dla zastosowań w wysokich temperaturach (do 400°C )

## Wady czujników przyśpieszenia

- czułe na sposób montażu i stan powierzchni,
- niemożliwy pomiar drgań względnych,
- kłopotliwa kalibracja,
- wymagane zewnętrzne zasilanie,
- czułość kabla na szum, ruch i elektryczne oddziaływania,
- zakres stosowania do 125°C dokładność wskazań zależy od dokładności wykonania,
- złożona elektronika – konieczność stosowania wzmacniaczy ładunków i konwersji sygnału

## Kryteria wyboru typu czujnika:

- wymagany zakres częstotliwościowy (np. przyśpieszenia rzędu 100 g dla częstotliwości 10kHz typowej dla częstotliwości łopatkowych odpowiadają przemieszczeniu 0.5 mm, natomiast przemieszczenia rzędu 254mm dla 10 Hz odpowiadają zaledwie 0.5 g ),
- typ nadzorowanych drgań (drgania względne lub bezwzględne),
- czułość i pasmo przenoszenia czujnika,
- rozmiar i waga czujników.

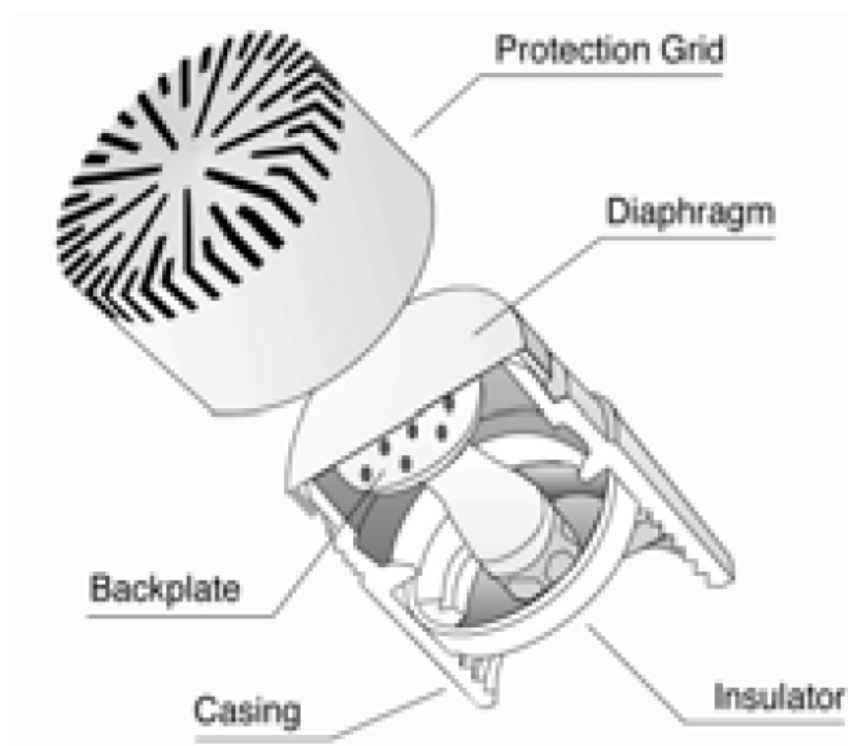
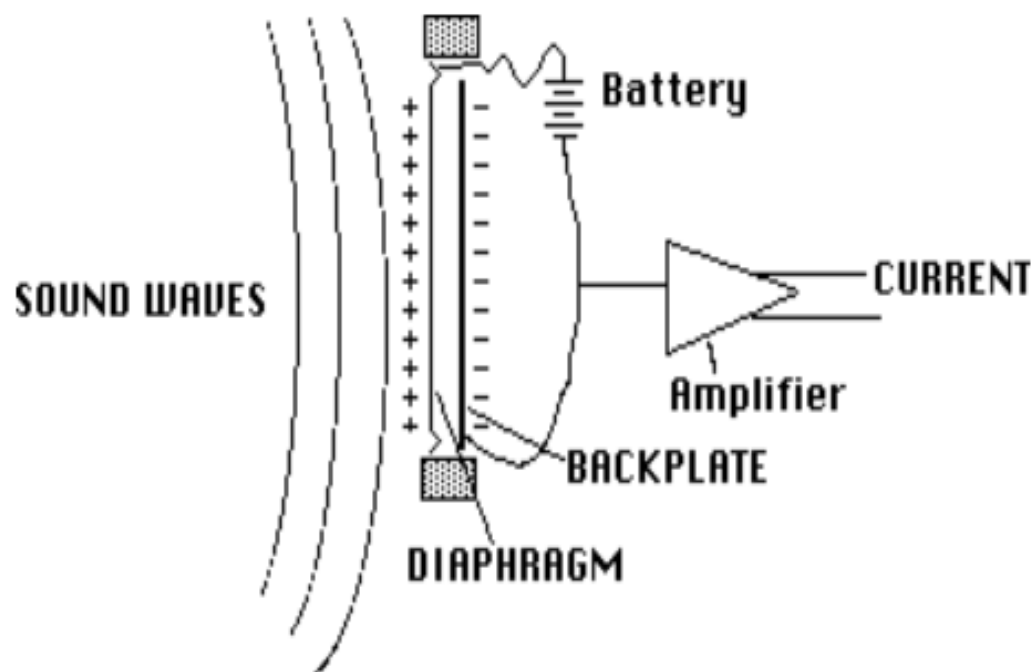
## Czujnik hałasu

Jedną z metod oceny stanu technicznego urządzeń jest pomiar hałasu.

Do pomiaru hałasu służy mikrofon pomiarowy o określonej konstrukcji, który powinien spełniać następujące warunki:

- duży dopuszczalny zakres zmian amplitud obserwowanych przebiegów,
- szeroki zakres przenoszonych częstotliwości,
- wysoka stabilność czułości,
- mały wpływ temperatury na czułość,
- mały wpływ pól magnetycznych.

Podstawowym elementem mikrofonu pojemnościowego jest membrana znajdująca się w niewielkiej odległości przed sztywną płytką. Membrana i płytką stanowią kondensator powietrzny. Płytką zawieszona jest w obudowie mikrofonu za pomocą płytek kwarcowych spełniających jednocześnie zadanie izolatora.





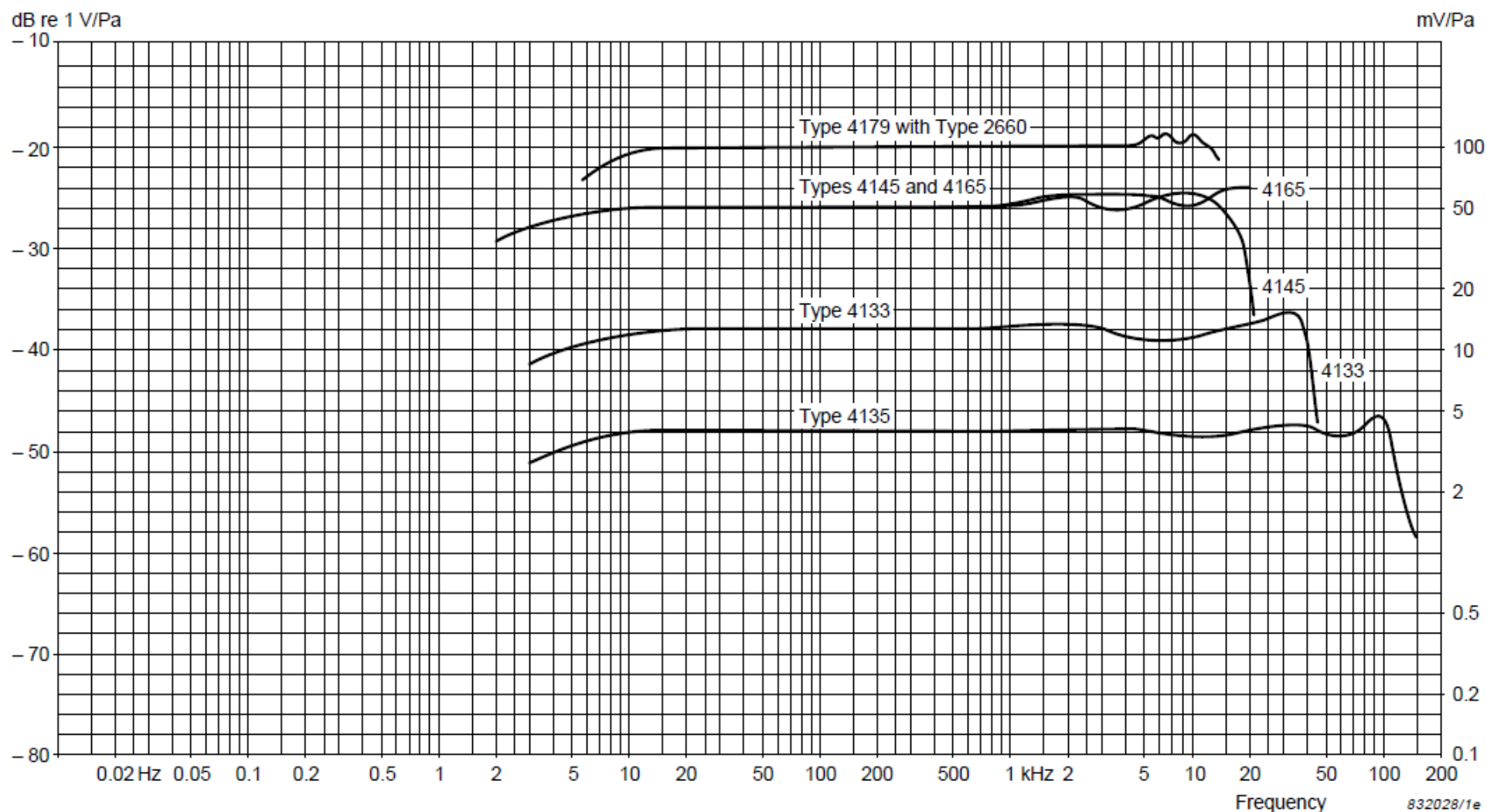


Fig.8 Typical 0° incidence free-field frequency responses of the different free-field microphones recorded by means of the electrostatic actuator method and corrected according to the curves shown in Fig. 9