Pomiary Dźwięku i Wibracji Akustycznych

1. Wstęp

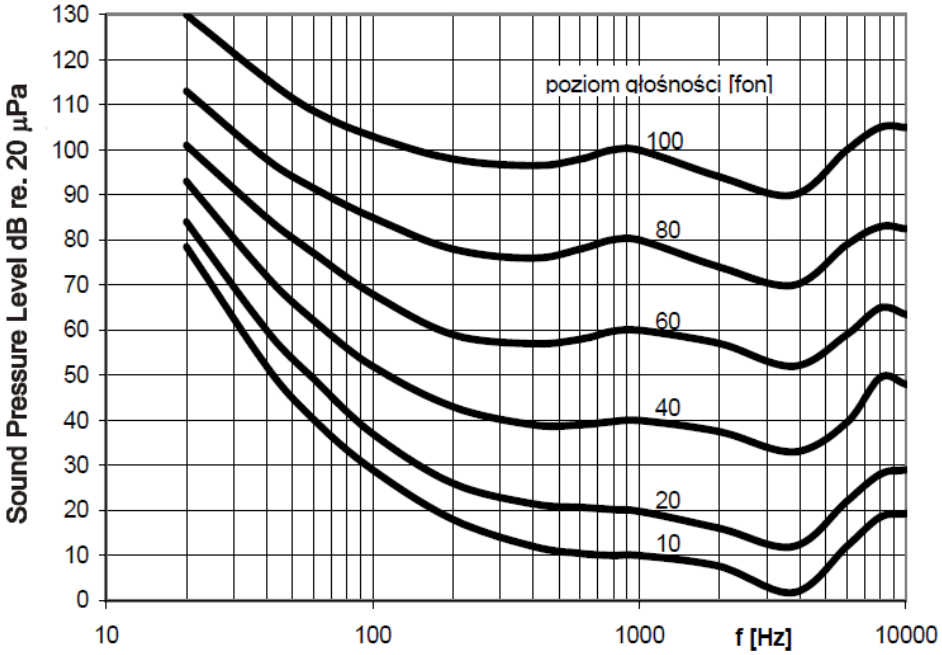
Akustyczny świat dzieli się na dwie dziedziny: dźwięki i wibracje akustyczne. Krótko mówiąc, „dźwięki” są tym, czym jesteśmy wstanie zarejestrować zmysłem słuchu, natomiast „wibracje” są tym, czym jesteśmy wstanie odebrać za pomocą zmysłu dotyku. Gdy dany obiekt wibruje, to zazwyczaj wytwarza dźwięk, zatem obydwie dziedziny w pewnym stopniu mają wiele ze sobą wspólnego. Jednak narzędzia pomiarowe i teoria opisująca je są bardzo różne i z tego względu świat akustyczny dzieli się na te dwie dziedziny.

Pomiary oraz badania dźwięku i wibracji (w skrócie wibroakustyczne) ogrywają znaczącą rolę we współczesnym świecie, ze względu na dynamiczny rozwój różnych sektorów gospodarki (komunikacyjny, elektromaszynowy, budowlany itd.), co za tym idzie, zwiększony poziom hałasu i drgań obiektów, wytwarzających je. Opracowano wiele norm międzynarodowych i krajowych, określających i ustalających procedury i warunki pomiarów wibracji i drgań. Powstały dwie główne międzynarodowe organizacje zajmujące się pracami nad ich normalizacją tj. organizacja ISO (International Organization for Standardization) oraz komisja IEC (International Electrotechnical Commission).

2. Czym są dźwięki i wibracje?

Dźwięk jest to szybko rozchodząca się fala ciśnienia w danym ośrodku. Tym ośrodkiem może być powietrze, woda, drewno lub każdy inny materiał. Mamy zazwyczaj tu na myśli słyszalny dźwięk, który jest odczuciem (wykrywanych przez ucho) o bardzo małych szybkich zmianach ciśnienia powyżej i poniżej wartości statycznej ciśnienia. "Statyczna" wartość ciśnienia atmosferycznego (około 100 000 Pa), która zmienia się jednak powoli według wskazań barometru. Z falą ciśnienia akustycznego związany jest przepływ energii. Dźwięk jest często przedstawiany schematycznie w postaci sinusoidy, ale fizycznie dźwięk (w powietrzu) jest podłużną falą, gdzie ruch fali odbywa się w kierunku przemieszczania energii. Maksima fali mogą być uważane, jako maksima ciśnienia, podczas gdy minima oznaczają wartości minimalne ciśnienia.

Ludzkie ucho jest bardzo czułe na małe zmiany ciśnienia powietrza. Jednak nie wszystkie częstotliwości są słyszalne na podobnym poziomie. Ludzkie ucho jest najbardziej czułe na zmiany ciśnienia dla częstotliwości około 3 kHz (odpowiadająca 3000 zmian na sekundę). Dla częstotliwości 30 Hz ucho jest około 200 razy mniej czułe. Jak wspomniano, statyczne ciśnienie powietrza wynosi około sto tysięcy Paskali (Pa), a zmiana ciśnienia o jeden Paskal jest postrzegana, jako bardzo głośny ton dla 1 kHz, lecz jako słaby ton dla 20 Hz wg. poniższego wykresu:



Rys. 1. Krzywe równego poziomu głośności dźwięków prostych w polu swobodnym (krzywe Fletchera-Munsona)

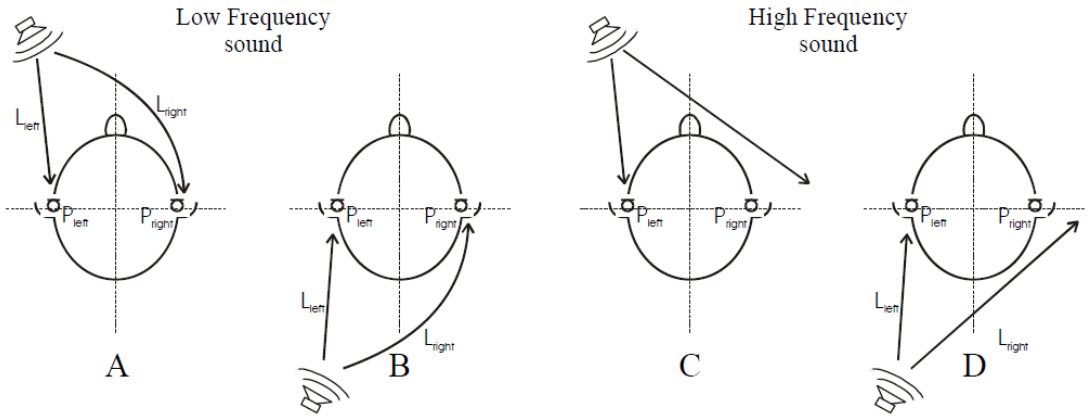
Ciśnienie jest definiowane, jako siła na jednostkę powierzchni. Siła ta spowodowana jest przez ilość cząstek powietrza w określonym położeniu. Tak, więc zmiany ciśnienia (dźwięku) zależą od zmiany liczby cząsteczek powietrza. Jeśli liczba cząstek w pewnej objętości zmienia się w czasie, to musi nastąpić ruch cząstek w tej objętości. Prędkość przepływu tych cząstek powietrza nazywany jest prędkością cząstek. Dlatego dźwięk składa się zawsze z dwóch części: sprężania i rozprężania powietrza, ciśnienia dźwięku i ruchu powietrza: prędkość cząstki.

Ciśnienie akustyczne, jak również prędkość cząsteczek powinny być mierzone w celu zupełnego ilościowego określenia pola dźwięku. W analogii elektrycznej, ciśnienie dźwięku odpowiada elektrycznemu napięciu, zaś prędkość cząsteczek - prądu elektrycznemu. Ilość mocy jest określona w watach. Mnożenie napięcia i prądu daje moc elektryczną i analogicznie, ciśnienie dźwięku razy prędkość cząsteczek jest związana z mocą dźwięku w dziedzinie akustycznej.

Ciśnienie akustyczne, wymuszone przez liczbę cząsteczek powietrza w określonym położeniu, nie posiada kierunku; ciśnienie akustyczne jest skalarną wielkością. Przeciwnie, prędkość cząsteczek powietrza ma pewien kierunek: prędkość cząstek jest wielkością wektorową. Aby wskazać kierunek rozchodzenia się fali dźwiękowej, ciśnienie akustyczne i prędkość cząstki muszą być mierzone jednocześnie w jednym miejscu. Otrzymany rezultat zapewnia informację o kierunku fali akustycznej.

Ucho ludzkie wykrywa jedynie ciśnienie akustyczne. Więc jak to możliwe, że możemy wskazać, skąd pochodzi dźwięk?. Jest to związane z kształtem ucha, oraz z tym, że posiadamy dwoje uszu. Ludzka głowa

może być traktowana, jak dwa mikrofony ciśnienia (P_{left} i P_{right}) rozdzielone 20cm ciągłą linią (głowa), zob. rys. 2:



Rys. 2. Schemat głowy postrzegającej fale dźwiękowe przedstawiony w sposób podstawowy.

Przy użyciu obu uszu, jednym uchem można wykryć poziom dźwięku (różnicę), natomiast drugim można wykryć różnicę czasu pomiędzy dźwiękiem postrzeganym w jednym uchu i drugim. Jeżeli zakłada się, że źródło dźwięku znajduje się w lewo od przodu (rys. 2A), a częstotliwość nie jest zbyt wysoka, to dźwięk musi podróżować dłużej do prawego ucha niż do lewego ($L_{left} < L_{right}$). Ponieważ długość fal dźwiękowych o niskiej częstotliwości jest duża, to głowa jest uważana za niewielką przeszkodę. Fala dźwiękowa ma tendencję do zaginania się na małych przeszkodach, a zatem różnica intensywności pomiędzy dwoma uszami jest niewielka. Przez wykorzystanie tego opóźnienia czasowego (lub dokładniej, z przesunięciem fazowym) można zlokalizować źródło dźwięku.

W bardzo prosty sposób można wyjaśnić, czy źródło dźwięku znajduje się z lewej od tyłu (rys. 2B), gdzie jedno ucho wykrywa to samo przesunięcie fazowe: kształt uszu czyni możliwym do odróżnienia pomiędzy dźwiękiem pochodzącym od przodu i od tyłu. (Ruch głowy ma również coś wspólnego z lokalizacją źródłowa dźwięku).

Ponieważ dla wyższych częstotliwości długość fali dźwiękowej staje się krótsza, to metoda rozdzielenia obu uszu i przesunięcia fazowego staje się nieważna. Bowiem głowa ma teraz większe wymiary w stosunku do długości fali dźwiękowej, więc staje się przeszkodą dla fal dźwiękowych. W sytuacji rys. 2C lewe ucho postrzeże większy poziom dźwięku niż w prawym uchu: lokalizacja źródła dźwięku zlokalizowane jest na podstawie różnicy poziomu dźwięku. Ponownie, jeśli źródło dźwięku znajduje się z lewej od tyłu (rys. 2D), to jedno z uszu wykrywa różnicę poziomów. Kształt uszu jest znów wykorzystywany w celu rozróżnienia, czy źródło dźwięku pochodzi od przodu, czy też od tyłu.

Jak już wspomniano, ucho może wykrywać tylko ciśnienie dźwięku i nie ma możliwości dostrzeżenia prędkości cząstek. A jak to jest z czujnikami akustycznymi? Cóż, istnieją trzy rodzaje czujników. Pierwszy rodzaj, to czujniki ciśnienia akustycznego, podobnie jak nasze ucho. Drugi, to mikrofony gradientu ciśnienia dźwięku, ten rodzaj czujnika

akustycznego jest wrażliwy na różnicę ciśnień na odległość (podobnie jak ludzka głowa przy niskich częstotliwościach: dwa czujniki ciśnienia oddzielone na pewnej odległości). Trzeci, jako jedyny rodzaj mikrofonu wrażliwy na prędkość cząsteczek tj.: Microflown.

Natomiast wibracje określane są w fizyce, jako zjawiska, w których wielkości fizyczne charakterystyczne dla tych zjawisk są zmienne w funkcji czasu. Węższym pojęciem są wibracje mechaniczne, definiowane, jako ruch cząstek ośrodka sprężystego względem położenia równowagi. Wibracje mechaniczne mogą, zatem rozprzestrzeniać się w ośrodkach zarówno płynnych, jak i stałych. W aspekcie ochrony i bezpieczeństwa człowieka w środowisku pracy, rozpatrywane są jedynie wibracje mechaniczne (drgania), które rozprzestrzeniają się w ośrodkach stałych.

Wibracje mechaniczne w wielu przypadkach są czynnikiem roboczym, celowo wprowadzanym przez konstruktorów do maszyn czy urządzeń, jako niezbędny element do realizacji zadanych procesów technologicznych, np. w maszynach i urządzeniach do wibrorozdrabniania, wibroseparacji, wibracyjnego zagęszczania materiałów, oczyszczania i mielenia wibracyjnego, a także do kruszenia materiałów, wiercenia, drążenia i szlifowania. Wibracje mechaniczne są też często bezcennym źródłem informacji, gdyż na podstawie analizy sygnału drganiowego można dokonać oceny stanu technicznego maszyny i jakości jej wykonania. Jednakże wibracje mechaniczne mogą również powodować zakłócenia w prawidłowym działaniu maszyn i innych urządzeń, zmniejszać ich trwałość i niezawodność oraz niekorzystnie wpływać na konstrukcje i budowle. Przenoszone drogą bezpośredniego kontaktu z drgającym źródłem do organizmu człowieka mogą też wywierać ujemny wpływ na zdrowie pracowników i doprowadzać niejednokrotnie do trwałych zmian chorobowych. Zatem z punktu widzenia ochrony i bezpieczeństwa człowieka w środowisku pracy, drgania mechaniczne są szkodliwym czynnikiem fizycznym, który należy eliminować lub przynajmniej ograniczać.

Wibracje są rejestrowane za pomocą przetwornika przyspieszenia zwanego akcelerometrem lub też laserami. Przetwornik ten jest sztywno zamocowany w do powierzchni badanego obiektu. Akcelerometr wytwarza niewielki ładunek elektryczny, który jest proporcjonalny do przyspieszenia badanej powierzchni drgającej, który jest następnie wzmacniany przez wzmacniacz i jako sygnał elektryczny jest mierzony i konwertowany w postaci cyfrowej w celu dalszej jego obróbki lub też obserwowany za pomocą odpowiedniego miernika. Częstotliwości mierzonych wibracji są na ogół niższe niż dźwięku i wahają się od poniżej 1 Hz do 5 kHz.

Czasami bardziej użyteczną informacją wibracji jest prędkość lub przemieszczenie mierzonych wibracji raczej niż jej przyspieszenie. W przypadku wyznaczenia prędkości mierzonych wibracji jest konieczne scałkowanie sygnału przyspieszania, otrzymanego bezpośrednio na wyjściu akcelerometru. Powtórne scałkowanie sygnału przyspieszenia umożliwia otrzymanie przemieszczenia sygnału.

3. Definicje i miary określające dźwięk i wibracje

Większość zjawisk akustycznych, które człowiek odbiera za pomocą ucha, jest przekazywana za pośrednictwem ośrodka gazowego, jakim jest powietrze. Nawet, jeżeli nie rozchodzą się w nim fale akustyczne, to istnieje w tym ośrodku ciśnienie statyczne zwane często ciśnieniem atmosferycznym. Obszar przestrzeni, w którym rozchodzą się fale akustyczne nazywa się polem akustycznym. W każdym punkcie pola ciśnienie ośrodka zmienia się z czasem, oscylując wokół wartości średniej, jaką jest ciśnienie statyczne. Różnicę chwilowej wartości ciśnienia i ciśnienia statycznego nazwano ciśnieniem akustycznym, którego wartość podaje się w Pascalach (Pa).

Fala dźwiękowa może być opisana różnymi sposobami, ale zwykle najwygodniej jest mierzyć ciśnienie akustyczne (a nie przemieszczenie cząstek czy ich prędkość). Intensywność dźwięku (1) jest średnią wartością mocy akustycznej (2) płynącej przez jednostkową powierzchnię.

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) \cdot v(t) \cdot dt \tag{1}$$

$$N = p(t) \cdot A \cdot v(t) \tag{2}$$

gdzie:

v(t) - chwilowa prędkość cząstek ,

p(t) - chwilowe ciśnienie akustyczne,

A – powierzchnia,

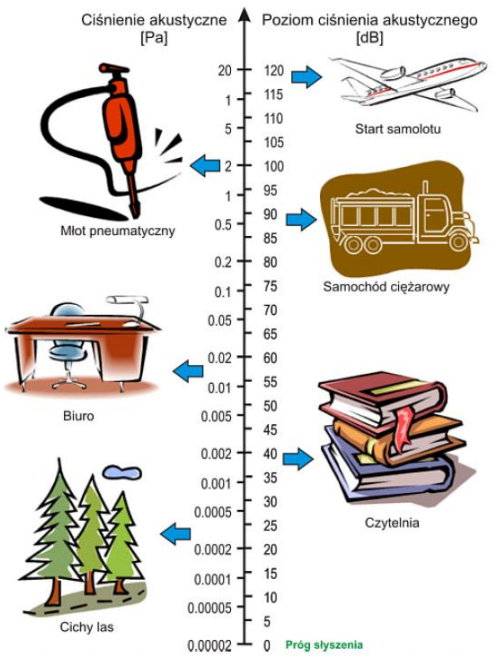
Z teorii rozchodzenia się małych zaburzeń wynika zależność (3):

$$p(t) = \rho \cdot c \cdot v(t) \rightarrow v(t) = \frac{p(t)}{\rho \cdot c} \tag{3}$$

Iloczyn $p \cdot c$ nazywany jest impedancją akustyczną medium charakteryzująca jego własności, np. dla powietrza $p \cdot c = 407\, kg/m^3 \cdot s$. Uwzględniając powyższe w równaniu 1 otrzymujemy ostateczną postać (4) równania określającego intensywność dźwięku.

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{\rho \cdot c} dt = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot T} \int_0^T p^2(t) dt = \frac{p_{RMS}^2}{\rho \cdot c} \tag{4}$$

Szczególnie przydatnymi miarami są tzw. poziomy dźwięku. Z akustyki fizjologicznej wiadomo, że ucho ludzkie może odbierać dźwięki o ciśnieniu z zakresu 10^{-5} do 10^{2} Pa tzn. różniące się 10 milionów razy. Wiemy także, że ludzkie odczucie głośności jest proporcjonalne do logarytmu ciśnienia lub intensywności. Dla tych powodów w akustyce używa się jednostek względnych zwanych belami (decybelami), a mierzone tym sposobem wartości noszą nazwę poziomów. W porównaniu do ciśnienia atmosferycznego (średnio 10^{5} Pa), zmiany ciśnienia w zakresie słyszalnym są bardzo małe, mieszczące się przedziale od około 20 μPa ($20 \cdot 10^{-6}$ Pa) do 100 Pa. 20 μPa jest uśrednioną wartością określającą próg słyszenia dla człowieka (*threshold of hearing).* Ciśnienie akustyczne o wartości około 100 Pa to poziom już tak głośny, że powoduje uczucie bólu. Jest, więc określane, jako próg bólu (*threshold of pain*). Wartość progu bólu jest ponad milion razy większa od progu słyszenia. Bezpośrednie zastosowanie skali liniowej (w paskalach) do oznaczania wyników pomiaru ciśnienia akustycznego prowadziłoby do konieczności operowania wielkimi liczbami różnymi od siebie o kilka rzędów wielkości. Powyższy powód oraz fakt, że ludzkie ucho reaguje na dźwięki raczej logarytmicznie niż liniowo, skłania do posłużenia się w pomiarach dźwięku skalą logarytmiczną, czyli wyrażaniem wyników logarytmowanych z zastosowaniem ustalonego poziomu odniesienia. Wynik wyrażony w skali logarytmicznej podawany jest w decybelach. Korzyści ze stosowania skali logarytmicznej są wyraźnie widoczne na rys. 8.3. Umieszczona z lewej strony skala liniowa z jej wielkimi liczbami ulega przekształceniu w łatwą do opanowania skalę od poziomu 0 dB, odpowiadającemu progowi słyszenia (20 μPa) do 130 dB reprezentujących próg bólu (~100 Pa).



Rys. 3. Schemat głowy postrzegającej fale dźwiękowe, przedstawiony w podstawowy sposób.

Moc akustyczną nazywa się ilość energii wysyłanej przez źródło dźwięku w jednostce czasu. Moc tę określa się w watach (W). Moce akustyczne spotykanych zazwyczaj źródeł dźwięków bardzo się różnią między sobą. Na przykład cichy szept odpowiada mocy akustycznej 10^{-9} W, głos w czasie normalnej rozmowy ma moc akustyczną 10^{-3} W, natomiast startujący samolot odrzutowy emituje hałas o mocy równej 107 W. Posługiwanie się tak znacznie różniącymi się wartościami wyrażonymi w skali liniowej byłoby w praktyce bardzo niewygodne. Z tych względów w

akustyce wprowadzono bezwymiarową skalę logarytmiczną określoną zależnością 5:

$$L_N = 10 \log \frac{N}{N_0} \tag{5}$$

gdzie:

L_N - poziom mocy akustycznej [dB],
N - moc akustyczna źródła dźwięku [W],
N_0 - moc odniesienia, równa 10-12 W.

Wartość mocy akustycznej fali przechodzącej przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku rozchodzenia się fali nazywa się **natężeniem dźwięku *I*** określone zależnością 6:

$$I = \frac{N}{S} \tag{6}$$

gdzie:

N - oznacza moc akustyczną fali przechodzącej przez powierzchnię o polu S [m^2].

Jednostką natężenia dźwięku jest W/m^2. Podobnie jak dla mocy akustycznej wprowadzono również dla natężenia dźwięku bezwymiarową skalę logarytmiczną 7:

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{7}$$

gdzie:

L - poziom natężenia dźwięku [dB],
$I_0=N_0/S_0$ - natężenie odniesienia = 10-12 W/m^2,
S_0 - powierzchnia odniesienia = 1 m^2.

Między oboma wyżej wymienionymi zależnościami jest zachowana zależność 8:

$$L_N = L + 10 \log S \tag{8}$$

Między natężeniem dźwięku I a ciśnieniem akustycznym p istnieje związek określony zależnością (9):

$$I = \frac{p^2}{Z} \tag{9}$$

gdzie:

Z - impedancja akustyczna właściwa ośrodka [N s/m^3].

Po wykorzystaniu zależności 9 poziom intensywności (natężenia) dźwięku można przedstawić równaniem 10:

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \tag{10}$$

gdzie:

p_0 - ciśnienie odniesienia występujące przy natężeniu odniesienia I_0, jest to tzw. umowne ciśnienie progowe wynoszące 20 μPa.

A stąd można określić tzw. poziom ciśnienia dźwięku L_p, jako zależność 11.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \tag{11}$$

Oznacza to, że poziom natężenia dźwięku można wyznaczyć za pomocą pomiaru ciśnienia akustycznego. Pomiar taki wykonuje się przeważnie za pomocą specjalnych mikrofonów spełniających rolę czujników ciśnienia.

Warto tu zaznaczyć, że dla fali płaskiej poziom ciśnienia dźwięku odpowiada poziomowi natężenia dźwięku 12:

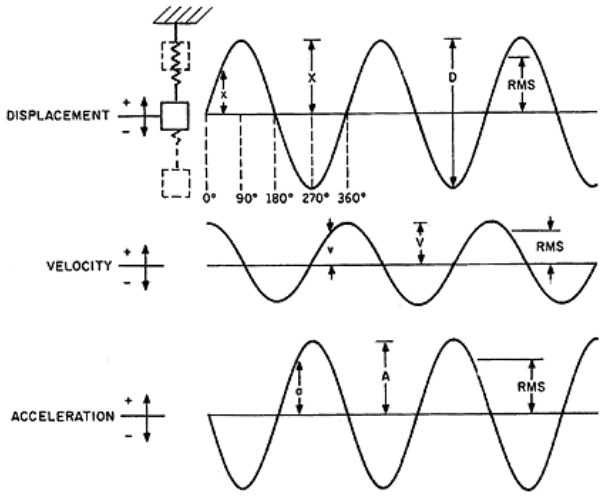
$$L = 10 \log \frac{I}{I_u} = 20 \log \frac{p_{RMS}}{p_u} = L_p \tag{12}$$

Poziom natężenia dźwięku podany w dB wyraża stosunek natężenia do przyjętego natężenia odniesienia, a więc jest wielkością bezwymiarową. Przyjęta wartość odniesienia I_0=10-12 W/m^2 odpowiada progowi słyszalności ucha ludzkiego (0 dB) dla dźwięku o częstotliwości 1 kHz. Oznacza to, że poziom natężenia dźwięku podany w dB może być uważany ze względów fizjologicznych za bezwzględną miarę natężenia. Należy przy tym zdawać sobie sprawę z tego, że dwukrotne powiększenie natężenia I nie podwaja wartości poziomu natężenia L, lecz tylko zwiększa tę wartość o 3 dB.

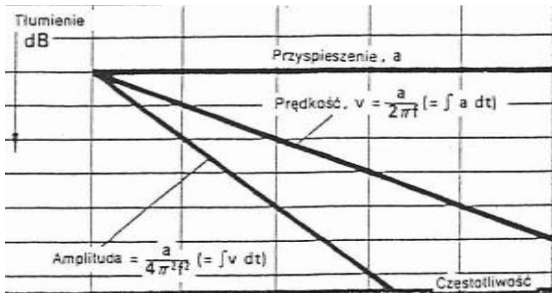
Jak wspomniano, wibracje mierzone są najczęściej za pomocą akcelerometrów. Powszechnie wykorzystywanymi w praktyce, to akcelerometry piezoelektryczne lub pojemnościowe, gdzie bezpośrednią wielkością wyjściową jest przyspieszenie w postaci sygnału elektrycznego, jako jedna z wielkości chrakteryzująca wibracje mechaniczne. Poprzez kolejne całkowanie tego sygnału otrzymuje się kolejne wielkości charakteryzujące wibracje tj.: prędkość oraz przemieszczenie. Zarówno kształt jak i okres wibracji pozostają bez zmian, niezależnie od tego, czy rozpatruje się przemieszczenie, prędkość czy też przyspieszenie. Natomiast jak to wynika z rysunku 4, pomiędzy omawianymi trzema wielkościami istnieje 90-cio stopniowa różnica faz w ich przebiegach amplitudowo-czasowych. Dla przebiegów sinusoidalnych wszystkie trzy wielkości: przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie są ze sobą matematycznie ściśle powiązane w funkcji i czasu. Ta zależność przedstawiona jest na rysunku 5. Ponieważ zwykle przy pomiarach wielkości uśrednionych w czasie znajomość fazy jest nieistotna, zatem łatwo jest otrzymać wartość prędkości poprzez podzielenie sygnału przyspieszenia przez czynnik proporcjonalny do częstotliwości. Wartość

przemieszczenia otrzymuję się zaś dzieląc przyspieszenie przez czynnik proporcjonalny do kwadratu częstotliwości. W przyrządach pomiarowych obliczenia te dokonuje się przy pomocy układów elektronicznych całkujących.

Przykład: urządzenie wibruje sinusoidalnie z częstotliwością 79,6 Hz i z wartością skuteczną (rms) przyspieszenia $10m/s^2$. Zatem jego wartość skuteczna (rms) prędkości jest równa $10/(2\pi \cdot 79{,}6) = 20mm/s$, natomiast wartość skuteczna (rms) przemieszczenia wynosi $10/(4\pi^2 \cdot 79{,}6^2) = 0{,}04mm$.



Rys. 4. Przebiegi przemieszczenia x, prędkości v i przyspieszenia a w ruchu harmonicznym drgającym.



Rys. 5. Powiązanie matematyczne przyspieszenia, prędkości i przemieszczenia.

Parametry wibracji są na ogół mierzone w jednostkach układu metrycznego, zgodnie z zaleceniami ISO. Jednostki te podane są w tabelce poniżej. Stała grawitacyjna „g", chociaż nienależąca do systemu jest w dalszym ciągu powszechnie używana dla określenia poziomów przyspieszenia. Przeliczanie jest jednak bardzo proste, gdyż czynnik przeliczeniowy jest równy 10 (dokładnie 9,81) daje dokładność w granicach 2%.

Jednostki (ISO) 1000	
Przemieszczenie	M, mm, μm
Prędkość	m/s, mm/s, (lub ms^{-1}, mms^{-1})
Przyspieszenie	m/s^2 (lub ms^{-2}) (1g = 9,81 m/s^2)

4. Przetworniki i czujniki do pomiaru dźwięku i wibracji

Pomiaru dźwięku oraz poziomu dźwięku realizuje się za pomocą mikrofonów. Mikrofony pomiarowe można podzielić na trzy grupy: mikrofony swobodnego pola, ciśnieniowe oraz dyfuzyjne (dookólne). Różnice pomiędzy mikrofonami jednej grupy, a drugiej wynikają z ich pracy przy wyższych częstotliwościach, gdzie rozmiar mikrofonu staje się porównywalny z długością fali dźwiękowej dla danej częstotliwości, która jest mierzona. We wszystkich przypadkach, mikrofony omówione poniżej są mikrofonami pojemnościowymi.

Mikrofony ciśnieniowe



Mikrofon ciśnieniowe służą do pomiaru rzeczywistego ciśnienia akustycznego, jakie występuje na powierzchni membrany mikrofonu. Typowym ich zastosowaniem jest pomiar ciśnienia akustycznego w zamkniętym pomieszczeniu lub jak pokazano po prawej stronie, pomiaru ciśnienia akustycznego na granicy powierzchni lub przy ścianie; W takim przypadku mikrofon tworzy część ściany i mierzy ciśnienie dźwięku przy samej ścianie.

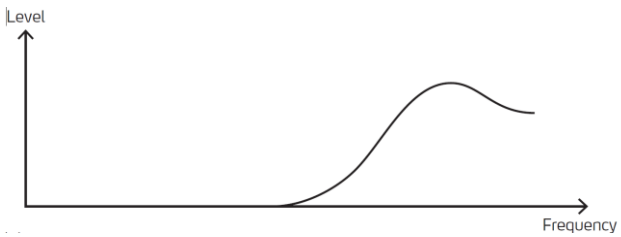
Mikrofony swobodnego pola



Mikrofony swobodnego pola są przeznaczone szczególnie do pomiaru ciśnienia akustycznego, jakie występuje przed mikrofonem, który został umieszczony w polu dźwiękowym. Przy wyższych częstotliwościach obecność samego mikrofonu w polu dźwiękowym zaburza lokalne ciśnienie akustyczne. Na ogół ciśnienie akustyczne wokół mikrofonu wzrasta z powodu odbić i dyfrakcji.

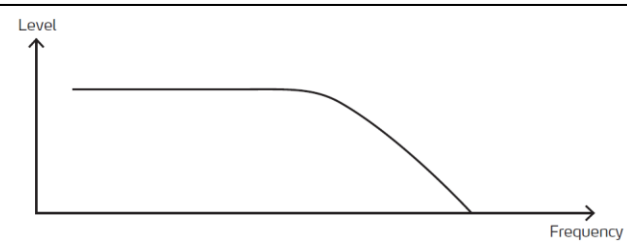
Charakterystyki częstotliwościowe mikrofonu swobodnego pola są tak dobrane, aby zrekompensować ten wzrost ciśnienia; stąd wyjściowy sygnał mikrofonu swobodnego pola jest sygnałem proporcjonalnym do ciśnienia akustycznego, które wystąpiło przed mikrofonem, który został wprowadzony do pola dźwiękowego. Mikrofon pola swobodnego powinien być zawsze skierowany w stronę źródła dźwięku (0° padania), jak to pokazano po prawej stronie na rysunku. W tej sytuacji, obecność membrany mikrofonu w polu dźwiękowym powoduje wzrost ciśnienia w przedniej części membrany w zależności od długości fali dźwięku i średnicy mikrofonu, patrz krzywa (a) obok. Dla typowego ½ mikrofonu, maksimum wzrostu ciśnienia wystąpi przy 26,9 kHz, gdzie długość fali dźwięku (λ) równa się z średnicą mikrofonu tj.:

$$\lambda = \frac{342\ m/s}{26.9\ kHz} \approx 12.7mm = ½"$$

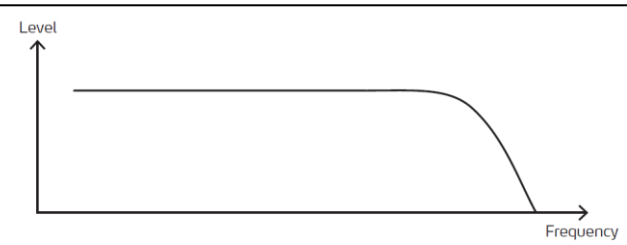


(a) Zwiększenie ciśnienia na membranie mikrofonu swobodnego pola

Wynikiem jest sygnał wyjściowy z mikrofonu, który jest proporcjonalny do ciśnienia akustycznego, jakie występuje przed mikrofonem, który został wprowadzony w pole dźwiękowe, zob. krzywą (c) poniżej. Krzywa (a) powyżej jest także nazywana, jako krzywa swobodnego pola korekcji dla mikrofonu i musi zostać dodana do odpowiedzi częstotliwościowej mikrofonu jak to pokazuje krzywa (b), aby otrzymać charakterystykę mikrofonu swobodnego pola według krzywej (c)



(b) Odpowiedź częstotliwościowa mikrofonu swobodnego pola

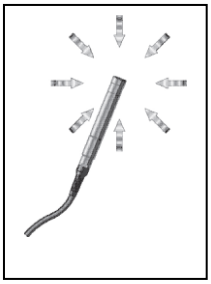


(c) Odpowiedź mikrofonu swobodnego pola

Mikrofony dyfuzyjne (dookólne)

W zasadzie, mikrofon pola swobodnego wymaga, aby był skierowany w stronę źródła dźwięku i aby fale dźwiękowe wędrowały, głównie w jednym kierunku. W niektórych przypadkach, na przykład podczas pomiaru w

komorze pogłosowej lub innych środowiskach silnie odbijających, fale akustyczne nie mają dobrze zdefiniowanego kierunku propagacji, lecz przychodzą one do mikrofonu jednocześnie z różnych kierunków.



Fale dźwiękowe dochodzące do mikrofonu z przodu powodują wzrost ciśnienia, jak opisano powyżej w odniesieniu do mikrofonu swobodnego pola, zatem fale dźwiękowe przychodzące z tyłu mikrofonu będą w pewnym stopniu spowodować spadek ciśnienia z powodu efektu „cienia" powstałego od mikrofonu. Łączny wpływ fal dźwiękowych pochodzących ze wszystkich stron zależy, zatem od tego, jak fale dźwiękowe są rozmieszczone w różnych kierunkach. Dla mikrofonów pomiarowych, standardowy rozkład został określony na podstawie analizy statystycznej; otrzymując znormalizowany mikrofon dyfuzyjny (dookólny).

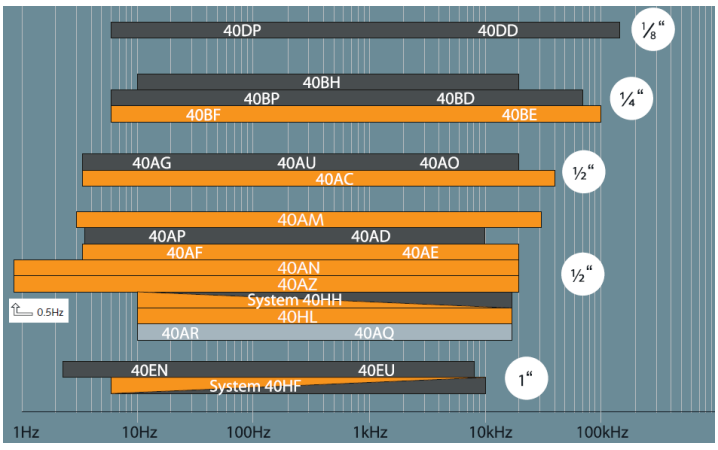
Pasmo częstotliwości mikrofonu

Pasmo mikrofonu jest zdefiniowane, jako przedział między jego górną częstotliwością graniczną i jego dolną częstotliwością graniczną.

Górna granica częstotliwości

Górna częstotliwość graniczna jest związana z rozmiarem mikrofonu lub bardziej precyzyjnie mówiąc – z rozmiarem mikrofonu w porównaniu z długością fali dźwięku. Ponieważ długość fali jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości tak, więc staje się ona coraz krótsza dla wyższych częstotliwości. Stąd też mniejsza średnica mikrofonu może mierzyć wyższe częstotliwości. Z drugiej strony, czułość mikrofonu jest również związana z jego rozmiarem, która wpływa na jego zakres dynamiczny.

Pasma częstotliwości dla różnych mikrofonów firmy G.R.A.S. są przedstawione na poniższym wykresie. Typ lub numer modelu jest pokazany dla każdego mikrofonu. Mikrofony są grupowane w zależności od wielkości średnicy zewnętrznej, tj. 1 ", 1/2", 1/4 "i 1/8".



Pasma częstotliwości dla różnych mikrofonów firmy G.R.A.S.

Dolna granica częstotliwości

Dolna granica częstotliwości mikrofonu jest określona przez jego układ wyrównywania ciśnienia statycznego. Zasadniczo, mikrofon mierzy różnicę między jego ciśnieniem wewnętrznym, a ciśnieniem otoczenia.

Jeśli mikrofon byłby całkowicie szczelny, zmiana ciśnienia atmosferycznego i wysokość spowodowałoby statyczne ugięcie jego membrany, a tym samym zmianę odpowiedzi częstotliwości i czułości.

Aby tego uniknąć, mikrofon jest wytwarzany z kanałem wyrównywania ciśnienia statycznego w celu wyrównania ciśnienia wewnętrznego z ciśnieniem otoczenia. Z drugiej strony, wyrównywanie musi być wystarczająco wolne, aby uniknąć negatywnego wpływu na pomiar sygnałów dynamicznych.

Dynamiczny zakres mikrofonu

Dynamiczny zakres mikrofonu może być zdefiniowany, jako przedział pomiędzy najniższym i najwyższym poziomem, który mikrofon może obsłużyć. Nie jest to tylko samodzielny parametr mikrofonu, ale również zastosowanego przedwzmacniacza z mikrofonem. Dynamiczny zakres mikrofonu jest w dużym stopniu powiązany bezpośrednio z jego czułością.

Ogólnie mówiąc, mikrofon z dużą czułością będzie w stanie zmierzyć bardzo niskie poziomy ciśnienia akustycznego, ale niezbyt wysokie, zaś mikrofon o małej czułości będzie w stanie zmierzyć bardzo wysokie poziomy, lecz bardzo niskich nie.

Czułość mikrofonu jest określona przede wszystkim przez jego rozmiar i jego naprężenia membrany. Ogólnie rzecz biorąc, duży mikrofon z luźną membraną ma wysoką czułość, natomiast małe mikrofon ze sztywną membraną posiada niską czułość.

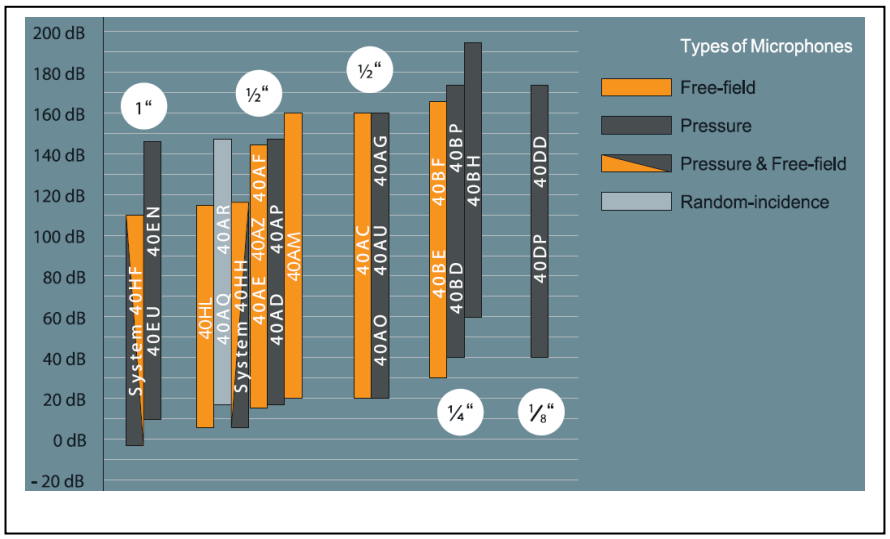
Górna granica zakresu dynamicznego

Najwyższe poziomy ciśnienia akustycznego, które mogą być mierzone są ograniczone przez wielkość przemieszczenia, które pozwalają membranie przed jej zetknięciem się z tylną ścianą mikrofonu.

W miarę jak poziom ciśnienia akustycznego w mikrofonie zwiększa się, ugięcie membrany odpowiednio będzie coraz większe, aż w pewnym momencie membrana uderzy o tylną ścianę wewnątrz korpusu mikrofonu. Jest to końcowy i najwyższy poziom ciśnienia mikrofonu, który można zmierzyć.

W istocie, jak odkształcenie membrany staje się duże, zależność pomiędzy odkształceniem membrany, a zdolnością przetwarzania sygnału mikrofonu staje się nieliniowa i powoduje zniekształcenia sygnału wyjściowego z mikrofonu. Z tego powodu, górną granicę zakresu dynamicznego opisano, jako ten poziom, w którym zniekształcenia dochodzą do 3%. Dynamiczne zakresy różnych G.R.A.S. mikrofonów są pokazane w tabeli poniżej. Typ lub numer modelu jest pokazany dla

każdego mikrofonu. Mikrofony są grupowane w zależności od wielkości średnicy zewnętrznej, tj. 1 ", 1/2", 1/4 "i 1/8".



Dolna granica zakresu dynamicznego

Pobudzenie termiczne cząsteczek powietrza jest wystarczająca dla mikrofonu do wytworzenia bardzo małych sygnałów wyjściowych, nawet w całkowicie spokojnych warunkach. Ten "szum termiczny" leży zwykle na poziomie około 5 μV i zostanie nałożony na każdy akustyczny sygnał wykryty przez mikrofon. W związku z tym, nie ma sygnałów akustycznych poniżej poziomu szumu cieplnego, które można zmierzyć. Ten 5 μV sygnał wyjściowy odpowiada pewnemu "pozornemu" poziomu ciśnienia akustycznego, który może być obliczony z czułości mikrofonu. Dla mikrofonu o czułości 50 mV / Pa, odpowiadałoby to pozornemu ciśnieniu dźwięku:

$$\frac{5\mu V}{50mV/Pa} = 0{,}0001Pa$$, tj. innymi słowy wokół 14 dB re. 20 μPa;

Podobnie, dla mikrofonu o czułości 4 mV/Pa, odpowiadałby to pozornemu ciśnieniu dźwięku:

$$\frac{5\mu V}{4mV/Pa} = 0{,}00125Pa$$, tj. innymi słowy wokół 36 dB re. 20 μPa;

Dlatego, mikrofon o czułości 50 mV / Pa może mierzyć do ok. 14 dB, natomiast mikrofon o czułości 4 mV / Pa jest stanie zmierzyć tylko do ok. 36 dB. W praktyce, mikrofon musi być podłączony do wzmacniacza wstępnego o wysokiej impedancji, w celu wzmocnienia bardzo słabych sygnałów wyjściowych z mikrofonu. Przedwzmacniacz ma również pewien poziom szumów, które będą dodawać się do szumu cieplnego wytwarzanego przez mikrofon.

Czułość mikrofonu

Czułość jest stosunkiem sygnału wyjściowego do mierzonego ciśnienia wejściowego, który jest kluczowym parametrem każdego mikrofonu. Odwzorowywanie jednostek w dziedzinie akustycznej na jednostki w dziedzinie elektrycznej określa wielkość wyjściowego sygnału mikrofonu, gdy znana jest wartość sygnału wejściowego.

Czułość mikrofonu jest zazwyczaj mierzona przy użyciu fali sinusoidalnej 1 kHz przy poziomie ciśnienia akustycznego (SPL) 94 dB lub ciśnienia 1 Pascala (Pa). Wielkość sygnału wyjściowego otrzymanego z mikrofonu, przy zadanym sygnale wejściowym jest miarą jego czułości.

Czułość mikrofonu analogowego jest prostym i łatwym parametrem do zrozumienia. Zwykle określany w logarytmicznych jednostkach dBV decybelach (w odniesieniu do 1 V), mówi ile „woltów" sygnału wyjściowego przypadnie dla danego poziomu ciśnienia akustycznego, tj. SPL (*Sound Pressure Level*). Dla mikrofonu, czułość jest wyrażana w jednostkach liniowych mV/Pa i można wyrazić logarytmicznie w decybelach w postaci poniższego wzoru:

$$Sensitivity_{dBV} = 20 \times \log_{10}\left(\frac{Sensitivity_{mV/Pa}}{Output_{AREF}}\right)$$

gdzie: $Output_{AREF}$ to 1000 mV/Pa (1V/Pa) stosunek wyjścia odniesienia.

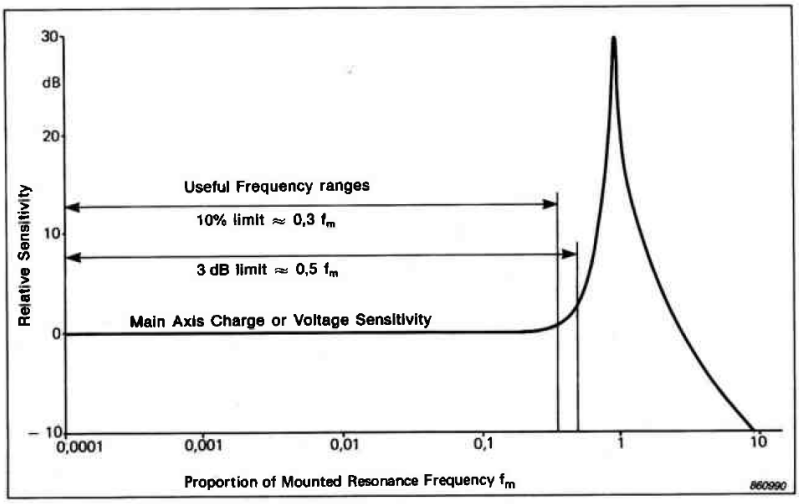
Z kolej pomiaru wibracji mechanicznych dokonuje się akcelerometrami, sondami zbliżeniowymi, sondami pojemnościowymi, piezorezystancyjnymi przetwornikami, czy też laserami. Najczęściej wykorzystywanymi do pomiaru drgań są akcelerometry piezoelektryczne, jako powszechnie dostępne przetworniki bezwzględnego pomiaru drgań. Zastosowanie tych przetworników jest bezpośrednim wynikiem ich właściwości:

1. Użytkowe o bardzo szerokim paśmie częstotliwości.
2. Doskonała liniowość w bardzo szerokim zakresie dynamiki.
3. Przyspieszenie może być całkowalnym sygnałem zapewnianiającym informację o prędkości i przemieszczeniu.
4. Pomiar wibracji jest możliwy w szerokim zakresie warunków środowiskowych, zachowując doskonałą dokładność.
5. Nie jest wymagane zewnętrzne zasilanie.
6. Brak ruchomych części, więc jest bardzo trwały.
7. Niezwykle kompaktowy oraz wysoka czułość w stosunku do masy.

Pasmo częstotliwości akcelerometru piezoelektrycznego

Względna zmiana wyjściowego sygnału elektrycznego z akcelerometru jest pokazana na rys 7. Krzywa odpowiedzi częstotliwościowej tego rodzaju przetwornika wykazuje zmienność w elektrycznym sygnale wyjściowym akcelerometru, kiedy jest wzbudzany przez stały poziom wibracji poza

szerokim paśmie częstotliwości. W celu uzyskania takiej krzywej odpowiedzi częstotliwościowej akcelerometr jest zamontowany na 180g głowicy wzbudnicy. Stąd przybliżenie częstotliwości rezonansowej może zostać znalezione dla zamontowanego akcelerometru. Ta krzywa pasma przenoszenia jest związana z równaniem (14):



Rys. 5. Względna czułość akcelerometru w funkcji częstotliwości.

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^2} \tag{14}$$

Równanie 14 może być użyte do obliczeń odchylenia pomiędzy mierzoną a rzeczywistą wibracją dla każdej częstotliwości i określone użyteczne pasmo częstotliwości.

Czułość akcelerometru piezoelektrycznego

Piezoelektryczne akcelerometry można uznać albo, jako źródło ładunku, albo źródło napięcia o wysokiej impedancji. W związku z tym, czułość ładunkowa oraz czułość napięciowa są używane do opisania relacji między przyspieszeniem, a sygnałem wyjściowym akcelerometru. Obie wartości są mierzone przy częstotliwości 60 lub 80 Hz, w temperaturze pokojowej. Ogólna dokładność tej kalibracji wynosi 1,8% i obowiązuje w następujących warunkach: f = 80 Hz, T = 21 ° C = 10 m / s ², C_{cable} = 150 pF, I_{CONST} = 4 mA. Stwierdza się ponadto, że dokładność nie należy mylić z tolerancją czułości nominalnej, która jest określona dla niektórych akcelerometrów. Model akcelerometru KS80, na przykład, ma tolerancję czułości ± 5%. Czułość ładunkowa zmniejsza się nieznacznie wraz ze wzrostem częstotliwości. Spada ona o 2% na dekadę. Przed opuszczeniem taśmy produkcyjnej, każdy akcelerometr poddawany jest gruntownemu procesowi kalibracji. Niemniej jednak, naturalne starzenie się przetworników wpływa na pogorszenie ich czułości, zatem wymagane jest

ponowne ich skalibrowanie. Typowe rozbieżności wynoszą -3% w ciągu 3 lat. Jeśli wymagana jest duża dokładność, to ponowna kalibracja powinna być przeprowadzona.

Program ćwiczenia

1. Na pulpicie znajdują się dwa programy o podobnej nazwie do pomiaru dźwięku i wibracji. Należy uruchomić program o nazwie **Vibration&Sound(Simulate)**, który jest wersją symulacyjną. Po uruchomieniu programu należy następnie postępować wg poniższych podpunktów:
   a) z menu *signal type* należy wybrać przebiegi czasowe podane przez prowadzącego dla ustawień amplitudy: 0,5V; 1,0V oraz częstotliwości: 500Hz; 1kHz; 5kHz; 10kHz, a następnie zaobserwować ich przebiegi na diagramie *Time Waveform*, natomiast ich spektrum na diagramach *FFT(Magnitude), STFT Spectrum*. Dla przebiegów okresowych odczytać ich parametry (tj. wartość maksymalną i skuteczną amplitudy, częstotliwość oraz okres) na diagramie *Time Waveform*. Z kolei z diagramu *FFT(Magnitude)* i *STFT Spectrum* odczytać wartości amplitudy oraz częstotliwości harmonicznych zawartych dla danego przebiegu okresowego w paśmie częstotliwości od 20Hz do 20kHz. Zwrócić szczególną uwagę na jednostki mierzonych wielkości wibroakustycznych. W zależności, czy pomiar jest realizowany za pomocą mikrofonu ciśnieniowego (typ 40PH) lub akcelerometru (typ ICP 603C01) należy wybrać odpowiednią jednostkę wielkości mierzonej. (W celu zwiększenia czytelności diagramów, należy wyregulować je za pomocą opcji zawartych w zakładkach *Baseband, Zoom, Subset* lub użyć pokręteł *Frequency Range*, *Time Range*, *Amplitude Range*).
   b) Poszczególne przebiegi należy zapisać do pliku graficznego pod odpowiednią nazwą danego przebiegu. Klikając prawym przyciskiem na okno diagramu należy wybrać z menu kontekstowego opcję *Export,* a następnie wybrać opcję *Export Simplified Image*. Zapis wykonać dla wszystkich trzech diagramów (tj. *FFT(Magnitude), Time Waveform, STFT Spectrum*).
2. Należy przejść do drugiej wersji programu, za pomocą którego będzie możliwy pomiar rzeczywistych parametrów wibroakustycznych dla dwóch badanych obiektów: klatkowego silnika trójfazowego oraz autotransformatora. W tym celu należy uruchomić program o nazwie **Vibration&Sound(DAQmx)**. Posiadając już umiejętności obsługi programu nabyte z wersji symulacyjnej należy wykonać czynności wg poniższych podpunktów
   a) Dla silnika trójfazowego wykonać pomiar wibracji mechanicznych za pomocą akcelerometru piezoelektrycznego (typ ICP 603C01).

W tym celu należy wybrać właściwe wejście pomiarowe, pod które jest podłączony akcelerometr piezoelektryczny tj.: *„cDAQ1Mod1/ai1”*, a następnie wybrać odpowiednią jednostkę wielkości mierzonej za pomocą akcelerometru. Podczas uruchomienia programu dla wybranego wejścia pomiarowego pojawi się okno dialogowe o nazwie *„DSA Device Detected: NI 9234*”, w którym należy ustawić wartość prądu polaryzującego przetwornik na 2mA oraz zaznaczyć opcję *„Enable IEPE*”. Pozostałe parametry konfiguracyjne pozostawić bez zmian i zamknąć okno za pomocą, zatwierdzając przyciskiem OK. Program jest gotowy do pomiaru wibracji mechanicznych.

b) Po włączeniu silnika trójfazowego, zaobserwować na diagramie *Time Waveform* przebieg czasowy drgań i wyznaczyć uśrednioną amplitudę drgań. Następnie, należy przejść do diagramów, wyświetlające spektrum wibracji mechanicznych tj.: *FFT(Magnitude)* oraz *STFT Spectrum*. Odczytać poszczególne wartości amplitud oraz częstotliwości występujących harmonicznych w brzegu wibracji. Wykonać zapis do pliku graficznego poszczególnych diagramów. (W celu zwiększenia czytelności diagramów, należy wyregulować je za pomocą opcji zawartych w zakładkach *Baseband, Zoom, Subset* lub użyć pokręteł *Frequency Range*, *Time Range*, *Amplitude Range*).
c) Dla silnika trójfazowego wykonać pomiar dźwięków, wytwarzane przez wibracje za pomocą mikrofonu ciśnieniowego (typ typ 40PH G.R.A.S). W tym celu należy wybrać właściwe wejście pomiarowe, pod które jest podłączony akcelerometr piezoelektryczny tj.: *„cDAQ1Mod1/ai0”*, a następnie wybrać odpowiednią jednostkę wielkości mierzonej za pomocą mikrofonu. Następnie postępować jak w podpunkcie a) i b).
d) Kolejnym obiektem badań jest autotransformator, do którego należy zamocować akcelerometr piezoelektryczny i podobnie postępować wg podpunktów a) i b)