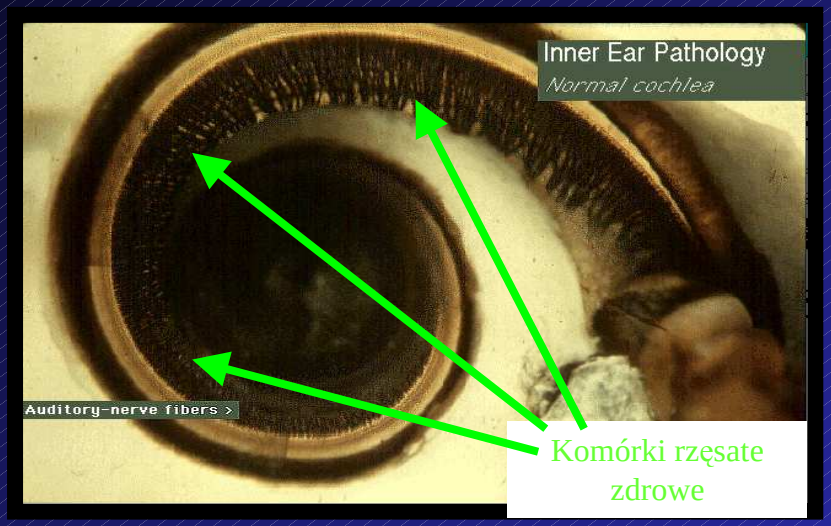
Ochrona przeciwdźwiękowa

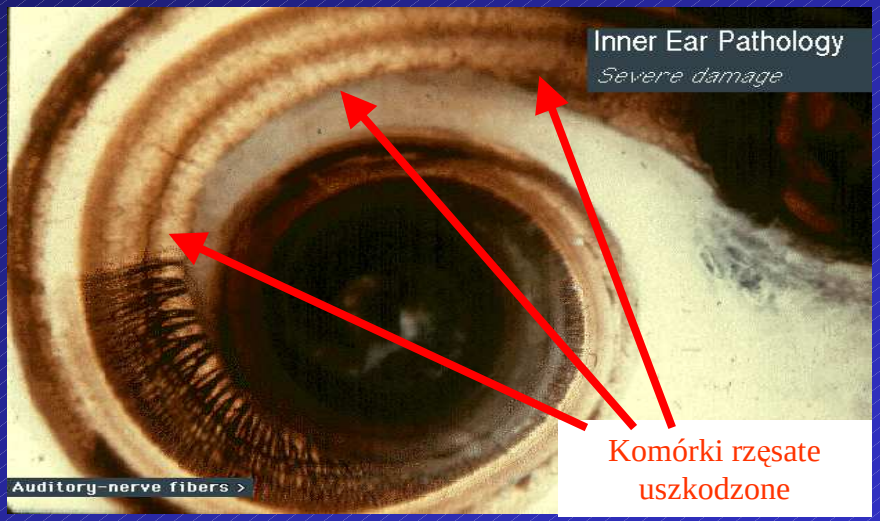
(wykład 3)

Józef Kotus

Ustawy, normy, rozporządzenia międzynarodowe.
Wskaźniki hałasu.

Metody pomiarowe. Przyrządy pomiarowe.





Jaka to częstotliwość?

Ustawy, normy, rozporządzenia międzynarodowe

Realizacja Dyrektywy 2002/49/WE

Implementacja przepisów

Realizacja Dyrektywy 2002/49/WE

Stan prac

Wyszczególnienie wskaźników ze względu na czynniki lokalizacyjne miasta, wielkość populacji zamieszkałej, stopień rozwoju aglomeracji miejskich:

Uśrednione poziomy hałasu oraz wskaźniki stopnia naruszenia klimatu akustycznego w miastach wyznacza się dokonując się uśrednienia stanu klimatu akustycznego na całym analizowanym (badanym) obszarze, niwelując charakterystyczne, lokalne zróżnicowanie. Z tego względu **wskaźniki powyższe mają znaczenie dla ogólnych porównawczych ocen kształtowania się klimatu akustycznego, w skali całych miast**. Natomiast operowanie omawianymi wskaźnikami w stosunku do jednego obszaru nie przynosi użytecznej informacji, rozpatrując zagadnienie w kategoriach operacyjnych.

Wyszczególnienie wskaźników ze względu na hałas drogowy i kolejowy:

Wskaźniki stosowane do oceny hałasów komunikacyjnych **(drogowych, kolejowych)** są oparte na wielkościach statystycznych i ekwiwalentnych poziomów ciśnienia akustycznego lub poziomów dźwięku (hałasu) określanych w dB(A).

Przy czym wielkości statystyczne mające znaczenie przy wyznaczaniu tych wskaźników możemy zdefiniować następująco:

- **poziom statystyczny**
- **poziom statystyczny średni**
- **poziom statystyczny quasimaksymalny**
- **poziom statystyczny tła**

Wyszczególnienie wskaźników ze względu na hałas lotniczy:

Wskaźniki stosowane do oceny uciążliwości hałasu lotniczego ujęte w zaleceniach ISO to:

- ***odczuwalny poziom hałasu*** L_{PN} **(Perceived Noise Level)**
- ***efektywny poziom hałasu*** L_{EPN} **(Effective Perceived Noise Level)**

Wyżej wymienione wskaźniki przyjęte zostały jako obowiązujące przez **Międzynarodową Organizację Lotnictwa Cywilnego (International Civil Aviaton Organization — ICAO)** w Aneksie 16 do konwencji z Chicago oraz w za-leceniach **RWPG** dotyczących oceny uciążliwości hałasów lotniczych.

Są to dwa najważniejsze wskaźniki jeżeli chodzi o hałas lotniczy, wiele pokrewnych wskaźników w tej dziedzinie bazuje na nich.

Przykładowo: **wskaźnik ogólnej ekspozycji na hałas lotniczy** L_E wykorzystuje poprzednio przedstawiony **efektywny poziom hałasu** $\mathbf{L_{EPN}}$

Wyszczególnienie wskaźników ze względu na hałas w pomieszczeniach:

Źródłami hałasu w pomieszczeniach są :

działanie człowieka (odgłosy powodowane przez poruszających się ludzi, rozmowy telefoniczne itp.)

urządzenia biurowe (np. komputery, kopiarki, drukarki, faksy, telefony)

instalacje w budynku (np. instalacje wentylacyjne, grzewcze, klimatyzacyjne, hydrauliczne i dźwigowe)

dźwięki z zewnątrz (np. odgłosy sąsiednich placów budowy, pracujących zakładów przemysłowych, pociągów, samolotów czy ruchu ulicznego, który uważany jest za najbardziej powszechne źródło hałasu zewnętrznego).

Wskaźniki hałasu

Wskaźniki hałasu

Poziom równoważny $L_{Aeq} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{N}\cdot\sum_{i=1}^{N} 10^{0,1\cdot L_{AdBi}}\right)$

$L_d - L_{Aeq}$ pora dzienna $L_d = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{N}\cdot\sum_{>7}^{19} 10^{0,1\cdot L_i}\right)$

$L_e - L_{Aeq}$ pora wieczorna $L_e = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{N}\cdot\sum_{>19}^{23} 10^{0,1\cdot L_i}\right)$

$L_n - L_{Aeq}$ pora nocna $L_n = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{N}\cdot\sum_{>23}^{7} 10^{0,1\cdot L_i}\right)$

Wskaźnik dzień-wieczór-noc wprowadzony na mocy dyrektywy 2002/49/EC

(uśredniony za okres całego roku)

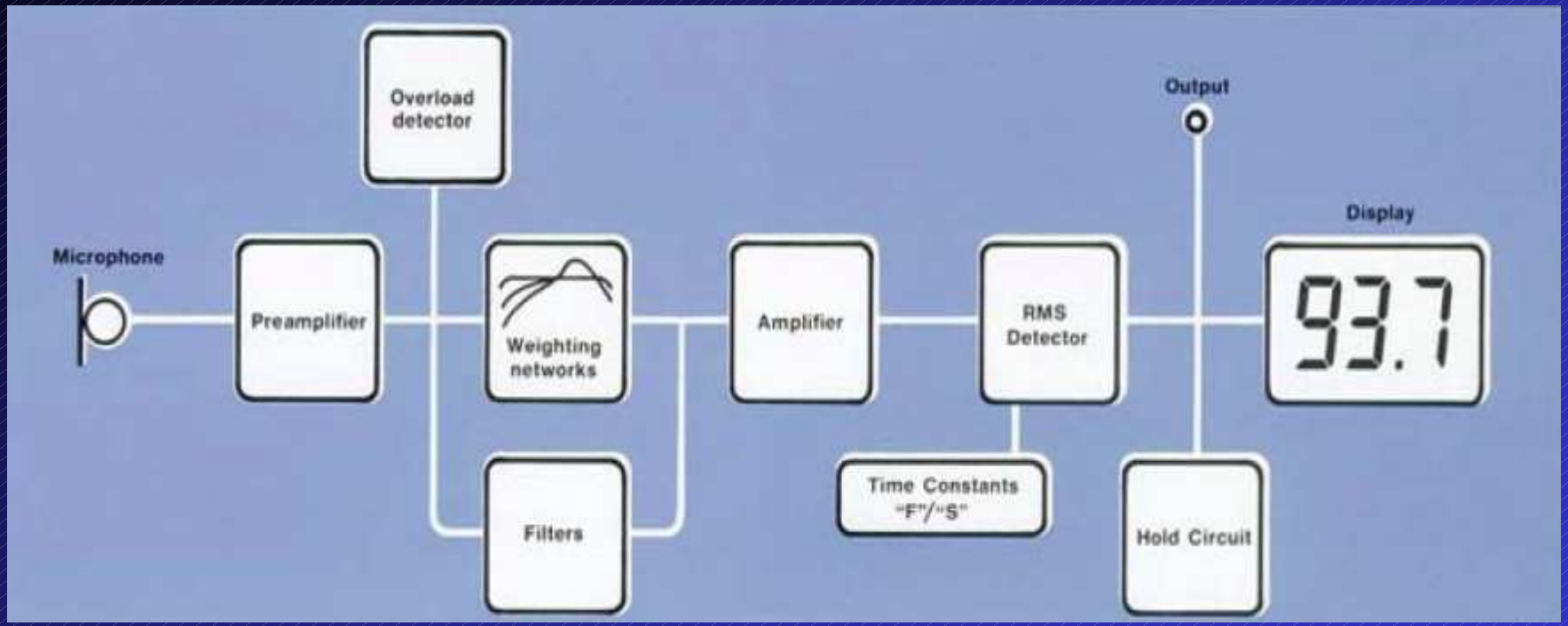
$$L_{den} = 10 \cdot \log\left[\frac{1}{24}\cdot\left(12\cdot 10^{0,1\cdot L_d} + 4\cdot 10^{0,1\cdot(L_e+5)} + 8\cdot 10^{0,1\cdot(L_n+10)}\right)\right]$$

Gdzie:

N – całkowita liczba próbek pomiarowych poziomu dźwięku skorygowanego krzywą A,

L_i – próbka pomiarowa poziomu dźwięku skorygowanego krzywą A,

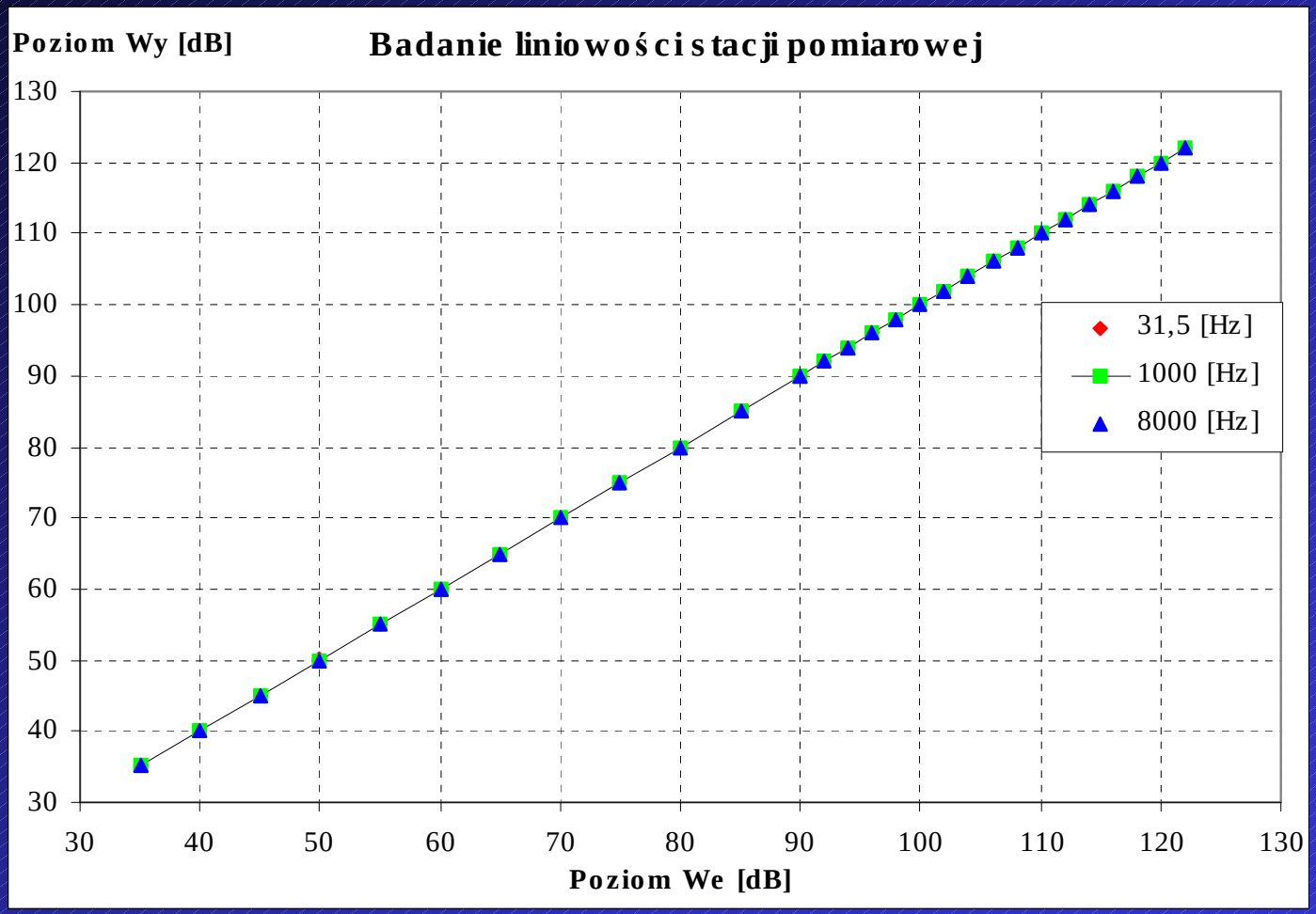
Przyrządy pomiarowe



Wymagania

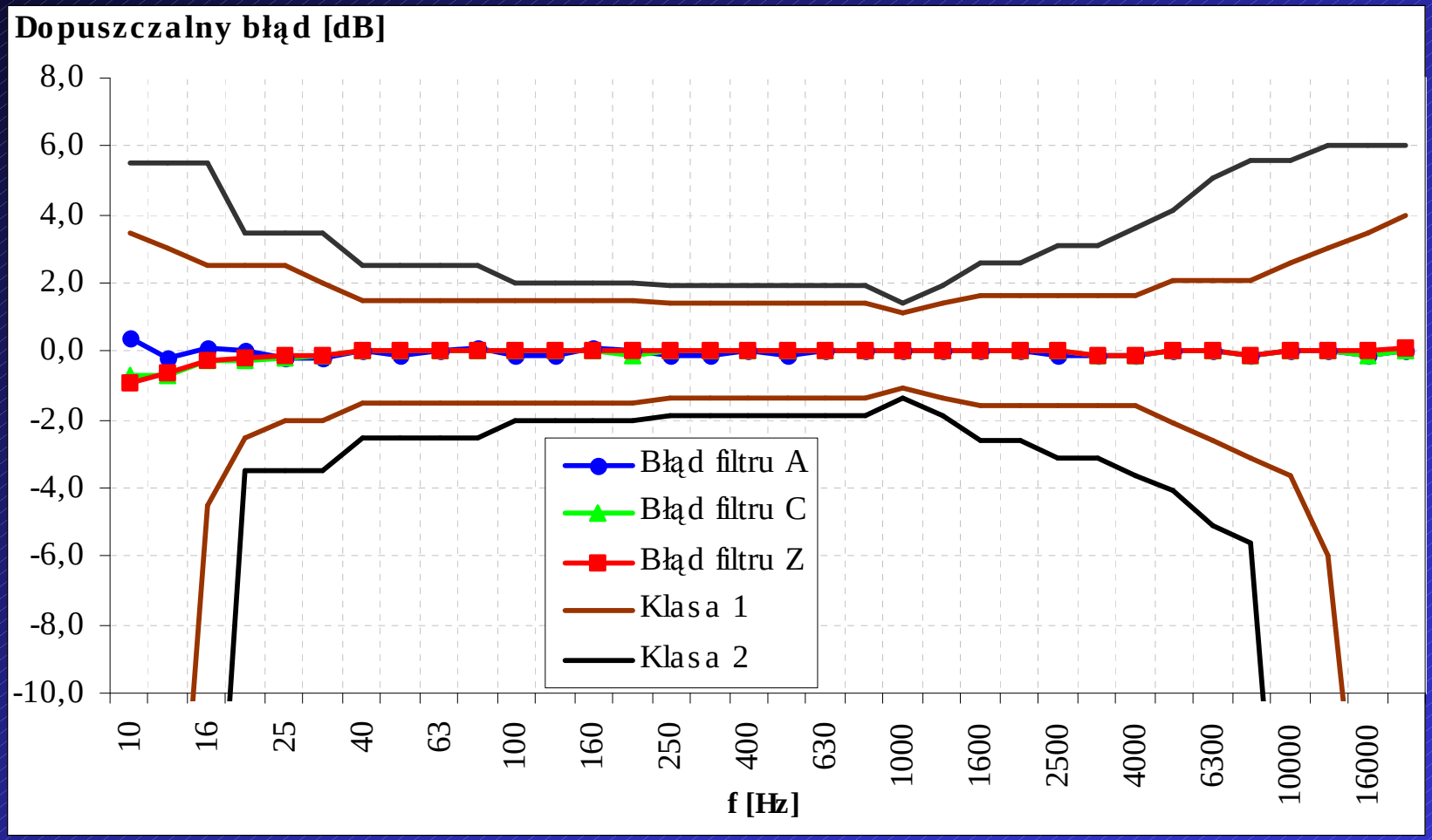
Parametry Stacji

Badanie liniowości



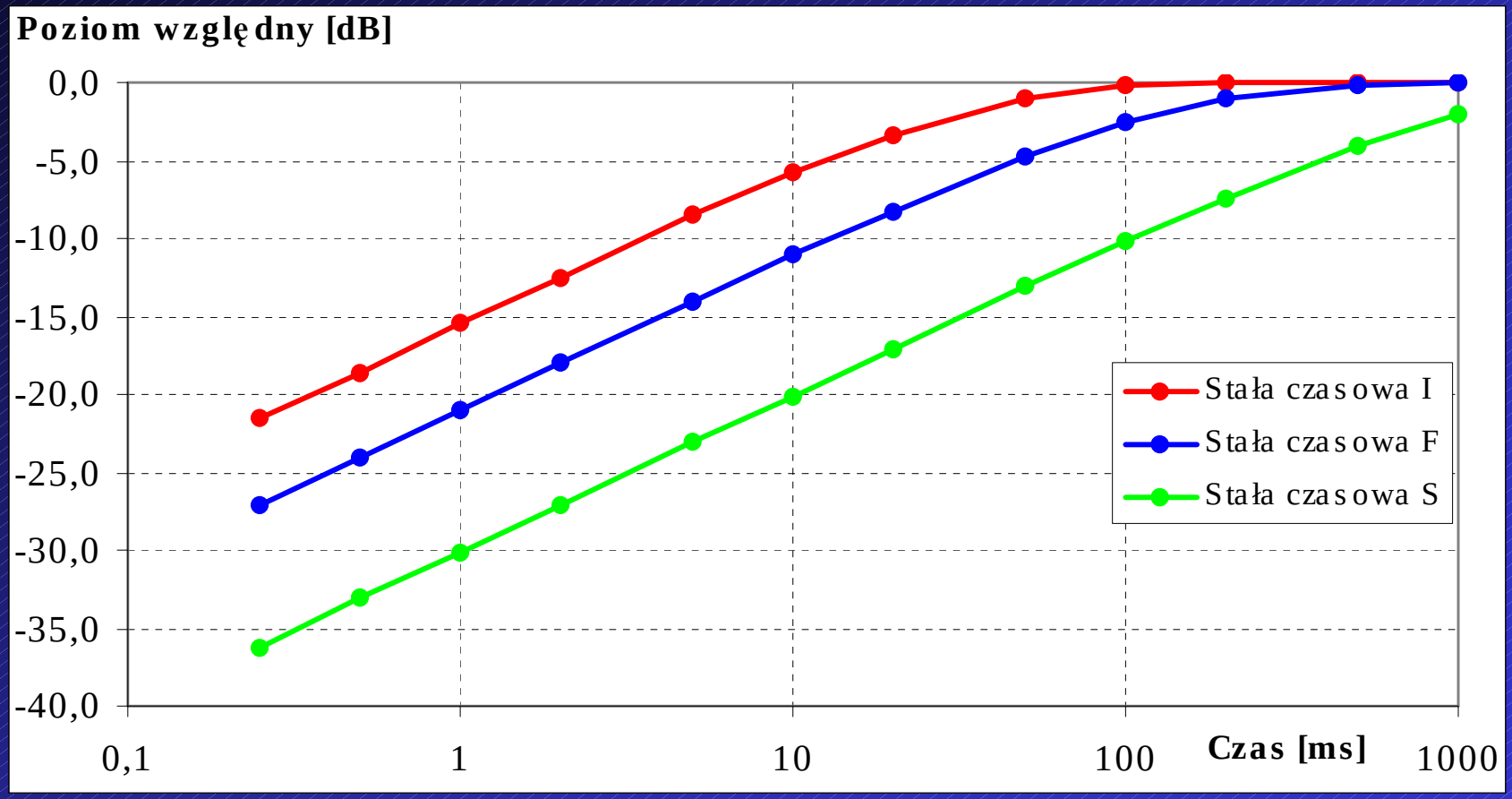
Parametry Stacji

Badanie krzywych korekcyjnych A/C/Z



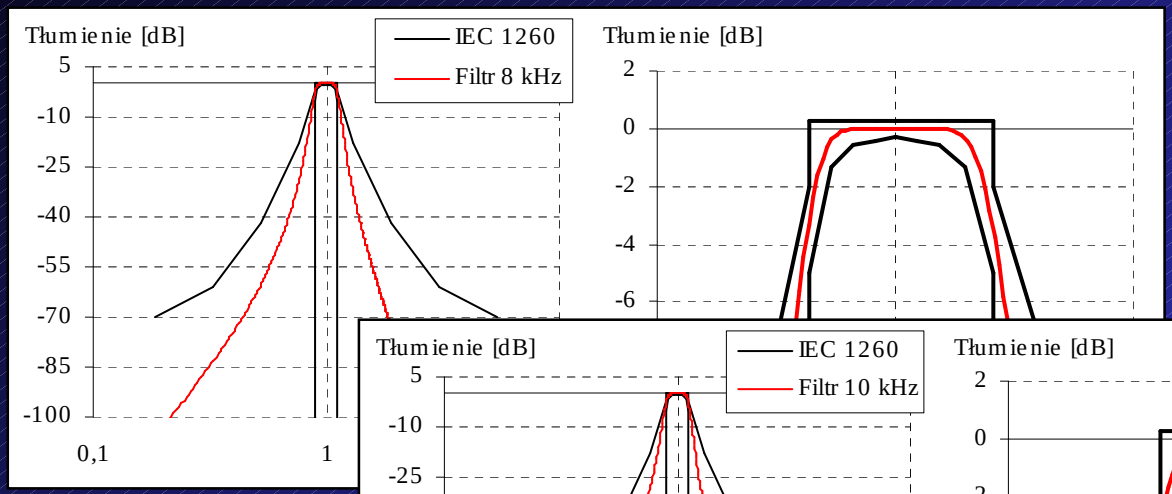
Parametry Stacji

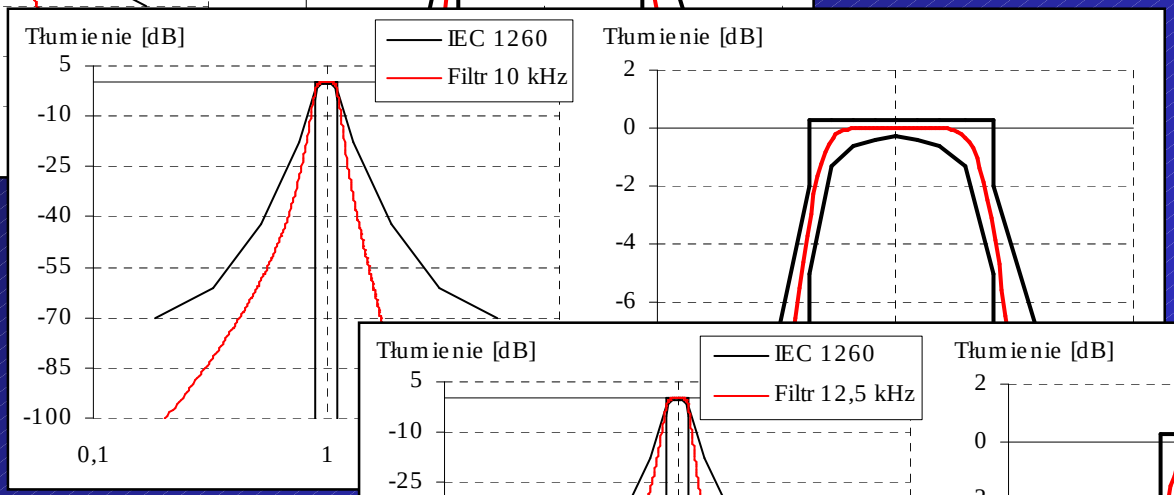
Badanie detektorów RMS dla różnych stałych czasowych

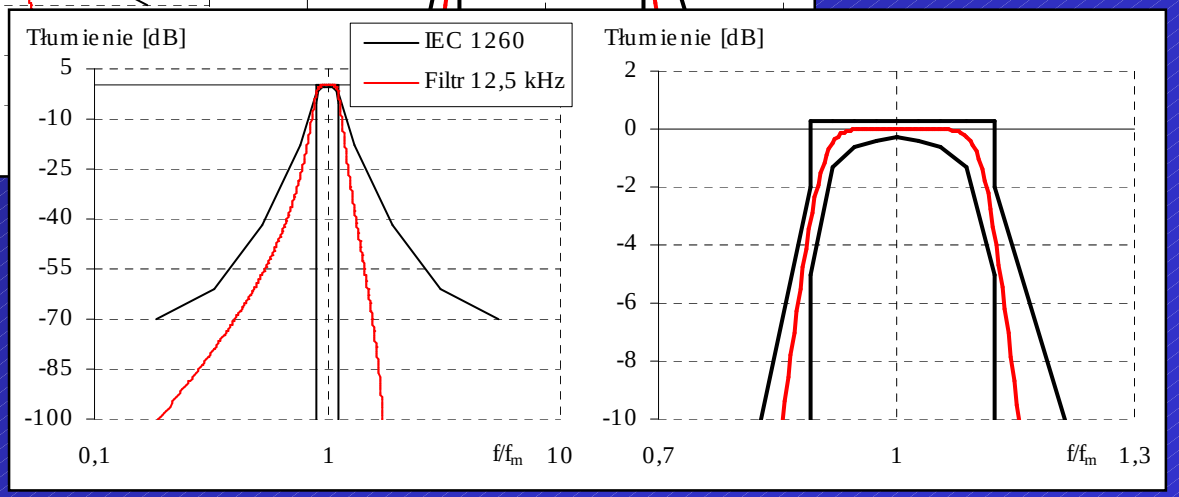


Parametry Stacji

Badanie zgodności filtrów tercjowych z normą IEC 1260

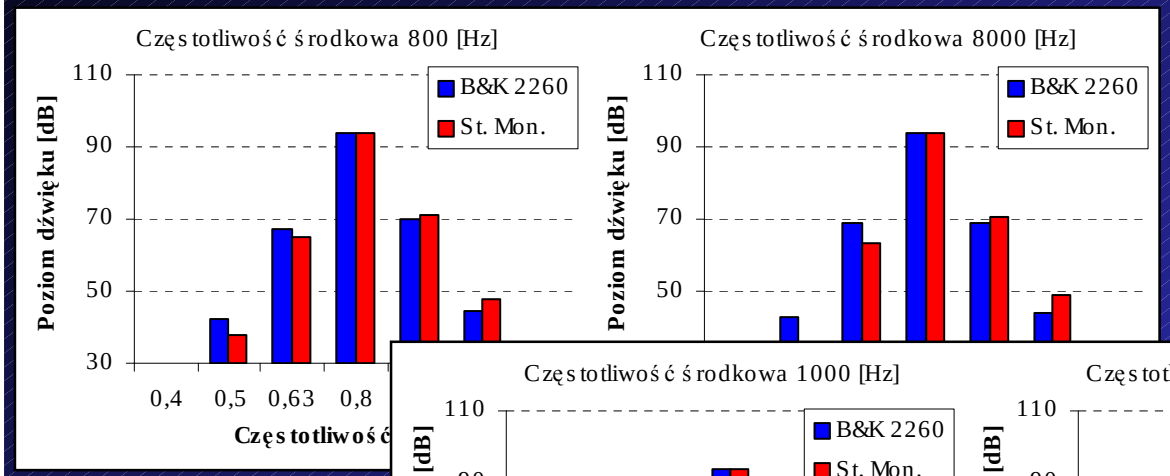


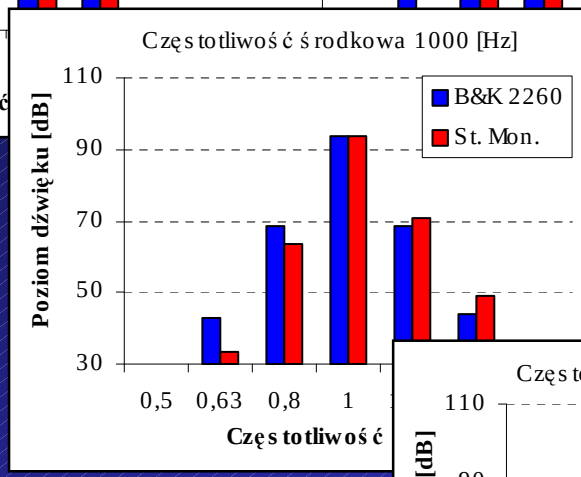


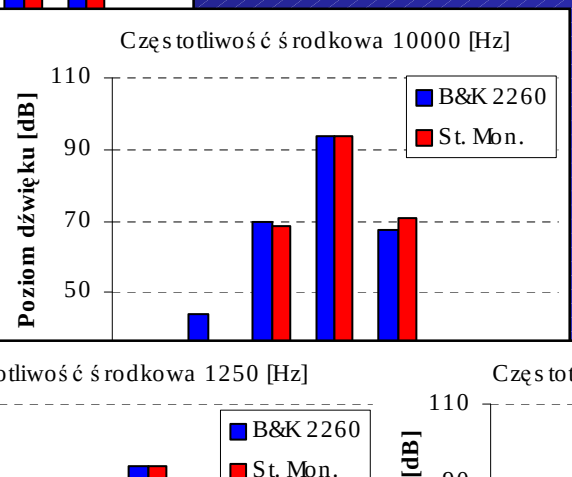


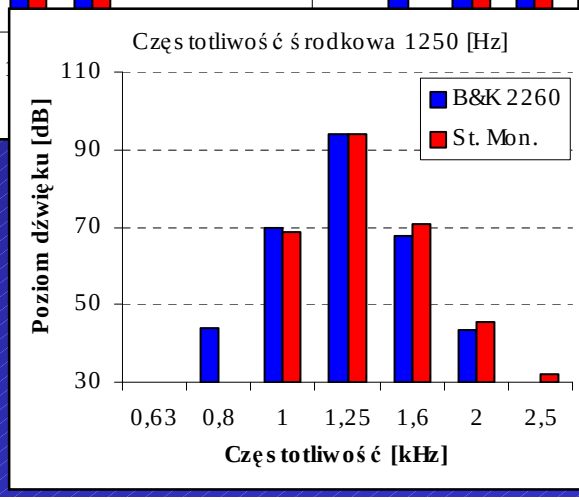
Parametry Stacji

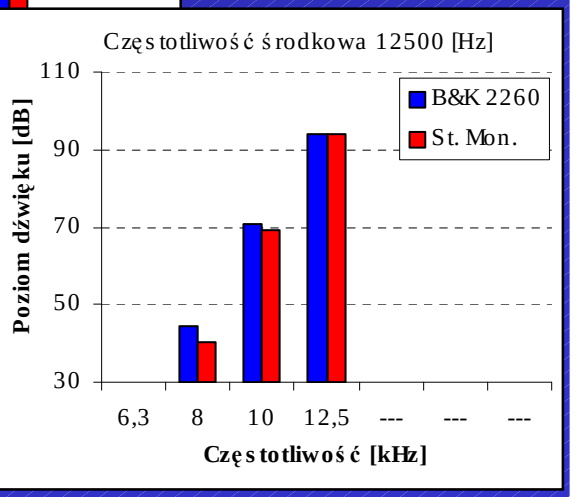
Badanie porównawcze z analizatorem B&K 2260









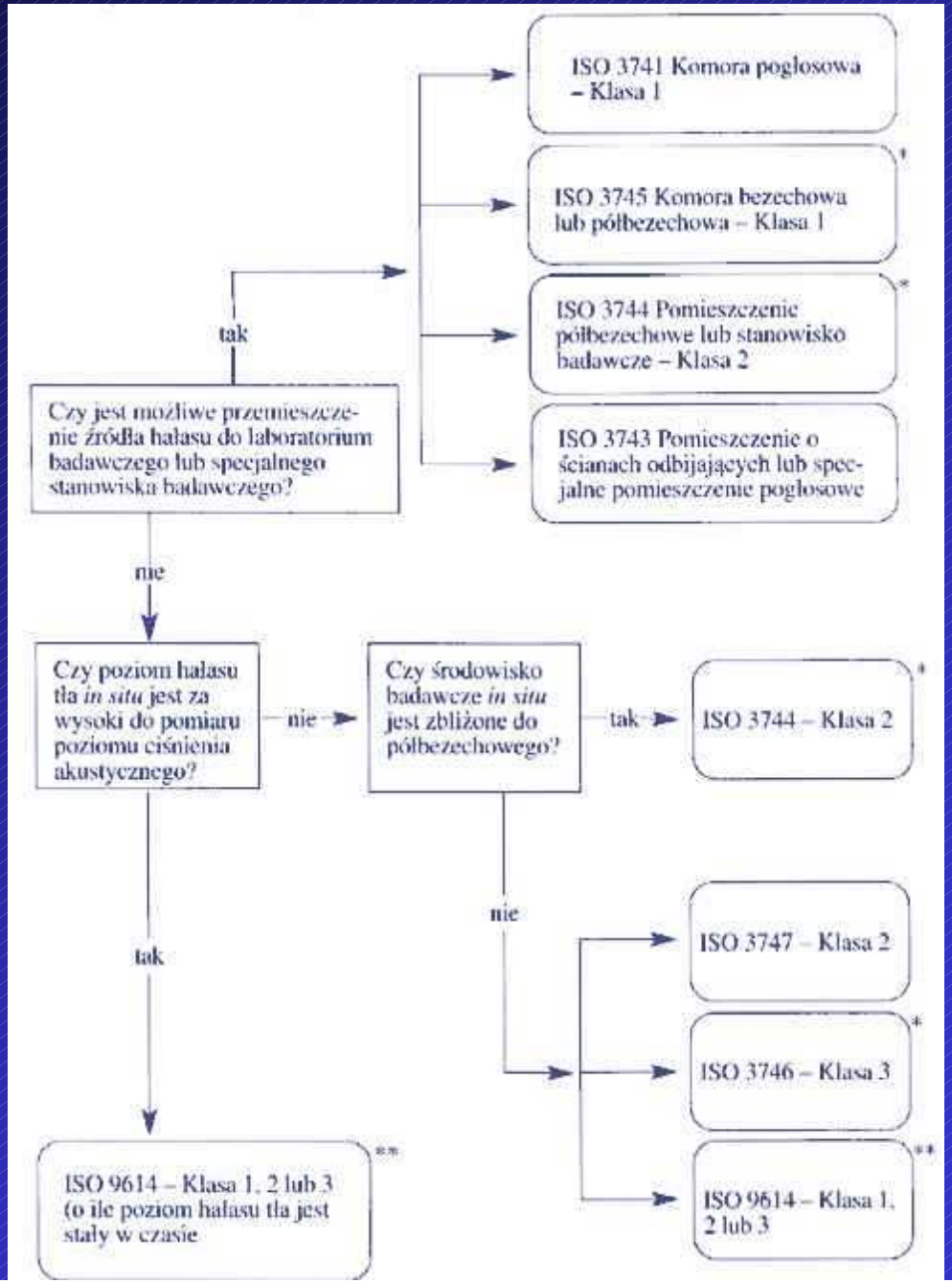


Niepewność pomiaru

Przykład

Wybór normy

- **Klasa 1**
  laboratoryjna,
  najbardziej dokładna
- **Klasa 2**
  techniczna,
  klasa pośrednia
- **Klasa 3**
  orientacyjna,
  najmniej dokładna



Przegląd norm

- **EN ISO 9614-1** (klasa 1, 2 lub 3)

  „Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów natężenia dźwięku. Metoda stałych punktów pomiarowych.”

- **EN ISO 9614-2** (klasa 2 lub 3)

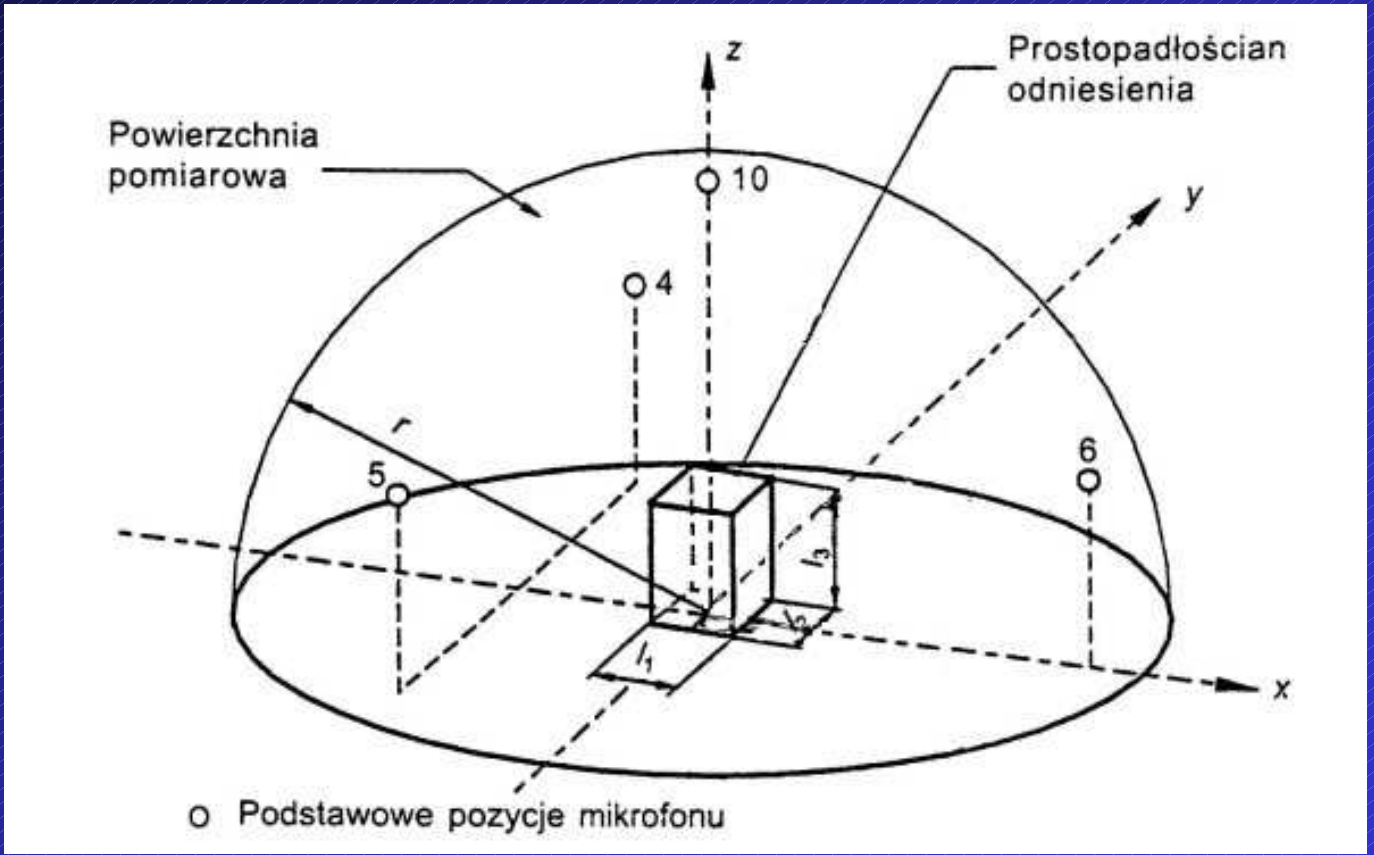
  „Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów natężenia dźwięku. Metoda omiatania.”

- **PN - EN ISO 3744** (klasa 2)

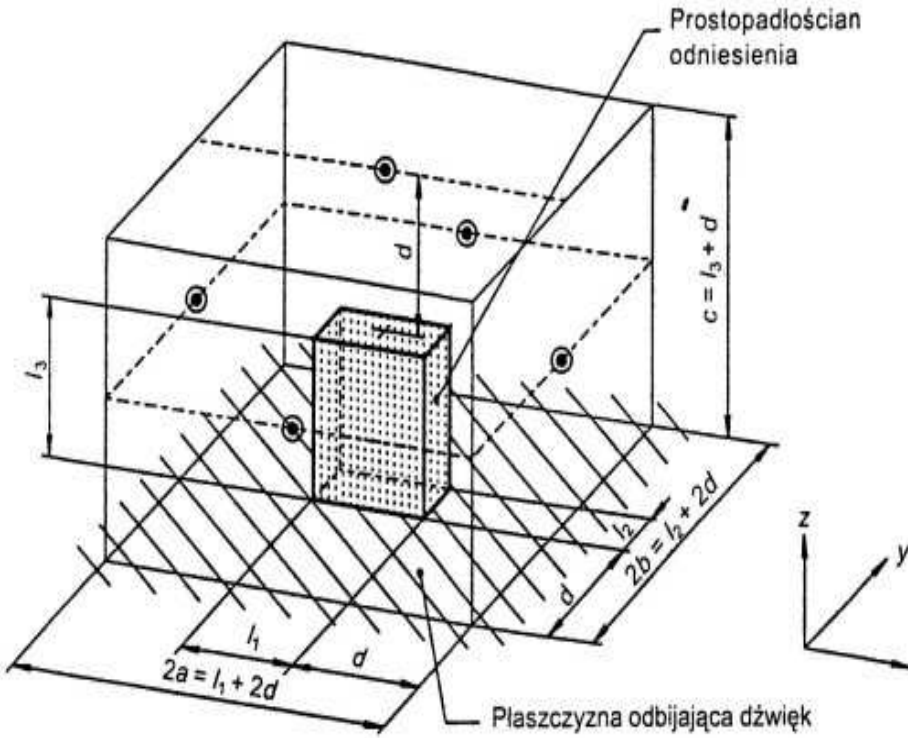
  „Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego. Metoda techniczna stosowana w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk.”

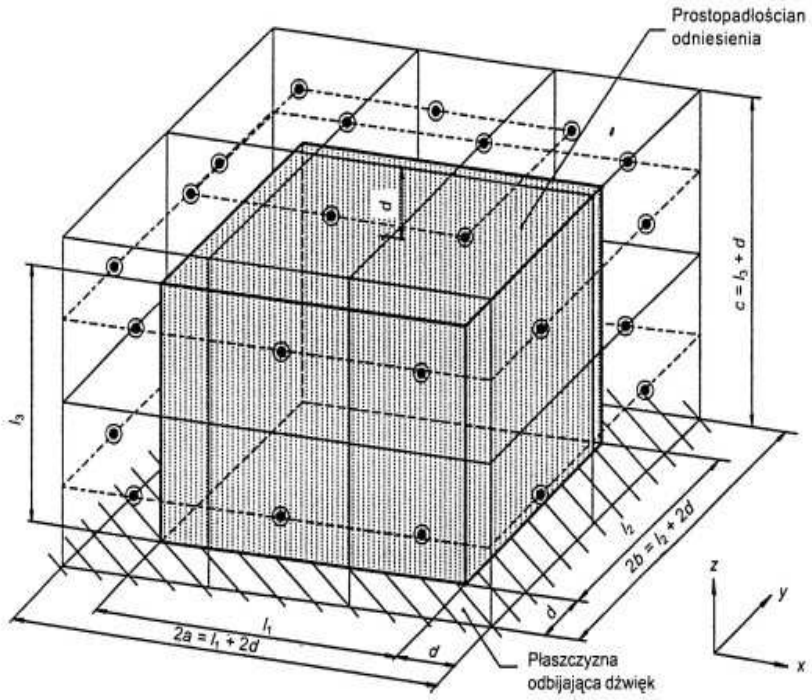
Norma PN-EN ISO 3746

„Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego. Metoda orientacyjna z zastosowaniem otaczającej powierzchni pomiarowej nad płaszczyzną odbijającą dźwięk.”



Norma PN-EN ISO 3746





Pytania?

13th Noise Contol ‘04

Ochrona przed hałasem w środowisku

Stan zagadnienia w roku przystąpienia Polski do Unii Europejskiej

6 – 9 czerwiec 2004
Gdynia

prof. dr hab. inż. Zbigniew Witold Engel, dr inż. Wiktor Marek Zawieska

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

WIELOLETNIE POLSKIE TRADYCJE

Pomiary akustyczne hałasu w środowisku
(rok 1933; Warszawa, Kraków, Wilno, Lwów)

- ⇨ prof. Marek KWIEK
- ⇨ prof. Ignacy MALECKI
- ⇨ prof. Stefan CZARNECKI
- ⇨ doc. Czesław PUZYNA
- ⇨ prof. Jerzy SADOWSKI
- ⇨ wielu innych

UNIA EUROPEJSKA

Ochrona przed hałasem i wibracjami jest przedmiotem zainteresowań kilku komisji:

- ✓ budownictwa
- ✓ ochrony pracy
- ✓ ochrony środowiska

DYREKTYWY

wydawane na podstawie **Art. 100a i 118a Traktatu Rzymskiego**

Dyrektywy ustalają wymagania podstawowe

V PROGRAM OCHRONY ŚRODOWISKA

1 luty 1993 r. – Komisja Europejska uznała, że HAŁAS jest ważnym problemem w środowisku urbanistycznym

Green Paper „Future Noise Policy"

Przyszła Polityka Hałasowa – Zielony Dokument Komisji Europejskiej Bruksela 4 listopada 1996 r.

Jest to pierwszy krok mający na celu podjęcie dyskusji i opracowanie programu polityki hałasowej

ZIELONY DOKUMENT „PRZYSZŁA POLITYKA HAŁASOWA"

Future Noise Policy – Europan Commission Green Paper, COM (96)540

HAŁAS w środowisku jest głównym zagrożeniem (20 % populacji Unii Europejskiej tj. około 80 mln. dotyka problem hałasu)

Stworzenie nowej polityki hałasowej

Pola działania

- ⇨ Wymiana informacji
- ⇨ Wspólne metody oceny, monitorowania
- ⇨ Zwalczanie źródeł

DYREKTYWA 2002/49/WE

PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO

oraz RADY z dnia 25 czerwca 2002 r. w sprawie

OCENY I KONTROLI POZIOMU HAŁASU W ŚRODOWISKU

Jednym z celów jest ochrona przed hałasem

HAŁAS jest jednym z głównych problemów środowiskowych Europy.

Dyrektywa stanowi podstawę do opracowania wspólnotowych środków zaradczych dotyczących hałasu emitowanego przez główne źródła.

Opracowanie wspólnych metod oceny

Określenie wartości granicznych

Środki zaradcze na krótki, średni i długi okres czasu

CELE:

Określenie wspólnego podejścia w kierunku UNIKANIA, ZAPOBIEGANIA i OGRANICZENIA szkodliwych skutków hałasu

1. **Określenie ekspozycji** na hałas w środowisku (wspólnymi metodami)
2. **Informacja** dot. hałasu jest dostępna dla społeczeństwa
3. **Przyjęcie** przez państwa członkowskie **planów działania**

ZADANIA WYNIKAJĄCE Z DYREKTYWY

1. **Dyrektywa** stanowi podstawę do opracowania środków zaradczych dot. hałasu emitowanego przez główne źródła w tym urządzenia przemysłowe (na krótki, średni i długi okres),
2. **Opracowanie** wspólnych metod oceny hałasu w środowisku przy określonych „wartościach granicznych",
3. **18.07.2005** informacja o wszelkich wartościach granicznych na obszarach działalności przemysłowej,
4. **Raport** dla Parlamentu Europejskiego (18.07.09) zawierający m.in. Środki zaradcze ograniczające hałas działalności przemysłowej,
5. **Określenie** wskaźnika LDWN, relacje pomiędzy dokuczliwością a wskaźnikiem.

TERMINY

18.01.2004 Komisja przedstawiła parlamentowi **przegląd postanowień**

18.07.2004 Państwa członkowskie wprowadzą w życie **przepisy prawne** niezbędne do zachowania zgodności z dyrektywą

30.06.2005 Informacja **o głównych drogach, liniach, portach lotniczych**

30.07.2005 Informacja o **wartościach granicznych**

18.07.2006 Komisja przedłoży Radzie i Parlamentowi **propozycje legislacyjne**

TERMINY

30.06.2007	Zapewnienie przez państwa członkowskie wykonania **strategicznych map hałasu** dla - aglomeracji, głównych dróg, linii kolejowych, portów lotniczych
18.07.2008	Plany działania
31.12.2008	Informacja dla Komisji dot. wszystkich aglomeracji, głównych dróg, linii kolejowych, portów lotniczych
18.07.2009	Raport dla Parlamentu o realizacji dyrektywy

TERMINY

30.06.2012 Mapy akustyczne dla wszystkich aglomeracji głównych dróg, linii, portów

18.07.2013 Państwa członkowskie zapewniają, a władze ustalają plany działania dot. obszarów, w których może dochodzić do przekroczenia dowolnej istotnej wartości granicznej

NORMALIZACJA

- **THE EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION** - CEN
  Europejski Komitet Normalizacyjny

- **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION** – ISO
  Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna

- Europejski Komitet Normalizacji Elektrotechnicznej - **CENELEC**,

CEN/TC 126 – Akustyka Budowlana

doc. I. Żuchowicz-Wodnikowska

dr A. Iżewska

CEN/TC 159 – Ochronniki Słuchu

dr E. Kotarbińska

NORMALIZACJA

CEN/TC 211 – Akustyka

dr D. Pleban

CEN/TC 231 – Drgania mechaniczne - wstrząsy

dr J. Koton

ISO TC 43 – Akustyka

SC1 Hałas

SC2 Akustyka Budowlana

ISO TC 108 – Drgania i wstrząsy mechaniczne

SC2 Pomiary i ocena drgań

SC3 Użytkowanie i wzorcowanie przyrządów pomiarowych

POLITYKA EKOLOGICZNA PAŃSTWA

Dokument opracowany w Ministerstwie Środowiska przyjęty przez Radę Ministrów w dniu 13 czerwca 2000 r.

Rozdz. 3.4 Stres miejski, hałas i promieniowanie

- poprawa jakości środowiska m.in. przez zmniejszenie skali narażenia na nadmierny hałas głównie emitowany przez środki transportu

Podjęcie działań

- harmonizacja polskich przepisów z odpowiednimi dyrektywami UE
- sporządzenie map akustycznych dla miast powyżej 250 000 mieszkańców
- programy zwalczania hałasu

Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r.
„PRAWO OCHRONY ŚRODOWISKA"

W tytule II „Ochrona zasobów środowiska" jest osobny Dział V **„OCHRONA PRZED HAŁASEM"** (art. 112-120)

W tytule III „Przeciwdziałanie zanieczyszczeniom" w art. 145, 153, 173, 174, **179**, 180, 202, 206 zawarte są przepisy dot. hałasu

Rozdział 6 Pozwolenie na emitowanie hałasu do środowiska (art. 230 - 233)

PROBLEMY HAŁASU

są również zawarte w:

Art. 3	ust. 5	definicja hałasu (błędna)
	ust. 27	poziom hałasu
	ust. 49	definicja zanieczyszczenia
Art. 13	Polityka ekologiczna Państwa	
Art. 14	Politykę ekologiczną uchwala Sejm	
Art. 16	Raport rządu z realizacji polityki ekologicznej co 4 lata	
Art. 20.1	ust. 3.4	udostępnienie informacji o poziomie emitowanego hałasu
Art. 26.1	ust. 4	monitoring obejmuje informacje dot. hałasu
Art. 72.1	ust. 6	studium uwarunkowań i zagospodarowania przestrzennego ma uwzględniać ochronę przed hałasem
Art. 181.1	organ ochrony środowiska może udzielić pozwolenia zintegrowanego na emitowanie hałasu	

Ustawa z dnia 27.07.2001 r. o wprowadzeniu ustawy „Prawo ochrony środowiska", ustawy o odpadach oraz o zmianie niektórych ustaw

Ustawa z dnia 27.04.2001 r. o wprowadzeniu ustawy „Prawo ochrony środowiska", weszła w życie z dniem 1 października 2001 r.

Rada Ministrów przedłożyła projekt Polityki Ekologicznej Państwa do dnia 31.12.2002 r.

Programy wojewódzkie	-	30.06.2003
Programy powiatowe	-	31.12.2003
Programy gminne	-	30.06.2004

Art. 14 podaje terminy sporządzenia map akustycznych

INSTYTUCJE ZAJMUJĄCE SIĘ ZWALCZANIEM ZAGROŻEŃ WIBROAKUSTYCZNYCH

(niektóre)

- Instytut Techniki Budowlanej
- Instytut Akustyki UAM
- Instytut Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej
- Katedra Mechaniki i Wibroakustyki AGH
- Instytut Ochrony Środowiska
- Główny Instytut Górnictwa
- Centralny Instytut Ochrony Pracy – PIB
- Instytut Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej

ZAGROŻENIE HAŁASEM

Kraje Unii Europejskiej

20 % populacji UE tj. około 80 mln.
dotyka problem hałasu

Norwegia:

1,9 mln mieszkańców narażonych jest
na hałas w ich domach
350 000 na hałas drogowy

STAN ZAGADNIENIA

Liczba osób narażonych na hałas zewnętrzny (wg Państwowego Monitoringu Środowiska 2002)

L_{Aeq} > 55 dB (pora dzienna) **8,8 mln**

L_{Aeq} > 45 dB (pora nocna) **16,8 mln**

(wielkości szacunkowe ± 15%)

Zagrożenie hałasem zewnętrznym w Polsce jest większe w porównaniu z Krajami UE i wzrosło w ostatnich latach

PROWADZONE DZIAŁANIA

1. administracyjno – organizacyjno – prawne
2. techniczne
3. prace naukowo-badawcze

Prowadzona jest ocena stanu klimatu akustycznego środowiska w ramach „Systemu kontrolowania i ewidencji obiektów emitujących hałas" (Państwowy Monitoring Środowiska)

Programy ochrony środowiska (w tym przed hałasem, na różnych szczeblach)

Mapy akustyczne

Przygotowanie nowych przepisów

DYREKTYWA 2002/49/WE

Strategiczne mapy hałasu

- aglomeracje ponad 250 000 mieszkańców
- drogi, po których przejeżdża 6 mln pojazdów/rok
- główne linie kolejowe po których przejeżdża 60 000 pociągów/rok
- główne porty lotnicze o liczbie operacji 50 000/rok

Polska

5 500 km dróg – 3 mln pojazdów/rok
w tym 1 100 km – ponad 6 mln pojazdów/rok

2 650 km dróg kolejowych – 30 000 pociągów/rok
w tym 230 km ponad 60 000 pociągów/rok

LOTNISKA – Warszawa Okęcie

Hałas jest jednym z podstawowych zagrożeń cywilizacji.

Zagrożenie hałasem w Polsce, zwłaszcza emitowanym przez środki transportu, jest duże – w wielu przypadkach większe aniżeli w innych krajach.

Tylko radykalne, kompleksowe i wszechstronne działania mogą poprawić klimat akustyczny w Polsce

915

ROZPORZĄDZENIE MINISTRA GOSPODARKI, PRACY I POLITYKI SPOŁECZNEJ[1)]

z dnia 20 kwietnia 2004 r.

w sprawie wymagań metrologicznych, którym powinny odpowiadać mierniki poziomu dźwięku

Na podstawie art. 9 pkt 3 ustawy z dnia 11 maja 2001 r. — Prawo o miarach (Dz. U. Nr 63, poz. 636, z późn. zm.[2)]) zarządza się, co następuje:

Rozdział 1

Przepisy ogólne

§ 1. Użyte w rozporządzeniu określenia oznaczają:

1) miernik — przyrząd pomiarowy przeznaczony do pomiaru poziomu dźwięku i poziomu ciśnienia akustycznego dźwięków wywołujących u człowieka wrażenie słuchowe;

2) miernik konwencjonalny — miernik, w którym wielkością mierzoną jest poziom dźwięku wyznaczany metodą uśredniania wykładniczego;

3) miernik całkująco-uśredniający — miernik, w którym wielkością mierzoną jest równoważny poziom dźwięku;

4) miernik całkujący — miernik, w którym wielkością mierzoną jest poziom ekspozycji na dźwięk;

5) poziom ciśnienia akustycznego — wielkość wyrażoną w decybelach, wyznaczaną według wzoru:

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

gdzie:

p — wartość skuteczna ciśnienia akustycznego wyrażona w paskalach,

p_0 — wartość odniesienia ciśnienia akustycznego równa 2×10^{-5} Pa;

6) poziom dźwięku — poziom ciśnienia akustycznego skorygowany według jednej z trzech częstotliwościowych charakterystyk korekcyjnych: A, C lub Z oraz uśredniony według jednej z dwóch wykładniczych charakterystyk czasowych: F lub S, oznaczany odpowiednio symbolami: L_{AF}, L_{CF}, L_{ZF}, L_{AS}, L_{CS}, L_{ZS};

7) maksymalny poziom dźwięku — największą wartość poziomu dźwięku występującą podczas obserwacji, oznaczaną odpowiednio symbolami: L_{AFmax}, L_{CFmax}, L_{ZFmax}, L_{ASmax}, L_{CSmax}, L_{ZSmax};

8) szczytowy poziom dźwięku C — wielkość wyrażoną w decybelach, wyznaczaną według wzoru:

$$L_{Cpeak} = 10 \log \left(\frac{\max |p_C(t)|}{p_0} \right)^2$$

gdzie $p_C(t)$ — chwilowe ciśnienie akustyczne skorygowane według charakterystyki częstotliwościowej C, wyrażone w paskalach;

9) równoważny poziom dźwięku A — wielkość wyrażoną w decybelach, wyznaczaną według wzoru:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right]$$

gdzie:

T — czas pomiaru wyrażony w sekundach,

t — zmienna całkowania reprezentująca czas,

$p_A(t)$ — chwilowe ciśnienie akustyczne skorygowane według charakterystyki częstotliwościowej A, wyrażone w paskalach;

10) ekspozycja na dźwięk skorygowana według charakterystyki częstotliwościowej A — wielkość wyrażoną w paskalach do kwadratu razy sekunda, wyznaczaną według wzoru:

$$E_A = \int_0^T [p_A(t)]^2 dt;$$

11) poziom A ekspozycji na dźwięk — wielkość wyrażoną w decybelach, wyznaczaną według wzoru:

$$L_{AE} = 10 \log \left(\frac{E_A}{p_0^2 T_0} \right)$$

gdzie T_0 — czas odniesienia równy 1 s;

12) płaska charakterystyka częstotliwościowa (FLAT) — charakterystykę częstotliwościową, której wartości względne są równe 0 dB co najmniej w zakresie częstotliwości od 31,5 Hz do 8 kHz, która może być dostępna w mierniku;

13) punkt odniesienia mikrofonu — punkt wybrany na mikrofonie lub w jego pobliżu, który określa położenie mikrofonu w przestrzeni;

[1)] Minister Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej kieruje działem administracji rządowej — gospodarka, na podstawie § 1 ust. 2 pkt 1 rozporządzenia Prezesa Rady Ministrów z dnia 7 stycznia 2003 r. w sprawie szczegółowego zakresu działania Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej (Dz. U. Nr 1, poz. 5).

[2)] Zmiany wymienionej ustawy zostały ogłoszone w Dz. U. z 2001 r. Nr 154, poz. 1800, z 2002 r. Nr 155, poz. 1286 i Nr 166, poz. 1360, z 2003 r. Nr 170, poz. 1652 oraz z 2004 r. Nr 49, poz. 465.

14) kierunek odniesienia — kierunek określony do wyznaczania charakterystyk metrologicznych miernika w polu akustycznym, w szczególności częstotliwościowych charakterystyk korekcyjnych oraz charakterystyk kierunkowości;

15) kąt padania fali akustycznej — kąt zawarty między kierunkiem odniesienia a prostą łączącą środek akustyczny źródła dźwięku z punktem odniesienia mikrofonu miernika;

16) zakres pomiarowy — zakres wartości poziomu dźwięku A sygnału sinusoidalnego, wyrażonych w decybelach, które mogą być zmierzone za pomocą miernika w granicach błędów dopuszczalnych liniowości bez uaktywniania sygnalizacji przesterowania lub sygnalizacji zbyt małego wysterowania;

17) zakres poziomu — zakres nominalnych wartości poziomu dźwięku, wyrażonych w decybelach, które mogą być zmierzone przy określonym ustawieniu przełączników miernika;

18) poziom ciśnienia akustycznego odniesienia — wartość poziomu ciśnienia akustycznego wskazana w celu sprawdzania charakterystyk metrologicznych miernika;

19) zakres odniesienia — zakres poziomu obejmujący poziom ciśnienia akustycznego odniesienia, wskazany w celu sprawdzania charakterystyk metrologicznych miernika;

20) częstotliwość wzorcowania — wartość nominalną częstotliwości z zakresu od 160 Hz do 1250 Hz sinusoidalnego sygnału akustycznego wytwarzanego przez kalibrator akustyczny stosowany do sprawdzania i regulacji miernika;

21) błąd liniowości — różnicę między wskazywanym poziomem sygnału a oczekiwanym poziomem sygnału, określoną przy danej częstotliwości;

22) zakres liniowości — zakres wartości poziomu dźwięku, określony dla danego zakresu poziomu i przy danej częstotliwości, dla których błąd liniowości mieści się w dopuszczalnych granicach;

23) impuls tonowy — sygnał składający się z jednego lub większej całkowitej liczby okresów przebiegu sinusoidalnego o określonej częstotliwości, który rozpoczyna się i kończy w momencie przejścia tego przebiegu przez wartość zerową;

24) odpowiedź na impuls tonowy — różnicę między:

a) maksymalnym poziomem dźwięku wskazywanym przez miernik konwencjonalny,

b) równoważnym poziomem dźwięku wskazywanym przez miernik całkująco-uśredniający albo

c) poziomem ekspozycji na dźwięk wskazywanym przez miernik całkujący

— dla elektrycznego sygnału wejściowego w postaci impulsu tonowego, a poziomem wskazywanym przez miernik dla ustalonego elektrycznego sinusoidalnego sygnału wejściowego, z którego wydzielono impuls tonowy;

25) akustyczne pole swobodne — pole akustyczne w ośrodku jednorodnym i izotropowym, w którym wpływ ograniczających go powierzchni na fale akustyczne jest pomijalny;

26) klasa dokładności — klasę mierników spełniających określone wymagania metrologiczne, których błędy charakterystyk metrologicznych są zawarte w wyznaczonych granicach.

Rozdział 2

Wymagania metrologiczne w zakresie konstrukcji i wykonania mierników

§ 2. Rozróżnia się dwie klasy dokładności mierników: klasę dokładności 1 i klasę dokładności 2.

§ 3. 1. Miernik powinien mierzyć co najmniej jedną z następujących wielkości:

1) poziom dźwięku A uśredniony wykładniczo według charakterystyki czasowej F;

2) równoważny poziom dźwięku A;

3) poziom A ekspozycji na dźwięk.

2. Miernik klasy dokładności 1 powinien być wyposażony w układ częstotliwościowej charakterystyki korekcyjnej C.

3. Miernik umożliwiający pomiar szczytowego poziomu dźwięku C sygnałów nieustalonych powinien również mierzyć poziom dźwięku C sygnałów ustalonych.

§ 4. W skład miernika wchodzą w szczególności:

1) mikrofon pomiarowy elektrostatyczny;

2) przedwzmacniacz mikrofonowy;

3) analogowy, cyfrowy lub analogowo-cyfrowy procesor sygnałowy realizujący funkcje wzmacniania sygnału, kształtowania charakterystyki częstotliwościowej układu pomiarowego, wyznaczania kwadratu chwilowego ciśnienia akustycznego oraz uśredniania lub całkowania sygnału względem czasu;

4) urządzenie wskazujące;

5) układ sygnalizacji przesterowania;

6) układ zasilania z układem sygnalizacji stanu zasilania.

§ 5. 1. Konstrukcja miernika powinna umożliwiać doprowadzenie elektrycznego sygnału pomiarowego do wejścia części elektrycznej miernika.

2. Układ elektryczny przeznaczony do doprowadzenia elektrycznego sygnału pomiarowego powinien być dołączany do miernika w miejscu dołączenia mi-

krofonu, po odłączeniu mikrofonu od części elektrycznej miernika.

§ 6. Miernik konwencjonalny powinien być wyposażony w układ zapewniający wykładnicze uśrednianie sygnału według charakterystyki czasowej F.

§ 7. 1. Miernik może mieć więcej niż jeden zakres poziomu.

2. Jeżeli miernik ma więcej niż jeden zakres poziomu, powinien być wyposażony w przełącznik zakresów.

§ 8. Urządzenie wskazujące miernika powinno wskazywać wyniki pomiaru z rozdzielczością co najmniej 0,1 dB, w zakresie co najmniej 60 dB przy dowolnym wybranym zakresie poziomu.

§ 9. 1. Miernik może wskazywać wartość co najmniej jednej z następujących wielkości mierzonych:

1) poziomu dźwięku wyznaczanego metodą uśredniania wykładniczego;

2) równoważnego poziomu dźwięku;

3) poziomu ekspozycji na dźwięk.

2. W mierniku mogącym wskazywać wartości więcej niż jednej wielkości należy zapewnić możliwość identyfikowania wskazywanych wielkości.

3. Mierzona wielkość akustyczna powinna być jednoznacznie wskazywana przez odpowiednią informację prezentowaną przez urządzenie wskazujące lub przez ustawienie przełączników miernika.

§ 10. Miernik całkująco-uśredniający klasy dokładności 1 oraz miernik całkujący klasy dokładności 1 powinien być wyposażony w urządzenie do wskazywania:

1) czasu, który upłynął od rozpoczęcia pomiaru do końca okresu całkowania, albo

2) przedziału czasu, w którym jest wykonywane całkowanie.

§ 11. Miernik umożliwiający pomiar maksymalnego poziomu dźwięku przy określonej charakterystyce czasowej oraz szczytowego poziomu dźwięku C powinien być wyposażony w układ podtrzymywania wskazania.

§ 12. Miernik przeznaczony do pomiaru równoważnego poziomu dźwięku A, poziomu ekspozycji na dźwięk, maksymalnego poziomu dźwięku i szczytowego poziomu dźwięku C powinien być wyposażony w urządzenie do kasowania zawartości układu pamięciowego i inicjowania nowego pomiaru, przy czym używanie tego urządzenia nie powinno powodować niepożądanych zmian wskazań miernika oraz zniekształcania danych zapamiętanych wcześniej.

§ 13. Miernik z urządzeniem wskazującym cyfrowym powinien być wyposażony w układ sygnalizacji zbyt małego wysterowania.

§ 14. Jeżeli konstrukcja miernika umożliwia dołączanie do niego urządzeń zewnętrznych, takich jak filtry pasmowe lub rejestrator, to zmiany charakterystyk metrologicznych miernika spowodowane dołączeniem tych urządzeń nie powinny przekraczać wartości granicznych określonych przez producenta.

§ 15. 1. W mierniku, który jest wyposażony w analogowe elektryczne wyjście sygnałowe, dołączenie do tego wyjścia dowolnego biernego układu elektrycznego bez zmagazynowanej energii elektrycznej, łącznie z układem zwierającym to wyjście, nie powinno zmieniać wyniku wykonywanego pomiaru o więcej niż 0,2 dB.

2. Zmiany poziomu sygnału wskazywane przez urządzenie wskazujące miernika i odpowiadające im zmiany poziomu sygnału na wyjściu analogowym lub cyfrowym miernika powinny być równe, przy czym wartość bezwzględna różnicy między tymi zmianami nie powinna przekraczać 0,1 dB.

§ 16. Na obudowie miernika powinny być zamieszczone w sposób trwały i czytelny:

1) nazwa lub znak producenta;

2) oznaczenie typu i numer fabryczny miernika;

3) klasa dokładności miernika.

Rozdział 3

Charakterystyki metrologiczne mierników

§ 17. 1. Wymagania dotyczące charakterystyk metrologicznych miernika powinny być spełnione po upływie określonego czasu, licząc od chwili włączenia zasilania miernika, przy czym czas ten nie powinien być dłuższy niż 120 s.

2. Przed włączeniem zasilania miernika należy umożliwić osiągnięcie przez miernik stanu równowagi klimatycznej w istniejących warunkach użytkowania.

§ 18. 1. Wartość bezwzględna maksymalnej różnicy między wartościami poziomu dźwięku zmierzonymi dla dowolnych dwóch kątów padania fali akustycznej zawartych w danym przedziale kątów określonym względem kierunku odniesienia nie powinna przekraczać wartości określonych w załączniku nr 1 do rozporządzenia.

2. Wymagania, określone w załączniku nr 1 do rozporządzenia, odnoszą się do warunków pola swobodnie biegnących fal akustycznych dochodzących do miernika pod dowolnym kątem z podanych przedziałów, łącznie z kątem odpowiadającym kierunkowi odniesienia.

§ 19. 1. Wartości względne częstotliwościowych charakterystyk korekcyjnych A, C i Z miernika oraz ich błędy dopuszczalne, uwzględniające rozszerzoną niepewność pomiaru, określa załącznik nr 2 do rozporządzenia.

2. Wartości, określone w załączniku nr 2 do rozporządzenia, odnoszą się do wszystkich zakresów poziomu miernika i dotyczą sygnału w postaci płaskich, swobodnie biegnących fal akustycznych dochodzących do mikrofonu miernika z kierunku odniesienia.

3. Jeżeli w mierniku jest dostępna płaska charakterystyka częstotliwościowa (FLAT), to jej błędy dopuszczalne nie powinny być większe niż wartości określone w załączniku nr 2 do rozporządzenia.

4. Jeżeli do wejścia części elektrycznej miernika doprowadza się ustalony elektryczny sygnał sinusoidalny o częstotliwości 1 kHz i takiej wartości, by wskazanie miernika przy wybranym zakresie odniesienia i włączonej charakterystyce korekcyjnej A było równe poziomowi ciśnienia akustycznego odniesienia, to zmiana wskazania miernika po włączeniu charakterystyki korekcyjnej C lub Z albo płaskiej charakterystyki częstotliwościowej (FLAT), powiększona o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinna przekraczać ±0,4 dB.

5. Wymaganie, o którym mowa w ust. 4, nie dotyczy wskazań szczytowego poziomu dźwięku C.

§ 20. Różnice między zmierzonymi wartościami poprawek uwzględniających wpływy charakterystyki częstotliwościowej mikrofonu oraz odbicia i ugięcia fal akustycznych a wartościami nominalnymi poprawek określonymi przez producenta, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinny przekraczać dwóch trzecich wartości błędów dopuszczalnych określonych w załączniku nr 2 do rozporządzenia.

§ 21. 1. Miernik, w którym do wejścia części elektrycznej jest doprowadzony sygnał elektryczny za pomocą układu, o którym mowa w § 5 ust. 2, powinien spełniać następujące wymagania:

1) dla zakresu odniesienia miernika przy częstotliwości 1 kHz zakres liniowości powinien być równy co najmniej 60 dB;

2) błąd liniowości miernika, powiększony o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinien przekraczać:

   a) ±1,1 dB — dla mierników klasy dokładności 1,

   b) ±1,4 dB — dla mierników klasy dokładności 2;

3) dowolna zmiana poziomu sygnału wejściowego z zakresu od 1 dB do 10 dB powinna wywoływać taką samą zmianę wskazania miernika, przy czym błąd zmiany wskazania, powiększony o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinien przekraczać:

   a) ±0,6 dB — dla mierników klasy dokładności 1,

   b) ±0,8 dB — dla mierników klasy dokładności 2.

2. Wymagania, o których mowa w ust. 1 pkt 2 i 3, powinny być spełnione w całym zakresie pomiarowym przy dowolnej częstotliwości z pasma przenoszenia miernika, dla każdej charakterystyki częstotliwościowej miernika.

3. W przypadku miernika konwencjonalnego zakresy liniowości odpowiadające sąsiadującym zakresom poziomu przy częstotliwości 1 kHz powinny zachodzić na siebie w przedziale nie mniejszym niż 30 dB.

4. Przedział, o którym mowa w ust. 3, w przypadku miernika całkująco-uśredniającego i miernika całkującego nie powinien być mniejszy niż 40 dB.

§ 22. 1. Poziom szumów własnych miernika, określony jako wskazanie miernika po zastąpieniu mikrofonu układem, o którym mowa w § 5 ust. 2, i zamknięciu jego wejścia nie powinien być większy niż odpowiadająca tym warunkom wartość określona przez producenta.

2. Jeżeli miernik z jednym z mikrofonów, określonym przez producenta, jest umieszczony w miejscu, w którym poziom ciśnienia akustycznego dźwięków dochodzących do mikrofonu jest co najmniej o 6 dB mniejszy niż wskazanie, o którym mowa w ust. 1, to wskazanie przyrządu nie powinno być większe niż odpowiadająca tym warunkom wartość określona przez producenta.

3. Wymagania, o których mowa w ust. 1 i 2, dotyczą warunków odniesienia określonych w § 38 oraz wszystkich charakterystyk częstotliwościowych miernika.

§ 23. 1. W mierniku konwencjonalnym charakterystyce czasowej F odpowiada stała czasowa układu uśredniającego o wartości 125 ms, natomiast charakterystyce czasowej S — stała czasowa o wartości 1 s.

2. Szybkość zmniejszania się wskazania miernika po natychmiastowym wyłączeniu ustalonego sinusoidalnego sygnału elektrycznego o częstotliwości 4 kHz powinna mieć wartość:

1) nie mniejszą niż 25 dB/s — dla charakterystyki czasowej F;

2) z zakresu od 3,4 dB/s do 5,3 dB/s — dla charakterystyki czasowej S.

3. Zmiana wskazania miernika spowodowana zmianą charakterystyki czasowej z F na S podczas pomiaru ustalonego sinusoidalnego sygnału elektrycznego o częstotliwości 1 kHz, powiększona o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinna przekraczać ±0,3 dB.

§ 24. 1. Wartości odniesienia odpowiedzi miernika na impuls tonowy o częstotliwości 4 kHz i błędy graniczne dopuszczalne dla charakterystyk częstotliwościowych A, C i Z dotyczące:

1) miernika konwencjonalnego oraz:

   a) charakterystyki czasowej F — określa załącznik nr 3 do rozporządzenia,

   b) charakterystyki czasowej S — określa załącznik nr 4 do rozporządzenia;

2) miernika całkującego i miernika całkująco-uśredniającego niewskazującego poziomu ekspozycji na dźwięk — określa załącznik nr 5 do rozporządzenia.

2. Poziom ekspozycji na dźwięk dla impulsu tonowego dla miernika całkująco-uśredniającego, o którym mowa w ust. 1 pkt 2, oblicza się na podstawie wyniku pomiaru równoważnego poziomu dźwięku $L_{eq,T}$ według wzoru:

$$L_E = L_{eq,T} + 10 \log (T/T_0)$$

gdzie:

T — czas pomiaru wyrażony w sekundach,

T_0 — czas odniesienia równy 1 s.

3. Wymagania, określone w załącznikach nr 3—5 do rozporządzenia, powinny być spełnione dla zakresu odniesienia miernika oraz dla ustalonego elektrycznego sinusoidalnego sygnału wejściowego, z którego wydzielono impuls tonowy, mającego poziom zawarty w przedziale od powiększonej o 10 dB wartości odpowiadającej dolnej granicy zakresu liniowości do pomniejszonej o 3 dB wartości odpowiadającej górnej granicy zakresu liniowości.

§ 25. 1. Jeżeli do wejścia części elektrycznej miernika całkująco-uśredniającego doprowadza się sygnał w postaci dowolnego ciągu impulsów tonowych o częstotliwości 4 kHz mających:

1) jednakową amplitudę,

2) jednakowy czas trwania z zakresu od 0,25 ms do 1 s

— to różnica między wartością równoważnego poziomu dźwięku zmierzoną dla sygnału impulsowego a wartością tej samej wielkości zmierzoną dla sygnału ustalonego o tej samej amplitudzie powinna być równa różnicy δ_{ref} obliczonej według wzoru:

$$\delta_{ref} = 10 \log (N T_{imp}/T)$$

gdzie:

N — liczba impulsów tonowych zawartych w danym ciągu,

T_{imp} — czas trwania każdego impulsu tonowego, wyrażony w sekundach,

T — całkowity czas pomiaru, wyrażony w sekundach.

2. Dopuszczalne błędy różnicy wartości zmierzonych w zależności od czasu trwania impulsu tonowego powinny być równe błędom granicznym dopuszczalnym określonym w załączniku nr 5 do rozporządzenia.

3. Wymagania określone w ust. 1 i 2 powinny być spełnione dla zakresu odniesienia miernika, dla dostępnych częstotliwościowych charakterystyk korekcyjnych oraz dla sygnału ustalonego mającego poziom zawarty w przedziale, o którym mowa w § 24 ust. 3.

§ 26. 1. Układ sygnalizacji przesterowania miernika powinien działać, gdy poziom sygnału doprowadzonego do wejścia części elektrycznej miernika przekracza górną granicę zakresu liniowości, zanim błąd liniowości przekroczy wartość dopuszczalną.

2. Wymaganie, o którym mowa w ust. 1, powinno być spełnione dla wszystkich zakresów poziomu miernika oraz dla każdej częstotliwości z zakresu:

1) od 31,5 Hz do 12,5 kHz — dla miernika klasy dokładności 1;

2) od 31,5 Hz do 8 kHz — dla miernika klasy dokładności 2.

3. Jeżeli do wejścia części elektrycznej miernika doprowadza się kolejno sygnały w postaci dodatnich, a następnie ujemnych półokresów przebiegu sinusoidalnego, które rozpoczynają się i kończą w chwili przejścia tego przebiegu przez wartość zerową i mają amplitudy o wartości najmniejszej spośród tych, które powodują zadziałanie układu sygnalizacji przesterowania, to wartość bezwzględna różnicy między poziomem sygnału zmierzonym dla półokresów dodatnich a poziomem sygnału zmierzonym dla półokresów ujemnych, powiększona o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinna być większa niż 1,8 dB.

4. W mierniku konwencjonalnym podczas pomiarów przy charakterystyce czasowej F lub S układ sygnalizacji przesterowania powinien działać przez cały czas trwania warunków przesterowania, jednak nie krócej niż 1 s.

5. W mierniku całkująco-uśredniającym lub całkującym sygnalizacja przesterowania powinna:

1) działać przez cały czas trwania warunków przesterowania;

2) być podtrzymywana do chwili skasowania wyniku pomiaru.

6. Wymagania, o których mowa w ust. 5, powinny być spełnione również w przypadku pomiaru maksymalnego poziomu dźwięku, szczytowego poziomu dźwięku C oraz innych wielkości obliczanych podczas trwania pomiaru lub wskazywanych po zakończeniu pomiaru.

§ 27. 1. Układ sygnalizacji zbyt małego wysterowania powinien działać:

1) gdy wskazanie miernika jest mniejsze niż odpowiednia dolna granica określona przez producenta, zanim błąd liniowości w tych warunkach przekroczy wartość dopuszczalną;

2) co najmniej przez czas trwania warunków zbyt małego wysterowania, jednak nie krócej niż 1 s.

2. Działanie układu sygnalizacji zbyt małego wysterowania nie jest wymagane, jeżeli dla zakresów poziomu obejmujących najmniejsze mierzone wartości poziomu sygnału błąd liniowości jest powodowany przez szumy własne miernika.

§ 28. 1. Jeżeli miernik może wskazywać wartości szczytowego poziomu dźwięku C, to zakres wskazań tej wielkości, przynajmniej na zakresie odniesienia, nie powinien być mniejszy niż 40 dB.

2. Wartości różnicy między wskazaniem szczytowego poziomu dźwięku C (L_{Cpeak}) dla sygnału nieustalonego a wskazaniem poziomu dźwięku C (L_C) dla sygnału ustalonego o tej samej amplitudzie, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, oraz błędy dopuszczalne tej różnicy, w przypadku, gdy do wejścia części elektrycznej miernika wskazującego szczytowy poziom dźwięku C doprowadza się sygnały nieustalone w postaci pojedynczych okresów, a także kolejno pojedynczych dodatnich i ujemnych półokresów przebiegu sinusoidalnego wydzielonych z sygnału ustalonego, zaczynających się i kończących w momencie przejścia tego przebiegu przez wartość zerową, określa załącznik nr 6 do rozporządzenia.

§ 29. Poziom natężenia pola elektromagnetycznego o częstotliwości radiowej emitowanego z któregokolwiek miejsca na obudowie miernika, określony względem wartości 1 μ/m, mierzony w odległości 10 m za pomocą odbiornika pomiarowego spełniającego wymagania określone w normie PN-CISPR 16-1:1997 rozdział 2, nie powinien przekraczać 30 dB dla częstotliwości z zakresu od 30 MHz do 230 MHz oraz 37 dB dla częstotliwości z zakresu od 230 MHz do 1 GHz.

§ 30. Jeżeli do wejścia elektrycznego jednego z kanałów miernika wielokanałowego doprowadza się sygnał elektryczny, któremu odpowiada wskazanie miernika w tym kanale równe górnej granicy zakresu liniowości, to w każdym z pozostałych kanałów, po odłączeniu od nich mikrofonów i zamknięciu wejść elektrycznych w sposób określony przez producenta, zmierzony poziom sygnału powinien być mniejszy od tego wskazania o co najmniej 70 dB.

§ 31. 1. W zakresie ciśnienia statycznego od 85 kPa do 108 kPa odchylenie wskazania miernika od wartości wskazywanej przy ciśnieniu statycznym odniesienia, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinno przekraczać:

1) ±0,7 dB — dla mierników klasy dokładności 1;

2) ±1,0 dB — dla mierników klasy dokładności 2.

2. W zakresie ciśnienia statycznego od 65 kPa do mniej niż 85 kPa odchylenie wskazania miernika od wartości wskazywanej przy ciśnieniu statycznym odniesienia, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinno przekraczać:

1) ±1,2 dB — dla mierników klasy dokładności 1;

2) ±1,9 dB — dla mierników klasy dokładności 2.

§ 34. 1. W zakresie temperatury powietrza od −10 °C do +50 °C odchylenie wskazania miernika klasy dokładności 1 od wartości wskazywanej przy temperaturze odniesienia, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinno przekraczać ±0,8 dB.

2. W zakresie temperatury powietrza od 0 °C do +40 °C odchylenie wskazania miernika klasy dokładności 2 od wartości wskazywanej przy temperaturze odniesienia, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinno przekraczać ±1,3 dB.

3. Jeżeli w skład miernika wchodzą urządzenia przeznaczone do pracy w otoczeniu o kontrolowanych warunkach środowiskowych, zakres temperatury powietrza, o którym mowa w ust. 1 i 2, może być ograniczony do przedziału od +5 °C do +35 °C.

4. W zakresach temperatury powietrza, o których mowa w ust. 1—3, przy wilgotności względnej z zakresu od 30 % do 70 %, błąd liniowości na zakresie odniesienia przy częstotliwości 1 kHz w zakresie liniowości ustalonym przez producenta powinien mieścić się w granicach określonych w § 21 ust. 1 pkt 2 i 3.

§ 35. 1. W zakresie wilgotności względnej od 25 % do 90 % odchylenie wskazania miernika od wartości wskazywanej przy wilgotności względnej odniesienia, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinno przekraczać:

1) ±0,8 dB — dla mierników klasy dokładności 1;

2) ±1,3 dB — dla mierników klasy dokładności 2.

2. Wymaganie, o którym mowa w ust. 1, powinno być spełnione przy dowolnej wartości temperatury powietrza z zakresów, o których mowa w § 34 ust. 1—3, odpowiednio do klasy miernika, jednak z wyłączeniem tych kombinacji temperatury powietrza i wilgotności względnej, z których wynika temperatura punktu rosy większa niż +39 °C lub mniejsza niż −15 °C.

§ 36. 1. Oddziałujące na miernik elektrostatyczne wyładowania stykowe przy różnicy potencjałów z zakresu do ±4 kV względem potencjału ziemi oraz elektrostatyczne wyładowania powietrzne przy różnicy potencjałów z zakresu do ±8 kV względem potencjału ziemi nie powinny powodować trwałego pogorszenia charakterystyki metrologicznej lub utraty funkcji miernika.

2. Pogorszenie charakterystyki metrologicznej lub utrata funkcji miernika wskutek oddziaływania wyładowań, o których mowa w ust. 1, może mieć jedynie charakter czasowy, jednak nie powinno ono powodować zmian:

1) stanu pracy miernika;

2) konfiguracji miernika;

3) informacji zarejestrowanych w pamięci miernika.

§ 37. 1. Ze względu na wymagania dotyczące emisji pól elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych oraz wrażliwości na oddziaływanie takich pól, rozróżnia się następujące rodzaje mierników:

1) mierniki grupy X, będące przyrządami samodzielnymi o zasilaniu bateryjnym, które nie wymagają zewnętrznych połączeń z innymi przyrządami w celu pomiaru poziomu dźwięku;

2) mierniki grupy Y, będące przyrządami samodzielnymi o zasilaniu sieciowym, które nie wymagają zewnętrznych połączeń z innymi przyrządami w celu pomiaru poziomu dźwięku;

3) mierniki grupy Z, będące przyrządami składającymi się z dwóch lub większej liczby urządzeń wymagających połączenia w celu zapewnienia normalnego funkcjonowania miernika, przy czym poszczególne urządzenia składowe traktowane oddzielnie mogą być o zasilaniu bateryjnym lub sieciowym.

2. Oddziałujące na miernik:

1) jednorodne pole magnetyczne o częstotliwości sieci zasilającej i wartości skutecznej natężenia 80 A/m,

2) pole elektromagnetyczne o częstotliwościach z zakresu od 26 MHz do 1 GHz i wartości skutecznej natężenia 10 V/m modulowane amplitudowo sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 1 kHz przy głębokości modulacji 80 %

— nie powinny powodować w mierniku zmian, o których mowa w § 36 ust. 2.

3. Jeżeli do mikrofonu miernika doprowadza się sinusoidalny sygnał akustyczny o częstotliwości 925 Hz wywołujący wskazanie poziomu dźwięku A lub równoważnego poziomu dźwięku A równe 74 dB ±1 dB, to odchylenie od tej wartości spowodowane włączeniem pola magnetycznego, o którym mowa w ust. 1 pkt 1, lub pola elektromagnetycznego, o którym mowa w ust. 1 pkt 2, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, nie powinno przekraczać:

1) ±1,3 dB — dla mierników klasy dokładności 1;

2) ±2,3 dB — dla mierników klasy dokładności 2.

4. Mierniki należące do grupy Y lub grupy Z, mające przyłącze wejściowe lub przyłącze wyjściowe zasilania prądem przemiennym, powinny być odporne na:

1) zakłócenia niesymetryczne o częstotliwościach radiowych z zakresu od 0,15 MHz do 80 MHz, mające postać napięcia o wartości skutecznej określonej bez modulacji jako równej 10 V, zmodulowanego amplitudowo sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 1 kHz przy głębokości modulacji 80 %, wytwarzanego przez źródło o impedancji wyjściowej 150 Ω;

2) szybkie elektryczne stany przejściowe w systemie publicznej sieci zasilającej, mające postać napięcia o wartości szczytowej 2 kV i częstotliwości powtarzania 5 kHz;

3) zapady napięcia zasilania, przerwy napięcia zasilania i udary napięciowe, zgodnie z tablicą nr 4 normy PN-EN 61000-6-2:2003.

5. Mierniki należące do grupy Z, mające przyłącza sygnałowe lub przyłącza sterowania, powinny być odporne na:

1) zakłócenia niesymetryczne o częstotliwościach radiowych z zakresu od 0,15 MHz do 80 MHz mające postać napięcia o wartości skutecznej określonej bez modulacji jako równej 10 V, zmodulowanego amplitudowo sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 1 kHz przy głębokości modulacji 80 %;

2) szybkie elektryczne stany przejściowe w systemie publicznej sieci zasilającej mające postać napięcia o wartości szczytowej 2 kV i częstotliwości powtarzania 5 kHz, zgodnie z tablicą nr 2 normy PN-EN 61000-6-2:2003.

6. Wymaganie, o którym mowa w ust. 4 pkt 1, powinno być spełnione, gdy długość każdego kabla łączącego poszczególne części miernika przekracza 3 m.

§ 38. Ustala się następujące warunki odniesienia dla mierników:

1) temperaturę powietrza: 23 °C;

2) ciśnienie statyczne: 101,325 kPa;

3) wilgotność względną: 50 %.

Rozdział 4

Przepis końcowy

§ 39. Rozporządzenie wchodzi w życie z dniem ogłoszenia.

Minister Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej:
J. Hausner

Załączniki do rozporządzenia Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 20 kwietnia 2004 r. (poz. 915)

Załącznik nr 1

Wartość bezwzględna maksymalnej różnicy między wartościami poziomu dźwięku zmierzonymi dla dowolnych dwóch kątów padania fali akustycznej zawartych w danym przedziale kątów określonym względem kierunku odniesienia

Zakres częstotliwości, w kHz	Wartość bezwzględna maksymalnej różnicy, w dB, między wartościami poziomu dźwięku zmierzonymi dla dowolnych dwóch kątów padania fali akustycznej zawartych w danym przedziale kątów określonym względem kierunku odniesienia					
	Klasa 1			Klasa 2		
	Przedział kątów ± 30°	Przedział kątów ± 90°	Przedział kątów ± 150°	Przedział kątów ± 30°	Przedział kątów ± 90°	Przedział kątów ± 150°
od 0,25 do 1	1,3	1,8	2,3	2,3	3,3	5,3
powyżej 1 do 2	1,5	2,5	4,5	2,5	4,5	7,5
powyżej 2 do 4	2,0	4,5	6,5	4,5	7,5	12,5
powyżej 4 do 8	3,5	8,0	11,0	7,0	13,0	17,0
powyżej 8 do 12,5	5,5	11,5	15,5	nie dotyczy		

Załącznik nr 2

Wartości względne częstotliwościowych charakterystyk korekcyjnych A, C i Z miernika oraz ich błędy dopuszczalne

Częstotliwość w Hz według PN-EN ISO 266:2000		Wartość względna częstotliwościowej charakterystyki korekcyjnej, w dB			Błędy dopuszczalne, w dB	
Wartość obliczona	Wartość zalecana (nominalna)	A	C	Z	Klasa 1	Klasa 2
10,000	10,0	-70,4	-14,3	0,0	+3,5; -∞	+5,5 -∞
12,589	12,5	-63,4	-11,2	0,0	+3,0; -∞	+5,5; -∞
15,849	16,0	-56,7	-8,5	0,0	+2,5; -4,5	+5,5; -∞
19,953	20,0	-50,5	-6,2	0,0	± 2,5	± 3,5
25,119	25,0	-44,7	-4,4	0,0	+2,5; -2,0	± 3,5
31,623	31,5	-39,4	-3,0	0,0	± 2,0	± 3,5
39,811	40,0	-34,6	-2,0	0,0	± 1,5	± 2,5
50,119	50,0	-30,2	-1,3	0,0	± 1,5	± 2,5
63,096	63,0	-26,2	-0,8	0,0	± 1,5	± 2,5
79,433	80,0	-22,5	-0,5	0,0	± 1,5	± 2,5
100,00	100	-19,1	-0,3	0,0	± 1,5	± 2,0
125,89	125	-16,1	-0,2	0,0	± 1,5	± 2,0
158,49	160	-13,4	-0,1	0,0	± 1,5	± 2,0
199,53	200	-10,9	0,0	0,0	± 1,5	± 2,0
251,19	250	-8,6	0,0	0,0	± 1,4	± 1,9
316,23	315	-6,6	0,0	0,0	± 1,4	± 1,9
398,11	400	-4,8	0,0	0,0	± 1,4	± 1,9
501,19	500	-3,2	0,0	0,0	± 1,4	± 1,9
630,96	630	-1,9	0,0	0,0	± 1,4	± 1,9
794,33	800	-0,8	0,0	0,0	± 1,4	± 1,9
1 000,0	1 000	0	0	0	± 1,1	± 1,4
1 258,9	1 250	+0,6	0,0	0,0	± 1,4	± 1,9
1 584,9	1 600	+1,0	-0,1	0,0	± 1,6	± 2,6
1 995,3	2 000	+1,2	-0,2	0,0	± 1,6	± 2,6
2 511,9	2 500	+1,3	-0,3	0,0	± 1,6	± 3,1
3 162,3	3 150	+1,2	-0,5	0,0	± 1,6	± 3,1
3 981,1	4 000	+1,0	-0,8	0,0	± 1,6	± 3,6
5 011,9	5 000	+0,5	-1,3	0,0	± 2,1	± 4,1
6 309,6	6 300	-0,1	-2,0	0,0	+2,1; -2,6	± 5,1
7 943,3	8 000	-1,1	-3,0	0,0	+2,1; -3,1	± 5,6
10 000	10 000	-2,5	-4,4	0,0	+2,6; -3,6	+5,6; -∞
12 589	12 500	-4,3	-6,2	0,0	+3,0; -6,0	+6,0; -∞
15 849	16 000	-6,6	-8,5	0,0	+3,5; -17,0	+6,0; -∞
19 953	20 000	-9,3	-11,2	0,0	+4,0; -∞	+6,0; -∞

Załącznik nr 3

Wartości odniesienia odpowiedzi miernika na impuls tonowy o częstotliwości 4 kHz i błędy graniczne dopuszczalne dla charakterystyk częstotliwościowych A,C, Z dotyczące miernika konwencjonalnego oraz charakterystyki czasowej F

Czas trwania impulsu tonowego, w ms	Odpowiedź na impuls tonowy, w dB	Błędy dopuszczalne, w dB	
		Klasa 1	Klasa 2
1000	0,0	± 0,8	± 1,3
500	–0,1	± 0,8	± 1,3
200	–1,0	± 0,8	± 1,3
100	–2,6	± 1,3	± 1,3
50	–4,8	± 1,3	+1,3; –1,8
20	–8,3	± 1,3	+1,3; –2,3
10	–11,1	± 1,3	+1,3; –2,3
5	–14,1	± 1,3	+1,3; –2,8
2	–18,0	+1,3; –1,8	+1,3; –2,8
1	–21,0	+1,3; –2,3	+1,3; –3,3
0,5	–24,0	+1,3; –2,8	+1,3; –4,3
0,25	–27,0	+1,3; –3,3	+1,8; –5,3

Załącznik nr 4

Wartości odniesienia odpowiedzi miernika na impuls tonowy o częstotliwości 4 kHz i błędy graniczne dopuszczalne dla charakterystyk częstotliwościowych A, C, Z

dotyczące miernika konwencjonalnego oraz charakterystyki czasowej S

Czas trwania impulsu tonowego, w ms	Odpowiedź na impuls tonowy, w dB	Błędy dopuszczalne, w dB	
		Klasa 1	Klasa 2
1000	–2,0	± 0,8	± 1,3
500	–4,1	± 0,8	± 1,3
200	–7,4	± 0,8	± 1,3
100	–10,2	± 1,3	± 1,3
50	–13,1	± 1,3	+1,3; –1,8
20	–17,0	+1,3; –1,8	+1,3; –2,3
10	–20,0	+1,3; –2,3	+1,3; –3,3
5	–23,0	+1,3; –2,8	+1,3; –4,3
2	–27,0	+1,3; –3,3	+1,3; –5,3

Załącznik nr 5

Wartości odniesienia dpowiedzi miernika na impuls tonowy o częstotliwości 4 kHz i błędy graniczne dopuszczalne dla charakterystyk częstotliwościowych A, C, Z dotyczące miernika całkującego i całkująco-uśredniającego, niewskazującego ekspozycji na dźwięk

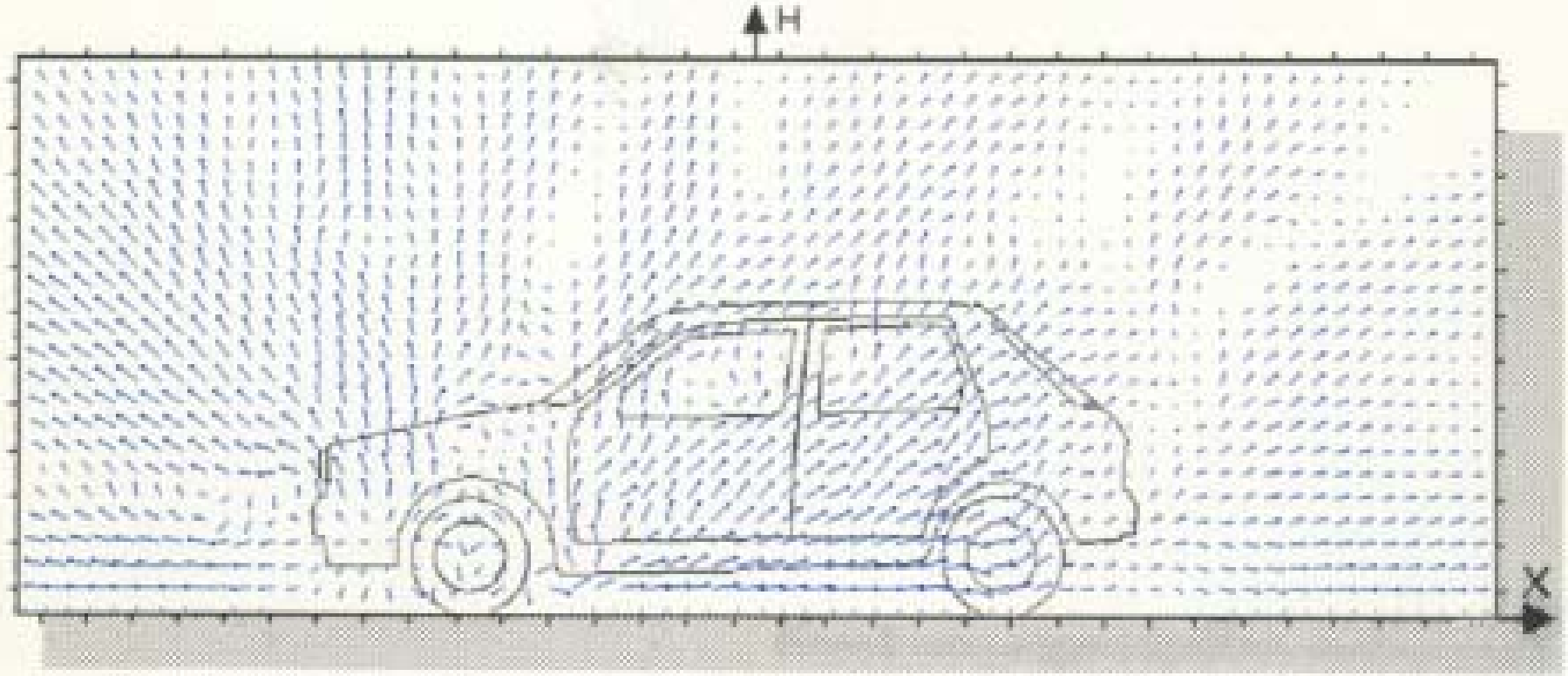
Czas trwania impulsu tonowego, w ms	Odpowiedź na impuls tonowy, w dB	Błędy dopuszczalne, w dB	
		Klasa 1	Klasa 2
1000	0,0	± 0,8	± 1,3
500	–3,0	± 0,8	± 1,3
200	–7,0	± 0,8	± 1,3
100	–10,0	± 1,3	± 1,3
50	–13,0	± 1,3	+1,3; –1,8
20	–17,0	± 1,3	+1,3; –2,3
10	–20,0	± 1,3	+1,3; –2,3
5	–23,0	± 1,3	+1,3; –2,8
2	–27,0	+1,3; –1,8	+1,3; –2,8
1	–30,0	+1,3; –2,3	+1,3; –3,3
0,5	–33,0	+1,3; –2,8	+1,3; –4,3
0,25	–36,0	+1,3; –3,3	+1,8; –5,3

Załącznik nr 6

Wartości różnicy między wskazaniem szczytowego poziomu dźwięku C (L_{Cpeak}) dla sygnału nieustalonego a wskazaniem poziomu dźwięku C (L_C) dla sygnału ustalonego o tej samej amplitudzie, powiększone o rozszerzoną niepewność pomiaru, oraz błędy dopuszczalne tej różnicy

Liczba okresów nieustalonego sygnału pomiarowego	Częstotliwość sygnału pomiarowego, w Hz	Różnica $L_{Cpeak} - L_C$, w dB	Błędy dopuszczalne, w dB	
			Klasa 1	Klasa 2
1	31,5	2,5	± 2,4	± 3,4
1	500	3,5	± 1,4	± 2,4
1	8000	3,4	± 2,4	± 3,4
½ (jeden półokres dodatni)	500	2,4	± 1,4	± 2,4
½ (jeden półokres ujemny)	500	2,4	± 1,4	± 2,4

Sound Intensity



Brüel & Kjær

This booklet sets out to explain the fundamentals of sound intensity measurement. Both theory and applications will be covered. Although the booklet is intended as a basic introduction, some knowledge of sound pressure measurement is assumed. If you are unfamiliar with this subject, you may wish to consult our companion booklet "Measuring Sound".

See page

Introduction 2

Sound Pressure and Sound Power..... 3

What is Sound Intensity? 4

Why Measure Sound Intensity? 5

Sound Fields 6-7

Pressure and Particle Velocity 8

How is Sound Intensity Measured? 9-10

The Sound Intensity Probe 11

Reference Levels 12

Some Examples 13

Using Sound Intensity to Determine Sound Power 14

See page

Spatial Averaging 15

What about Background Noise? 16

Noise Source Ranking 17

Intensity Mapping 18-19

Applications in Building Acoustics 20

Instrumentation 21

Making Measurements 22-23

Further Applications and Advanced Topics 24-25

Case Studies 26-29

Appendix: Measurement Limitations 30-33

Further Reading 34-36

Revision September 1993

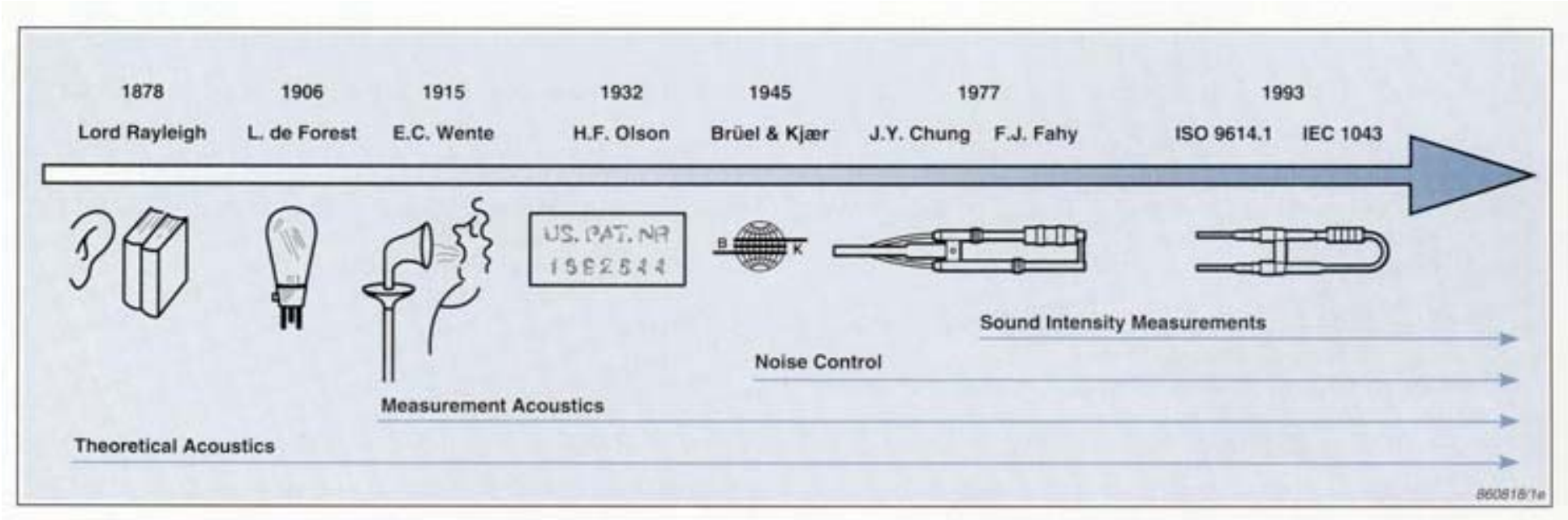
Introduction

Acoustic measurements and acoustic theory have not always progressed side by side. The publication of Lord Rayleigh's influential work, "The Theory of Sound", laid the foundations of modern acoustics. The quantity *sound intensity* was fundamental to this theory. But a full hundred years were to elapse before the emergence of a thoroughly practical method of measuring sound intensity.

Developments in electronics at the beginning of this century slowly brought measurement into step with theory. These included the triode amplifier invented by L. de Forest in 1906, and E. C. Wente's first condenser microphone, designed in 1915. A device patented by H. F. Olson in 1932 measured sound intensity but it apparently worked only under idealized conditions. Despite several other attempts no commercial device was produced.

The commercial era did not begin until 1977, when digital signal processing techniques were applied to the theory independently by F. J. Fahy and J. Y. Chung. And with advances in microphone design, reliable measurement at last became possible with two closely spaced microphones.

In the short space of time since this breakthrough the method has become established. While giving theoretical acousticians the chance to measure and visualize quantities that previously had been confined to their mathematical textbooks, it is also proving invaluable in many varied applications to the noise control engineer.

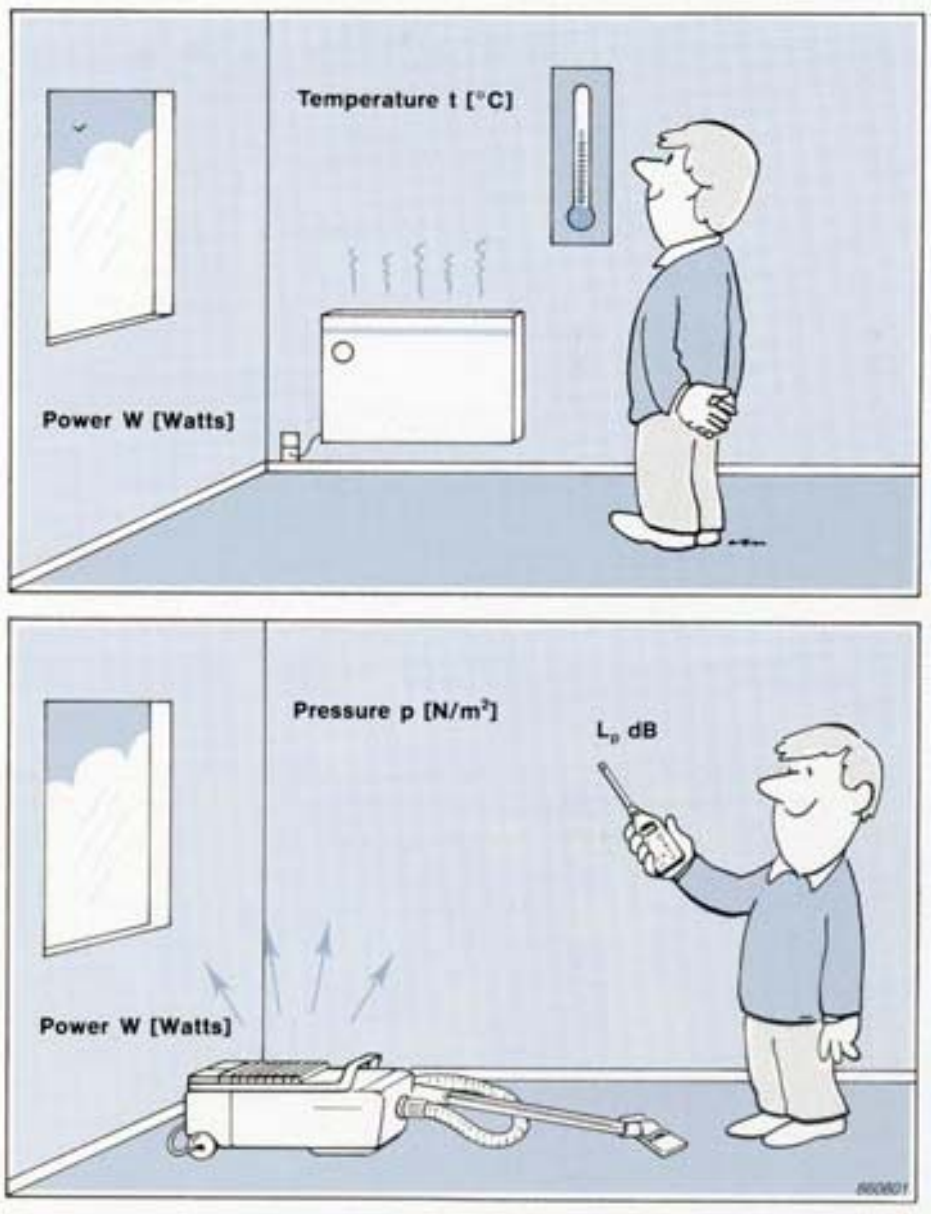


Sound Pressure and Sound Power

A sound source radiates power and this results in a sound pressure. Sound power is the cause. Sound pressure is the effect. Consider the following analogy. An electric heater radiates heat into a room and temperature is the effect. Temperature is also the physical quantity that makes us feel hot or cold. The temperature in the room is obviously dependent on the room itself, the insulation, and whether other sources of heat are present. But for the same electrical power input, the heater radiates the same power, practically independent of the environment. The relationship between sound power and sound pressure is similar. What we hear is sound pressure but it is caused by the sound power emitted from the source.

Too high a sound pressure may cause hearing damage. So when trying to quantify human response to sound, such as noise annoyance or the risk of hearing loss, pressure is the obvious quantity to measure. It is also relatively easy to measure: The pressure variations on the eardrum we perceive as sound are the same pressure variations which are detected on the diaphragm of a condenser microphone.

The sound pressure that we hear, or measure with a microphone is dependent on the distance from the source and the acoustic environment (or *sound field)* in which sound waves are present. This in turn depends on the size of the room and the sound absorption of the surfaces. So by measuring sound pressure we cannot necessarily quantify how much noise a machine makes. We have to find the sound power because this quantity is more or less independent of the environment and is the unique descriptor of the noisiness of a sound source.



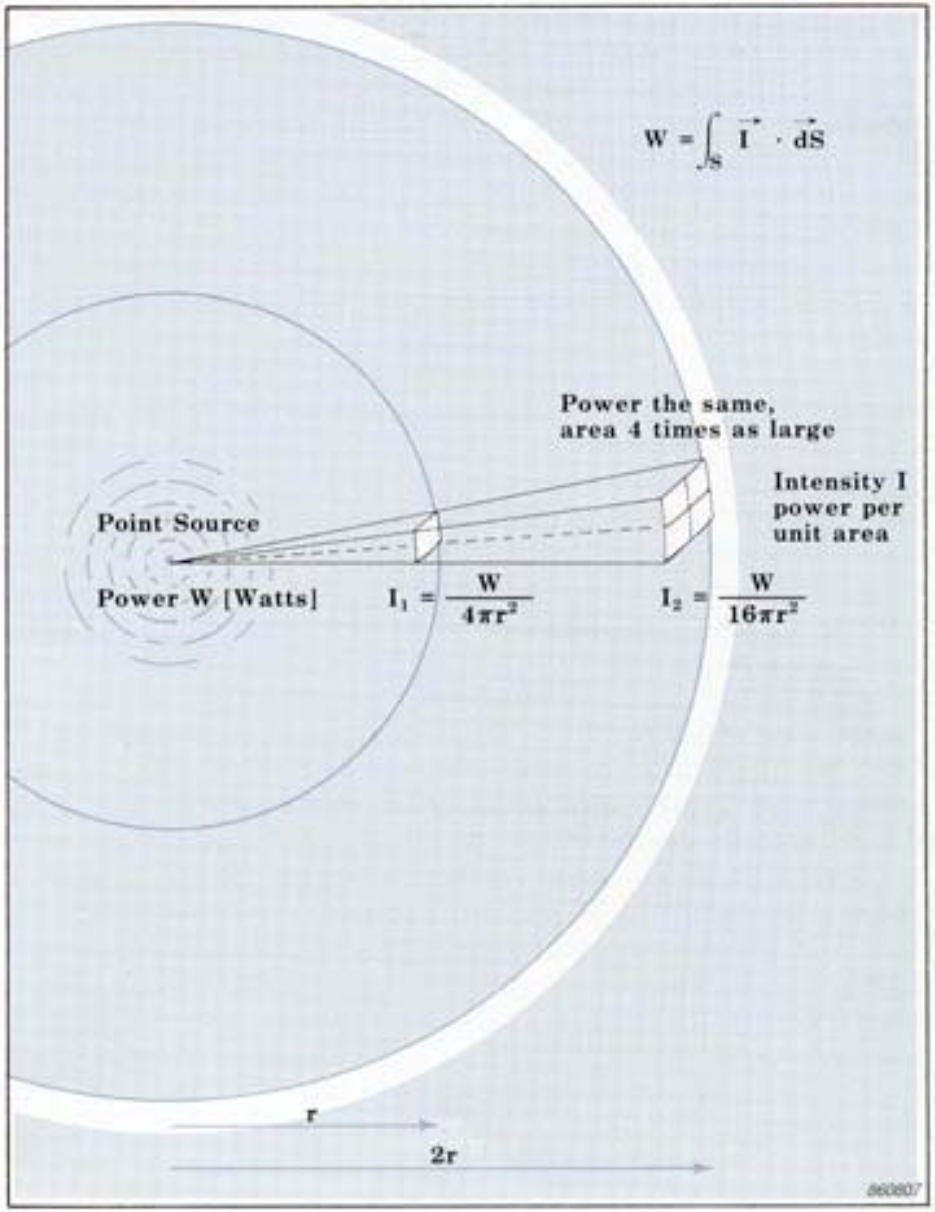
What is Sound Intensity?

Any piece of machinery that vibrates radiates acoustical energy. *Sound power* is the rate at which energy is radiated [energy per unit time). *Sound intensity* describes the rate of energy flow through a unit area. In the SI system of units the unit area is 1 m^2. And hence the units for sound intensity are Watts per square metre.

Sound intensity also gives a measure of direction as there will be energy flow in some directions but not in others. Therefore sound intensity is a *vector* quantity as it has both magnitude and direction. On the other hand pressure is a *scalar* quantity as it has magnitude only. Usually we measure the intensity in a direction *normal* (at 90°) to a specified unit area through which the sound energy is flowing.

We also need to state that sound intensity is the time-averaged rate of energy flow per unit area. In some cases energy may be travelling back and forth. This will not be measured; if there is no net energy flow there will be no net intensity.

In the diagram opposite the sound source is radiating energy. All this energy must pass through an area enclosing the source. Since intensity is the power per area, we can easily measure the normal *spatial-averaged* intensity over an area which encloses the source and then multiply it by the area to find the sound power. Note that intensity (and pressure) follows the inverse square law for free field propagation. This can be seen in the diagram, at a distance 2*r* from the source the area enclosing the source is 4 times as large as the area at a distance *r*. Yet the power radiated must be the same whatever the distance and consequently the intensity, the power per area, must decrease.



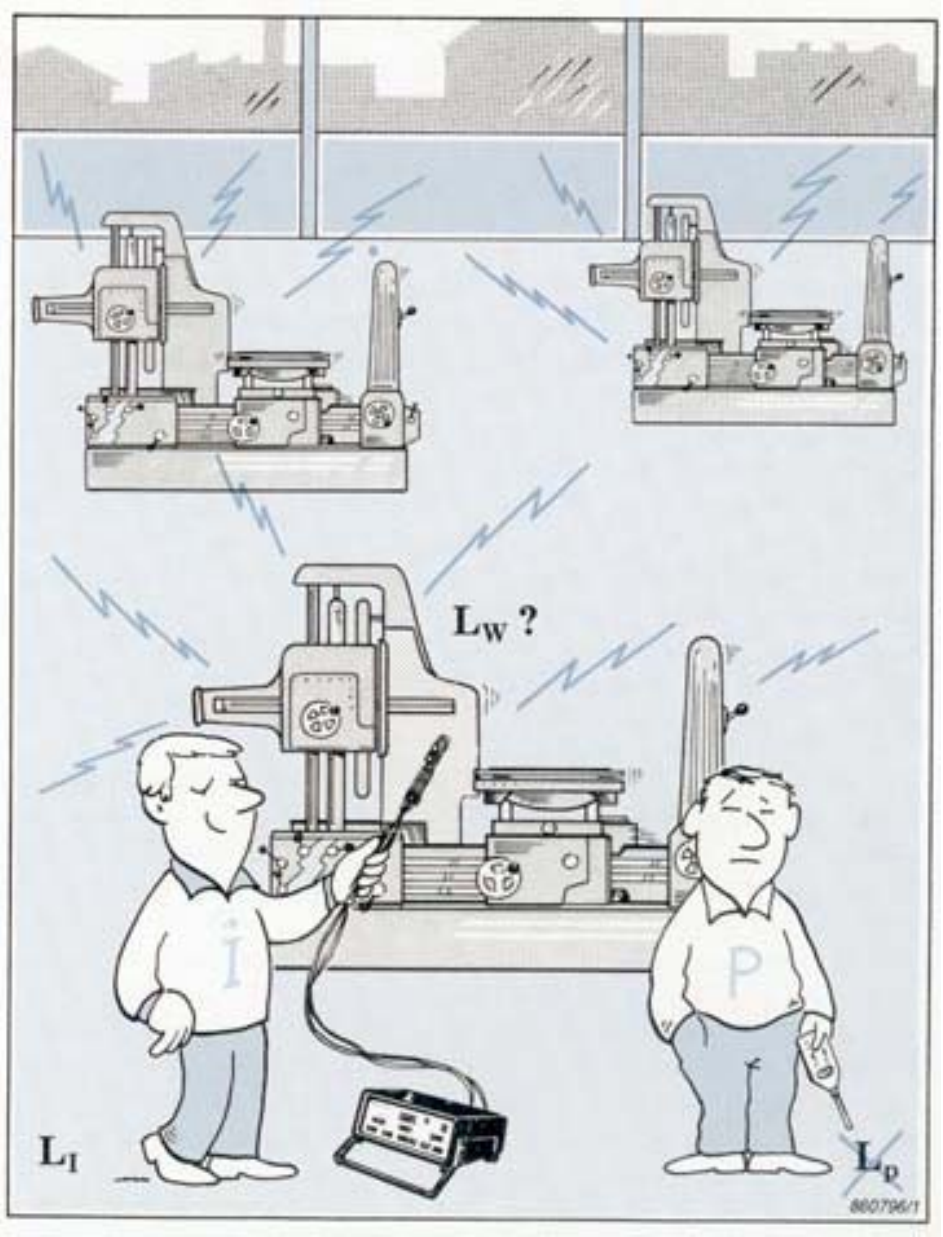
Why Measure Sound Intensity?

On the factory floor we can make sound pressure measurements and find out if the workers risk hearing damage. But once we have found this, we may well want to reduce the noise. To do this, we need to know how much noise is being radiated and by what machine. We therefore need to know the sound power of the individual machines and rank them in order of highest sound power. Once we have located the machine making most noise we may want to reduce the noise by locating the individual components radiating noise.

We can do all this with intensity measurements. Previously we could only measure pressure which is dependent on the sound field. Sound power can be related to sound pressure only under carefully controlled conditions where special assumptions are made about the sound field. Specially constructed rooms such as anechoic or reverberant chambers fulfil these requirements. Traditionally, to measure sound power, the noise source had to be placed in these rooms.

Sound intensity, however, can be measured in any sound field. No assumptions need to be made. This property allows all the measurements to be done directly in situ. And measurements on individual machines or individual components can be made even when all the others are radiating noise, because steady background noise makes no contribution to the sound power determined when measuring intensity.

Because sound intensity gives a measure of direction as well as magnitude it is also very useful when locating sources of sound. Therefore the radiation patterns of complex vibrating machinery can be studied in situ.



Sound Fields

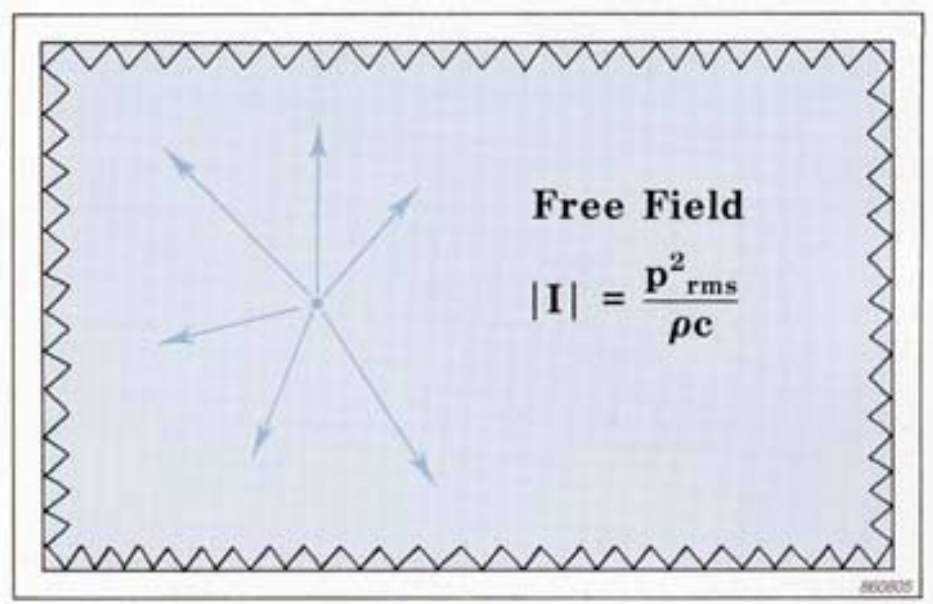
A sound field is a region where there is sound. It is classified according to the manner and the environment in which the sound waves travel. Some examples will now be described and the relationship between pressure and intensity discussed. This relationship is precisely known **only** in the first two special cases described below.

The Free Field

This term describes sound propagation in idealized free space where there are no reflections. These conditions hold in the open air (sufficiently far enough away from the ground) or in an anechoic room where all the sound striking the walls is absorbed. Free field propagation is characterized by a 6 dB drop in sound pressure level and intensity level (in the direction of sound propagation) each time the distance from the source is doubled. This is simply a statement of the inverse square law. The relationship between sound pressure and sound intensity (magnitude only) is also known. It gives one way of finding sound power which is described in the International Standard ISO 3745.

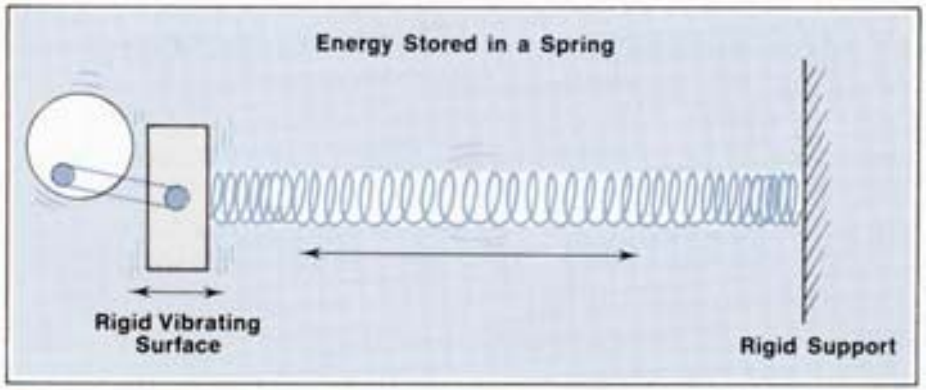
The Diffuse Field

In a diffuse field, sound is reflected so many times that it travels in all directions with equal magnitude and probability. This field is approximated in a reverberant room. Although the net intensity is zero, there is a theoretical relationship which relates the pressure in the room to the *one-sided Intensity,* I_x. This is the intensity in one direction, ignoring the equal and opposite component. One-sided intensity cannot be measured by a sound intensity analyzer but it is nevertheless a useful quantity: By measuring pressure we can use the relationship between pressure and one-sided intensity to find the sound power. This is described in ISO 3741.



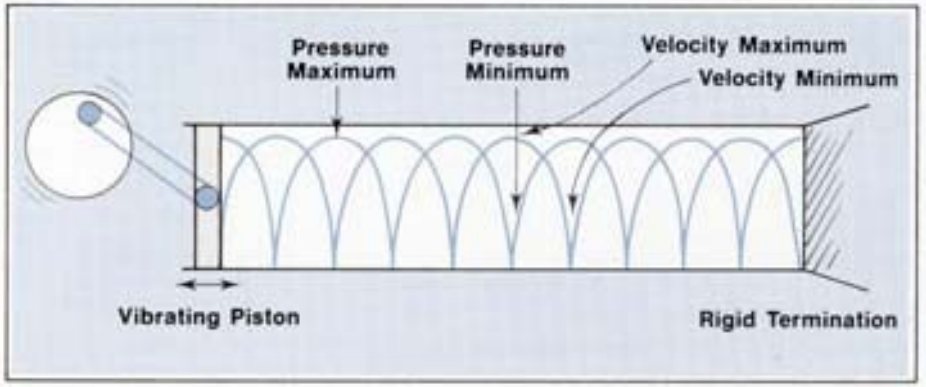
Active and Reactive Sound Fields

Sound propagation involves energy flow but there can still be a sound pressure even when there is no propagation. An *active* field is one where there is energy flow. In a pure *reactive* field, there is no energy flow. At any instant energy may be travelling outward, but it will always be returned at a later instant. The energy is stored as if in a spring. Hence the net intensity is zero. In general a sound field will have both active and reactive components. Pressure measurements for sound power in fields which are not well-defined can be unreliable, since the reactive part is unrelated to the power radiated. We can, however, measure sound intensity. Since sound intensity describes energy *flow,* there will be no contribution from the reactive component of the field. Two examples of reactive fields follow.



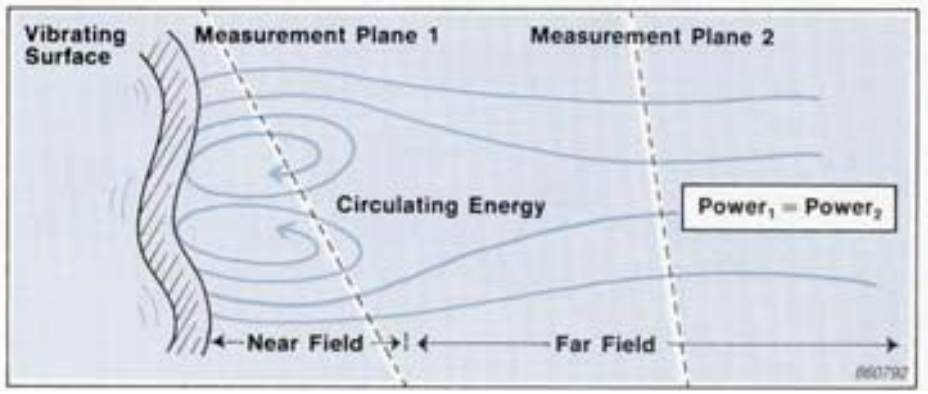
Standing Waves in a Pipe

Consider a piston exciting the air at one end of a tube. At the other end there is a termination which causes the sound waves to be reflected. The combination of the forward-travelling and reflected waves produces patterns of pressure maxima and minima which occur at fixed distances along the tube. If the termination is completely rigid all the energy is reflected and the net intensity is zero. With an absorptive termination some intensity will be measured. Standing waves are also present in rooms at low frequencies.



The Near Field of a Source

Very close to a source, the air acts as a mass-spring system which stores the energy. The energy circulates without propagating and the region in which it circulates is called the near field. Only sound intensity measurements for sound power determination can be made here. And because it is possible to get close to the source, the signal-to-noise ratio is improved.



Pressure and Particle Velocity

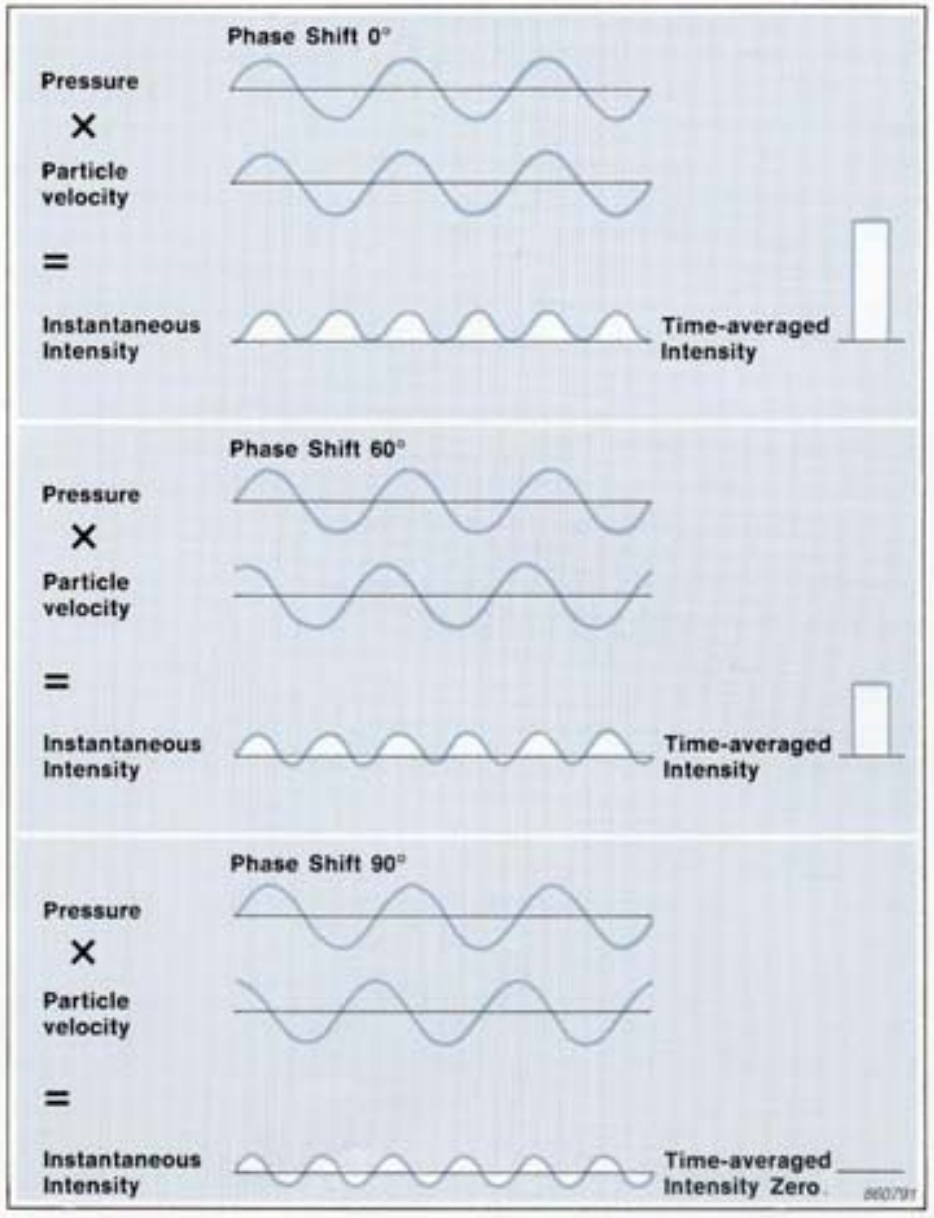
When a particle of air is displaced from its mean position there is a temporary increase in pressure. The pressure increase acts in two ways: to restore the particle to its original position, and to pass on the disturbance to the next particle. The cycle of pressure increases (compressions) and decreases (rarefactions) propagates through the medium as a sound wave. There are two important parameters in this process: the pressure (the local increases and decreases with respect to the ambient) and the velocity of the particles of air which oscillate about a fixed position. Sound intensity is the product of particle velocity and pressure. And, as can be seen from the transformation below, it is equivalent to the power per unit area definition given earlier.

Intensity = Pressure x Particle Velocity

$$= \frac{\text{Force}}{\text{Area}} \times \frac{\text{Distance}}{\text{Time}} = \frac{\text{Energy}}{\text{Area} \times \text{Time}} = \frac{\text{Power}}{\text{Area}}$$

In an active field, pressure and particle velocity vary simultaneously. A peak in the pressure signal occurs at the same time as a peak in the particle velocity signal. They are therefore said to be *in phase* and the product of the two signals gives a net intensity. In a reactive field the pressure and particle velocity are 90° *out of phase.* One is shifted a quarter of a wavelength with respect to the other. Multiplying the two signals together gives an *instantaneous* intensity signal varying sinusoidally about zero. Therefore the *time-averaged* intensity is zero.

In a diffuse field the pressure and particle velocity phase vary at random and so the net intensity is zero.



How is Sound Intensity Measured?

The Euler Equation: Finding the Particle Velocity

Sound intensity is the time-averaged product of the pressure and particle velocity. A single microphone can measure pressure — this is not a problem. But measuring particle velocity is not as simple. The particle velocity, however, can be related to the *pressure gradient* (the rate at which the instantaneous pressure changes with distance) with the linearized Euler equation. With this equation, it is possible to measure this pressure gradient with two closely spaced microphones and relate it to particle velocity.

Euler's equation is essentially Newton's second law applied to a fluid. Newton's Second Law relates the acceleration given to a mass to the force acting on it. If we know the force and the mass we can find the acceleration and then integrate it with respect to time to find the velocity.

With Euler's equation it is the pressure *gradient* that accelerates a fluid of density *p.* With knowledge of the pressure gradient and the density of the fluid, the particle acceleration can be calculated. Integrating the acceleration signal then gives the particle velocity.

Sir Isaac Newton

$$F = ma$$

$$a = \frac{F}{m}$$

$$v = \int \frac{F}{m}\, dt$$

Leonhard Euler

$$a = -\frac{1}{\rho}\, \text{grad}\ p$$

In one direction

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r}$$

$$u = -\int \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r}\, dt$$

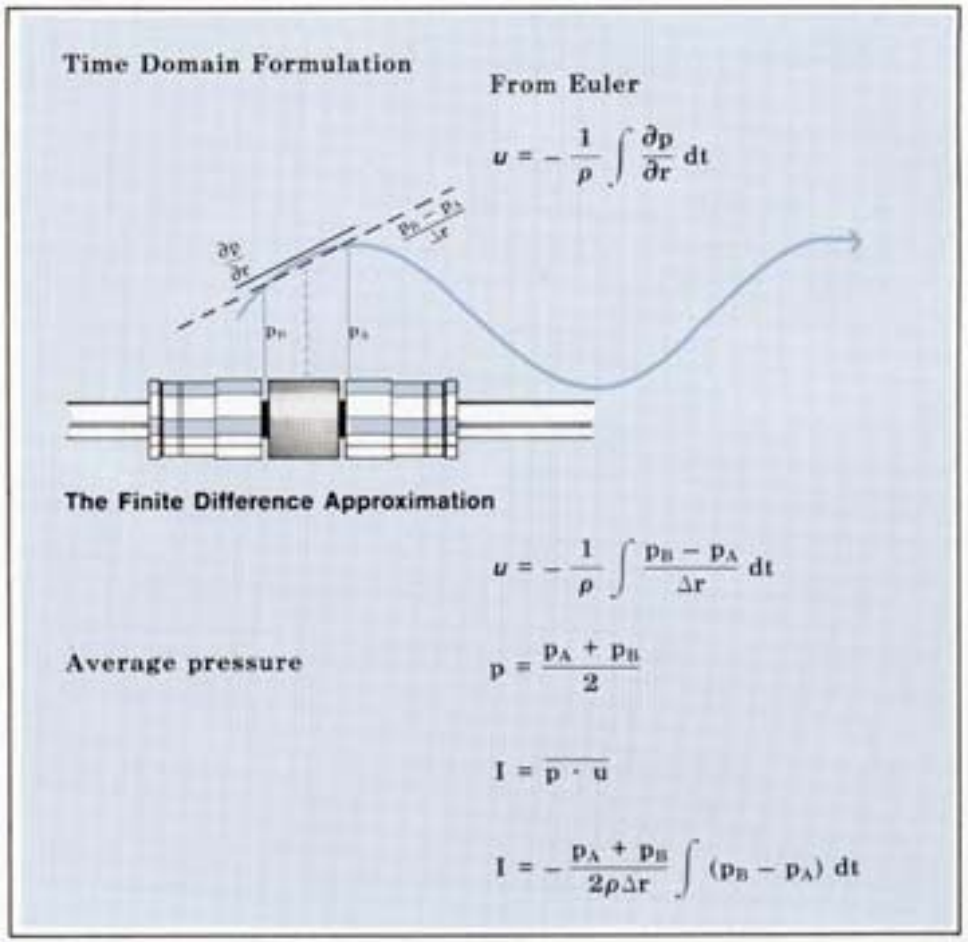
The Finite Difference Approximation

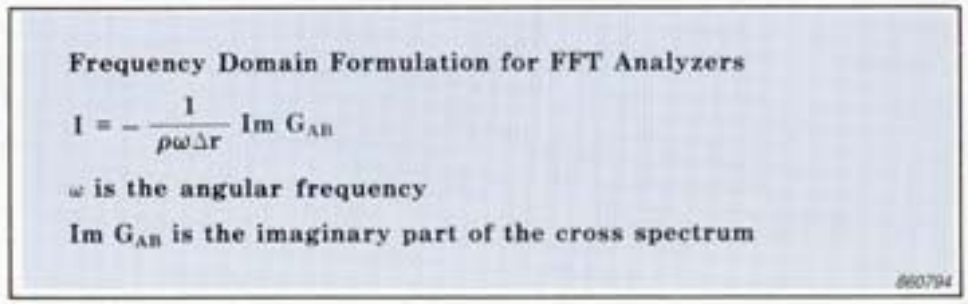
The pressure gradient is a continuous function, that is, a smoothly changing curve. With two closely spaced microphones it is possible to obtain a straight line approximation to the pressure gradient by taking the difference in pressure and dividing by the distance between them. This is called a finite difference approximation. It can be thought of as an attempt to draw the tangent of a circle by drawing a straight line between two points on the circumference.

The Intensity Calculation

The pressure gradient signal must now be integrated to give the particle velocity. The estimate of particle velocity is made at a position in the acoustic centre of the probe, between the two microphones. The pressure is also approximated at this point by taking the average pressure of the two microphones. The pressure and particle velocity signals are then multiplied together and time averaging gives the intensity.

A sound intensity analyzing system consists of a probe and an analyzer. The probe simply measures the pressure at the two microphones. The analyzer does the integration and calculations necessary to find the sound intensity. These equations are not new. What is new is the use of modern signal processing techniques to implement the equation. This can be done in two ways: by directly using integrators and filters (analogue or digital) to implement the equation step by step, or by using an FFT analyzer. The latter relates the intensity to the imaginary part of the cross spectrum (a mathematical term) of two microphone signals. The formulations are equivalent; both give the sound intensity.





The Sound Intensity Probe

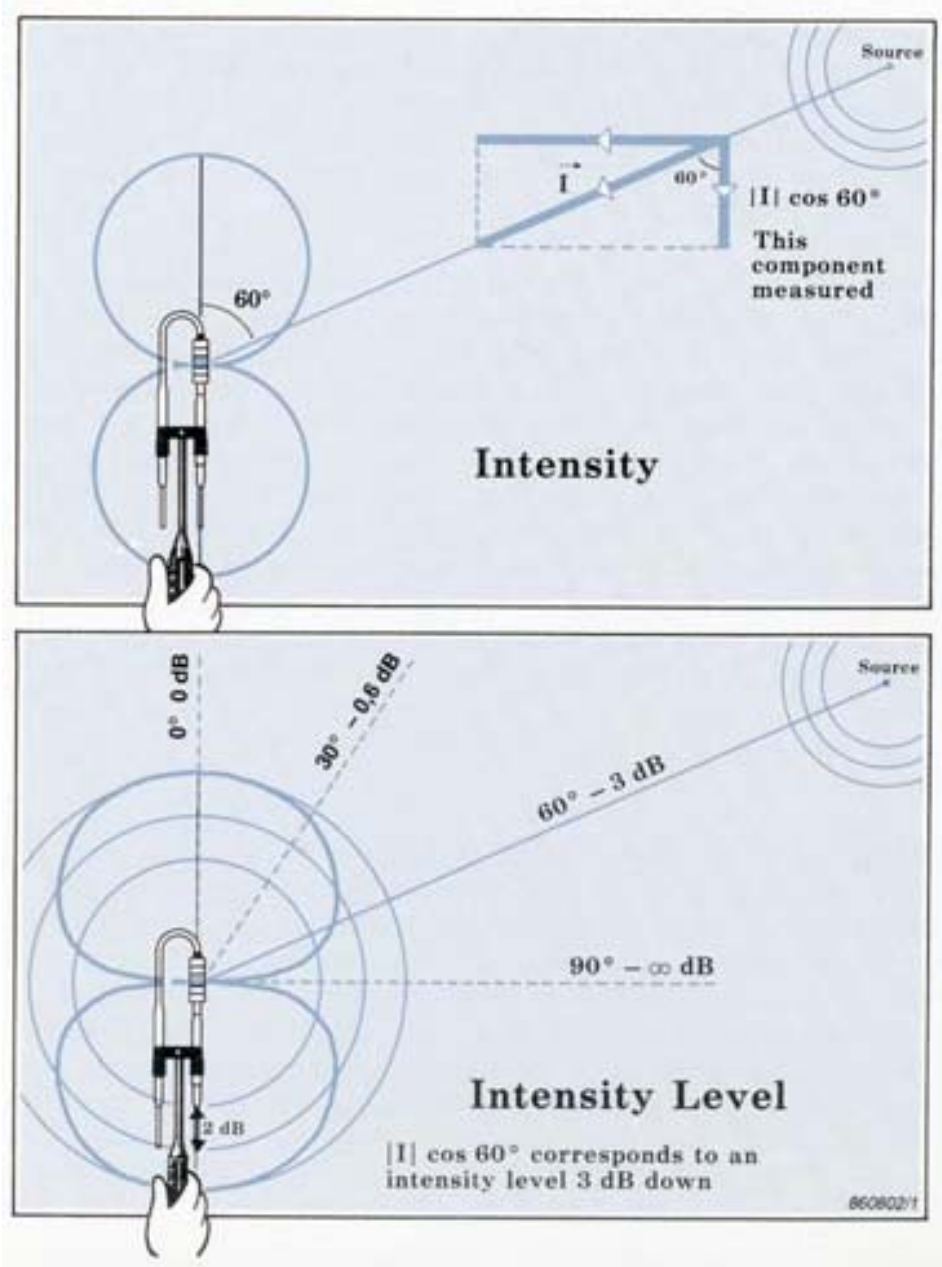
The Brüel&Kjær probe has two microphones mounted face to face with a solid spacer in between. This arrangement has been found to have better frequency response and directivity characteristics than side-by-side, back-to-back or face-to-face *without* solid spacer arrangements. Three solid spacers define the effective microphone separation to 6, 12 or 50 mm. The choice of spacer depends on the frequency range to be covered. Half-inch microphones are used for lower frequencies. But smaller quarter-inch microphones are used at high frequencies to reduce interference effects.

Directivity Characteristics

The directivity characteristic for the sound intensity analyzing system looks (two-dimensionally) like a figure-of-eight pattern — known as a cosine characteristic. This is due to the probe and the calculation within the analyzer.

Since pressure is a scalar quantity, a pressure transducer should have an equal response, no matter what the direction of sound incidence (that is, we need an omnidirectional characteristic). In contrast, sound intensity is a vector quantity. With a two-microphone probe, we do not measure the vector however; we measure the component in one direction, along the probe axis. The full vector is made up of three mutually perpendicular components (at 90° to each other) — one for each coordinate direction.

For sound incident at 90° to the axis there is no component along the probe's axis, as there will be no difference in the pressure signals. Hence there will be zero particle velocity and zero intensity. For sound incident at an arbitrary angle *6* to the axis the intensity component along the axis will be reduced by the factor cosθ. This reduction produces the cosine directivity characteristic.

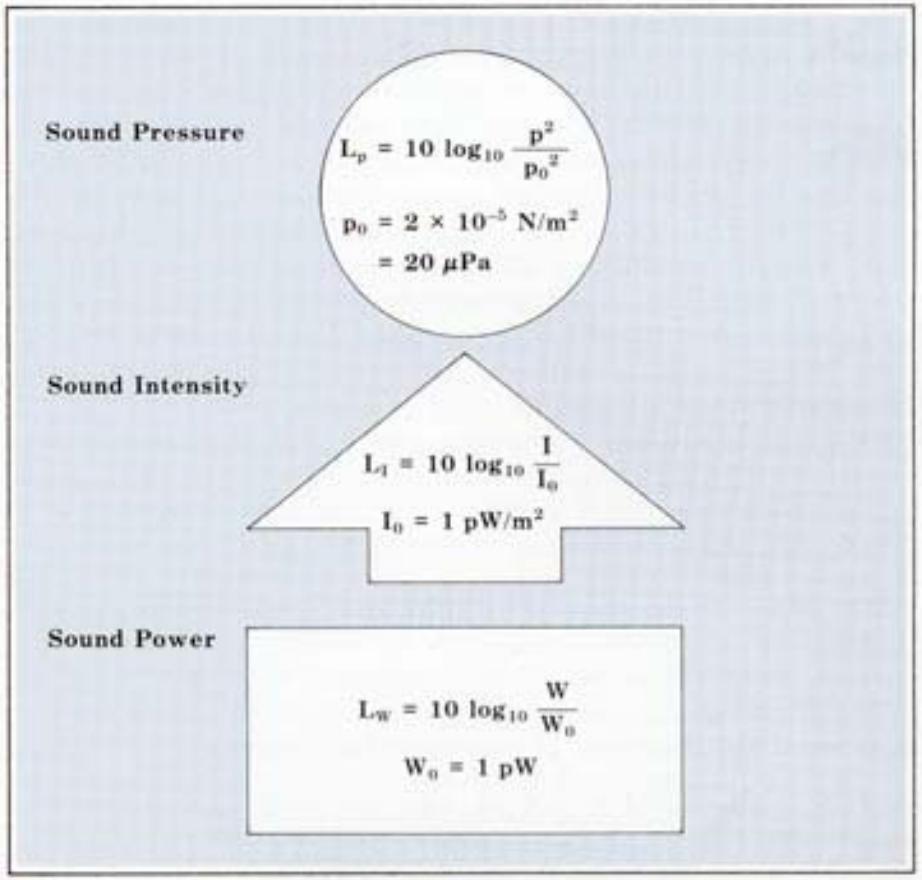


Reference Levels

The sound pressure, intensity, power and particle velocity levels, (L_p, L_I, L_w and L_u respectively), are all measured in dBs. Decibels are a ratio of the specified quantity measured against some reference. For pressure the reference level is chosen so that it corresponds approximately to the threshold of hearing.

Other reference levels have been approximately related to this by using the free field relations between pressure and intensity, and pressure and particle velocity. And in the free field we will obtain the same dB reading irrespective of whether we measure pressure, intensity or particle velocity (measured in the direction of propagation). Actually, because round numbers have been chosen for the reference levels, there is a slight difference in levels. The actual difference depends on the value of the characteristic impedance, ρc, of the medium in which it is measured. Here ρ is the density and c the speed of sound in the medium. The difference is usually negligible in air except at high altitudes. To avoid possible confusion with pressure levels, sound power levels are sometimes given in bels — 10 dB equals 1 bel.

In the free field the pressure and intensity levels in the direction of propagation are numerically the same. However, intensity measurements in the free field are not needed. In practice, we will not measure in a free field and so there will be a difference between the pressure and intensity levels. This difference is an important quantity known as the pressure-intensity index (previously known as the phase index or reactivity index with different sign).



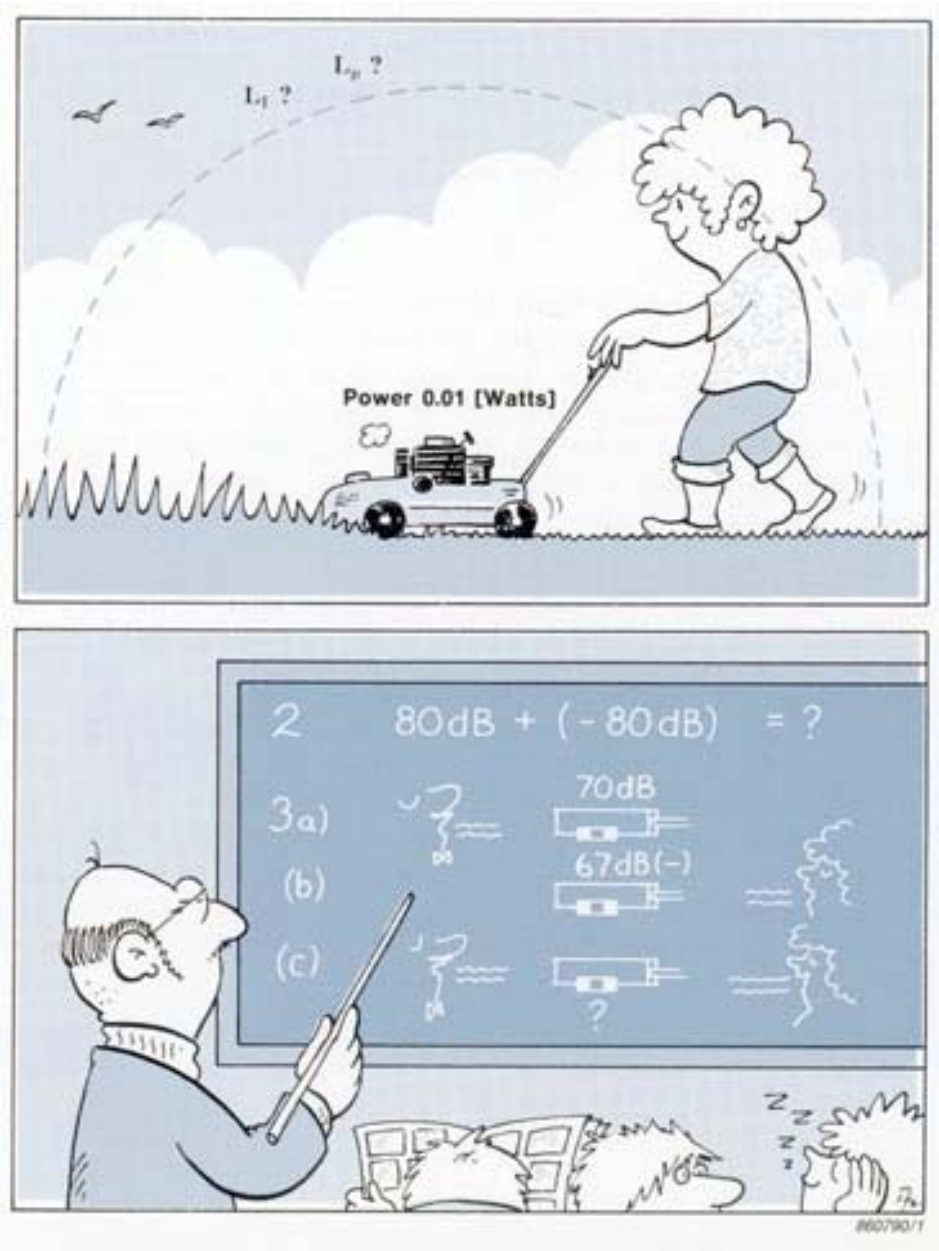
Some Examples

Working with the various reference levels and with dBs is often a source of confusion. Some examples are given to be of help.

1. A lawn mower radiates 0.01 watts acoustic power. What are the approximate sound pressure and intensity levels 1.5 m away? In the open air we can assume free field radiation and we will assume that the ground is perfectly reflecting. The power is radiated through hemispheres of surface area $27\pi r^2$. At 1.5 m the surface area is about 14 m^2. Therefore the intensity is $^{0.01}/_{14}$ W/m^2 and the intensity level is 88.5 dB re 1 pW/m^2. In the free field the pressure level will be approximately the same numerically: 88.5 dB re 20 μ Pa.

2. The question at the top of the board opposite highlights the confusion, especially with negative levels. Here the -80dB simply means that the intensity is so low that it is below the reference level. Hence the level *(not the direction)* is negative. Therefore the sum of the two levels will still be very close to 80 dB because the contribution of -80 dB is negligible. In fact, an intensity level as low as this will never be observed or measured in practice.

3. Now we have the case of adding intensity levels in different directions, a kind of vector sum. We want to find the intensity level when both people speak at once. Generally, we cannot simply add or subtract intensity levels; we have to convert back to intensity using $I = I_0\ 10^{L_I/10}$. However, knowing that 3dB represents a factor of two allows us to make a short cut. The negative-going intensity level is 3dB down on the positive-going intensity level and therefore half the intensity travels back to the first speaker. This corresponds to a 3dB drop in the positive-going intensity and so the answer is 67 dB.



Using Sound Intensity to Determine Sound Power

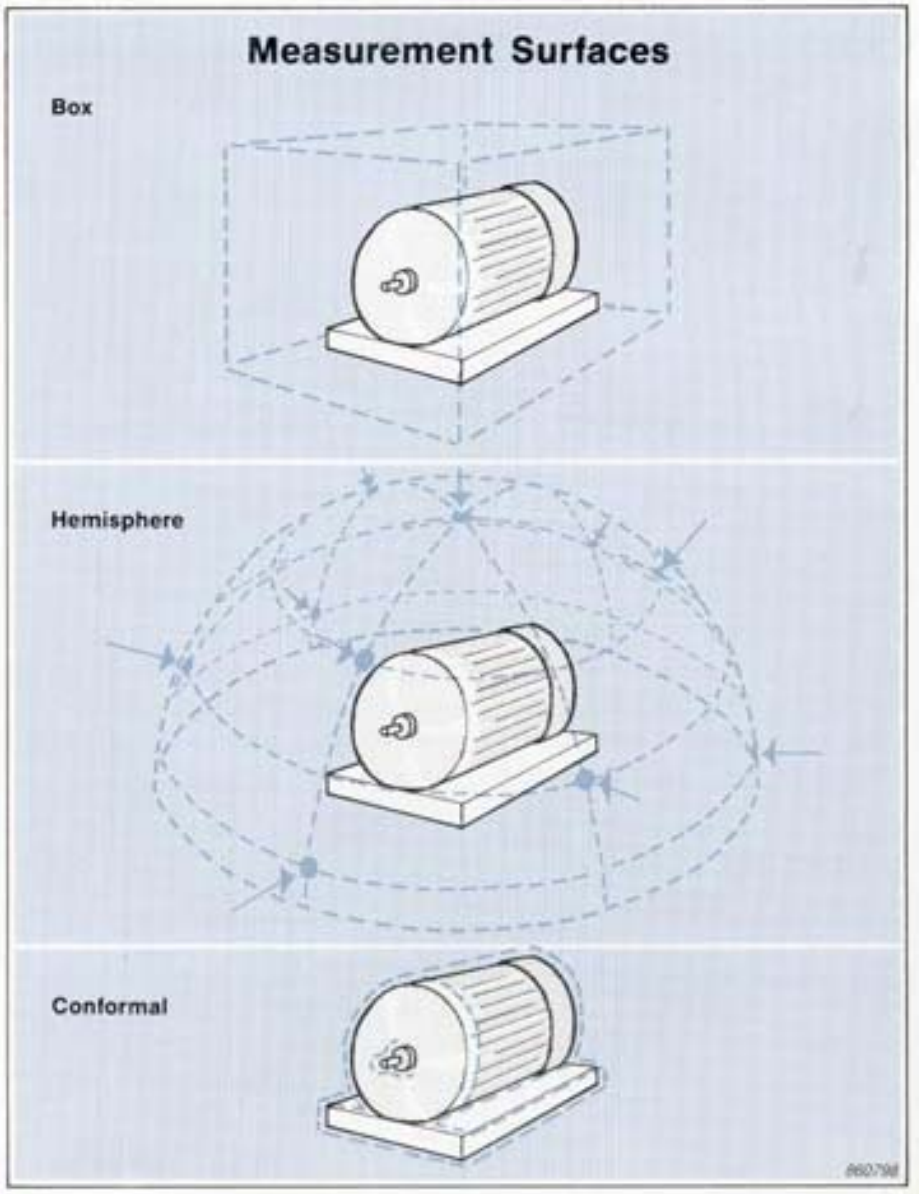
The use of sound intensity rather than sound pressure to determine sound power means that measurements can be made in situ, with steady background noise and in the near field of machines. It is above all a simple technique. The sound power is the average normal intensity over a surface enclosing the source, multiplied by the surface area. First we need to define this hypothetical surface:

We can choose any enclosing surface as long as no other sources or sinks (absorbers of sound) are present within the surface. The floor is assumed to reflect all the power and so need not included in the measuring surface. The surface may, in theory, be any distance from the source. Here are three examples:

First, the box. This can be any shape and size. This surface is easy to define and the planar surfaces make averaging the intensity over the surface a simple matter. The partial sound powers can be found from each side and added.

Second, the hemisphere. This shape is most likely to give the least number of measuring points. For an omnidirectional source in the free field the intensity will be constant over a hemisphere. International Standard ISO 3745 (sound power from pressure measurements) recommends starting with ten measurement positions; three microphone positions on three radii and one on the top of the hemisphere. If the intensity varies too much over this surface, the number of positions should be increased.

Third, the conformal shape. This allows near field measurements which will improve the signal-to-noise ratio. The measured intensity can also be related back to the specific source locations.



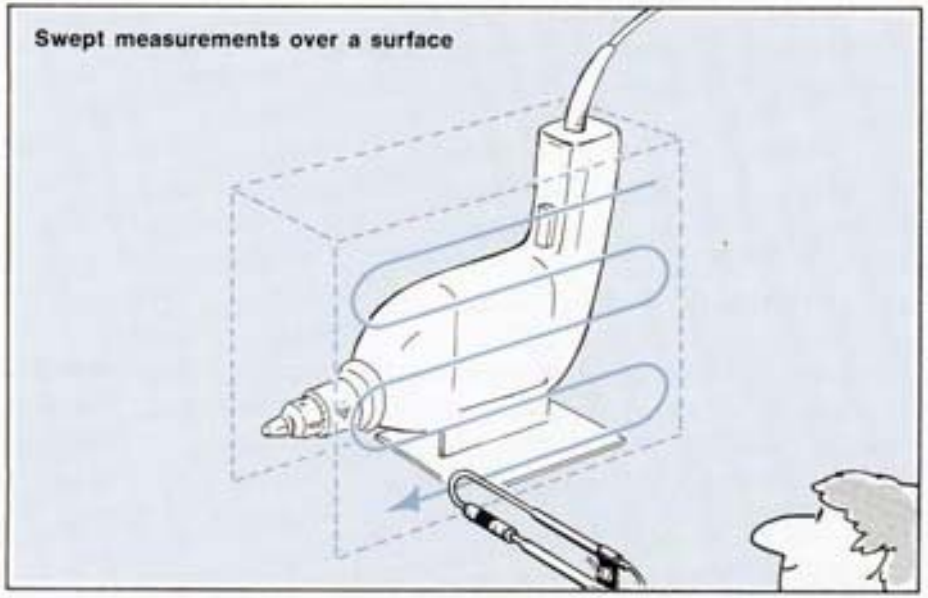
Spatial Averaging

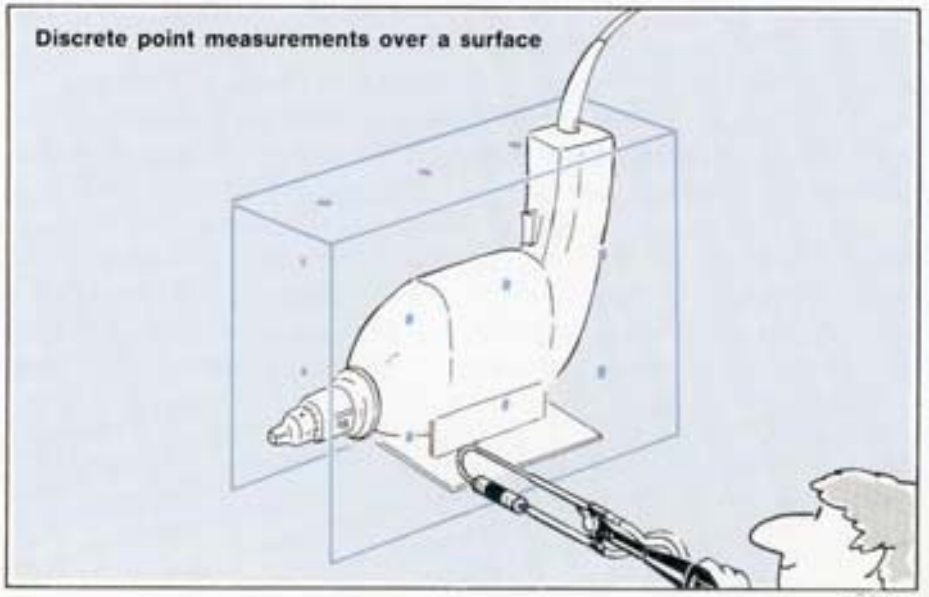
After a surface has been defined, we need to spatially average the intensity values measured normal to the surface. Note that the surface can be defined with a physical grid or just as distances from reference points. To obtain an average intensity value from each side, one of two spatial averaging techniques can be used:

Swept measurements over the surface
With a suitably long averaging time, the probe is simply swept over the surface, as if the surface is being painted. This gives a single-value spatial average intensity. Multiplying by the area gives the sound power from this surface. Then the sound power contributions from all the surfaces are added.

Discrete Point Averaging
Another method of averaging is to divide up the side into small segments and measure the sound intensity in each segment. The measuring points are frequently defined by a grid. This can be a frame with string or wire although a ruler or tape measure can also be used. The results are averaged and multiplied by the surface area to find the sound power from the side.

Neither method is best for all applications and in some cases both methods may be useful. Because the swept technique is mathematically a better approximation to the continuous space integral, it is often more accurate. But care needs to be taken to sweep the probe at a constant rate and to cover the surface equally. The discrete point method, however, is often more repeatable. Both can easily be automated if repeated measurements have to be made. This also improves the accuracy.





What about Background Noise?

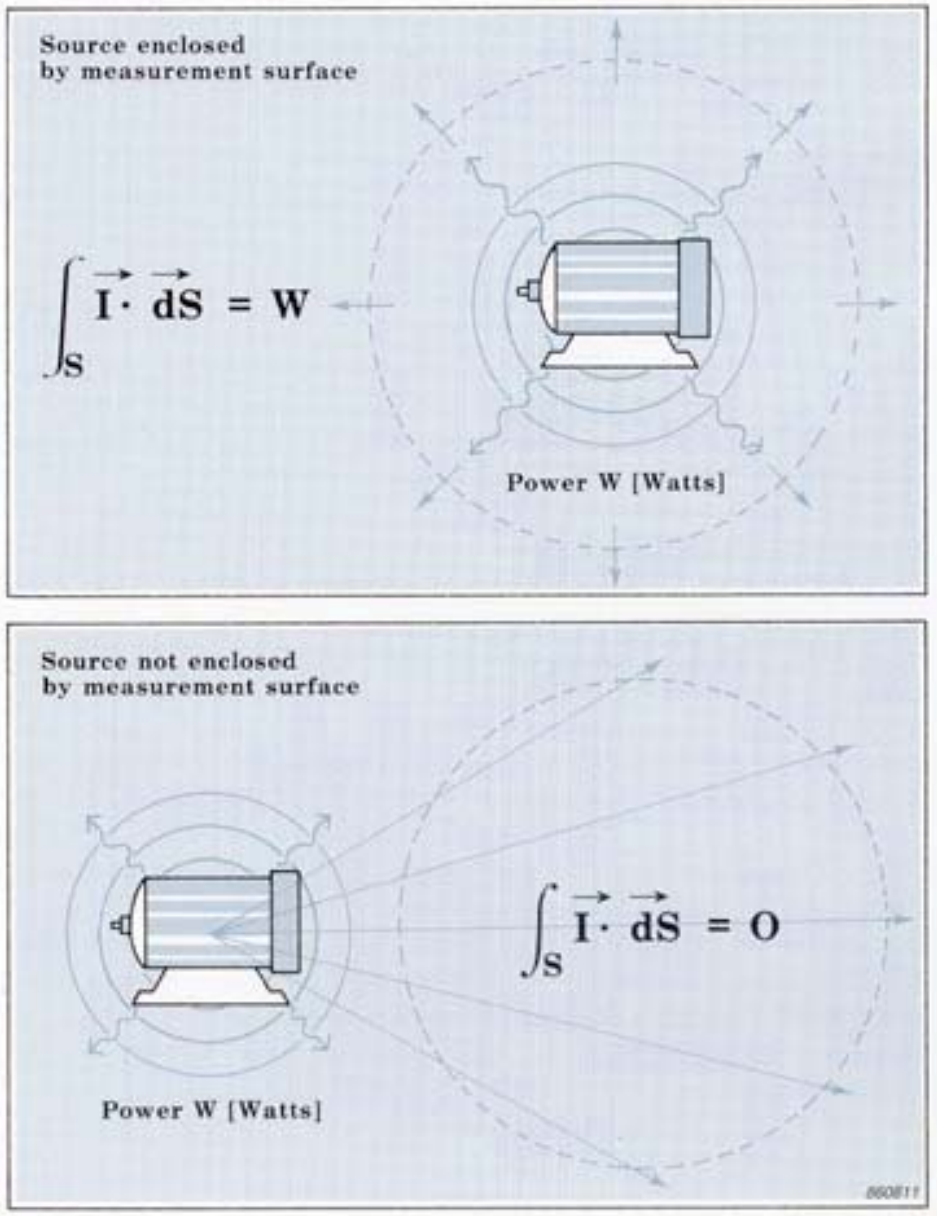
One of the main advantages of the intensity method of sound power determination is that high levels of steady background noise are not important.

Let us imagine a surface in space — any closed volume will do. If a sound source is present within the closed surface then we can measure the average intensity over the surface of the box and multiply by the area to find the total sound power radiated by the source.

If the source were then moved outside the box and we tried to find the sound power we would measure zero. We will always measure some energy flowing in on a side. But the energy will flow out on other sides and so the contribution to the sound power radiated from the box will be zero.

For this to be true the background noise level must not vary significantly with time. If this condition is met the noise is said to be *stationary.* Note; with a long enough averaging time, small random fluctuations in level will not matter. A further condition is that there must be no absorption within the box. Otherwise some background noise will not flow out of the box again.

Background noise can be regarded as sources outside the measurement box and will have no effect on the measured sound power of the source. In practice this means that sound power can be measured to an accuracy of 1 dB from sources as much as 10 dB lower than the background noise. If background noise is a problem, then choosing a smaller measurement surface will improve the signal-to-noise ratio.

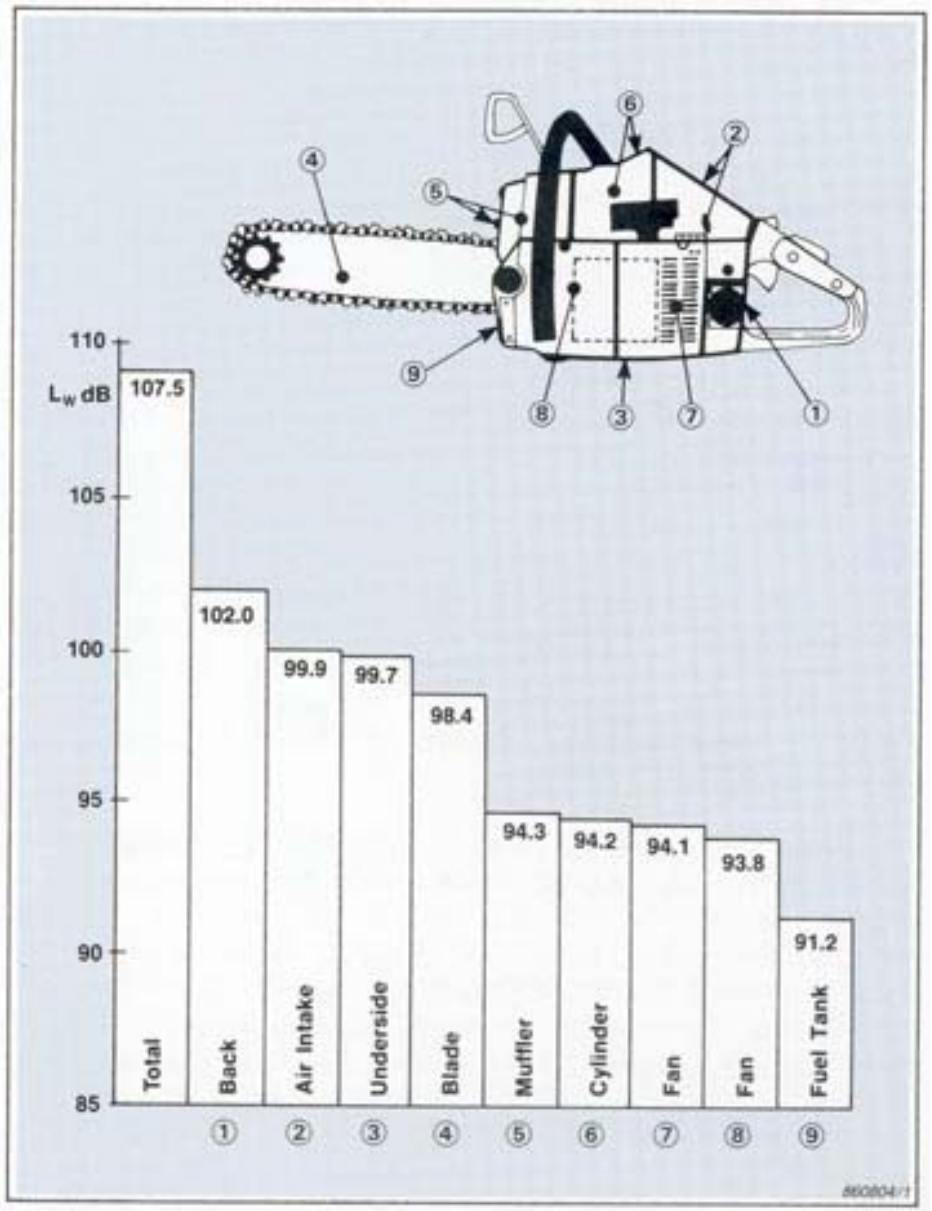


Noise Source Ranking

A complicated structure may radiate sound from several sources and absorb sound in other places. To evaluate the effectiveness of noise reduction methods we need to know how much noise is being radiated by the individual components of machines. This means finding the sound power from the components of a machine.

This is simple with sound intensity measurements because we can define a measurement surface which can enclose single components. All the other noise radiating components can be treated as background noise — provided the noise is stationary. Furthermore the total sound power can be found simply by adding the partial sound powers from all the noise radiating components. In the chain saw study shown opposite it was not possible to enclose all the individual sources. But the study still revealed that several surfaces were responsible for the noise. In order for there to be a significant reduction in the overall level, several components would have to be treated.

The intensity technique is straightforward. An investigation can be performed in situ, which is a great improvement on existing techniques. Previously, individual parts of a complex structure, a diesel engine for example, had to be isolated with soundproof enclosures. The pressure level from this component could be measured only if the machine were placed in an anechoic or reverberant room. This procedure often took several weeks.



Intensity Mapping

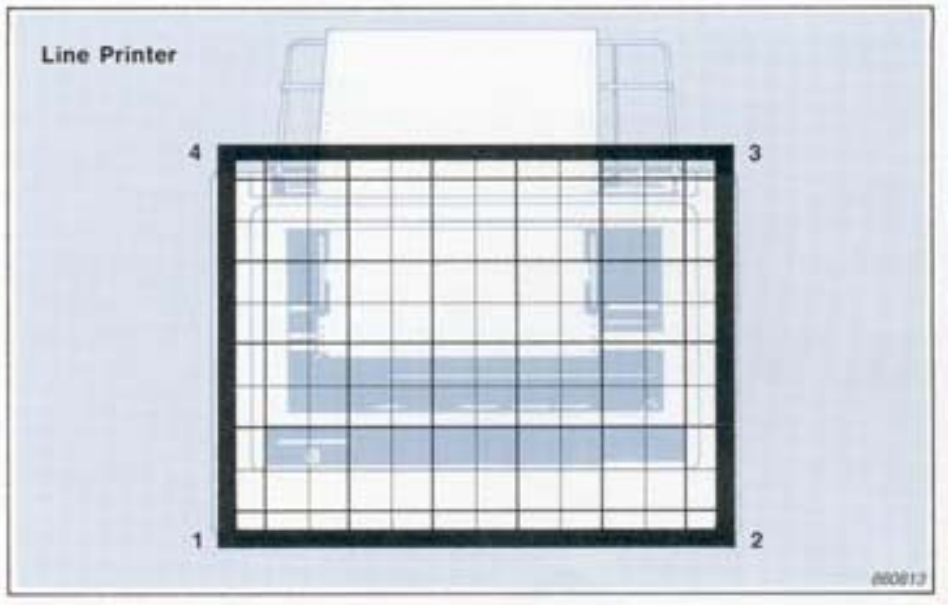
Every noise control problem is first of all a problem of location and identification of the source. Sound intensity measurement offers several ways of doing this which have considerable advantages over older techniques.

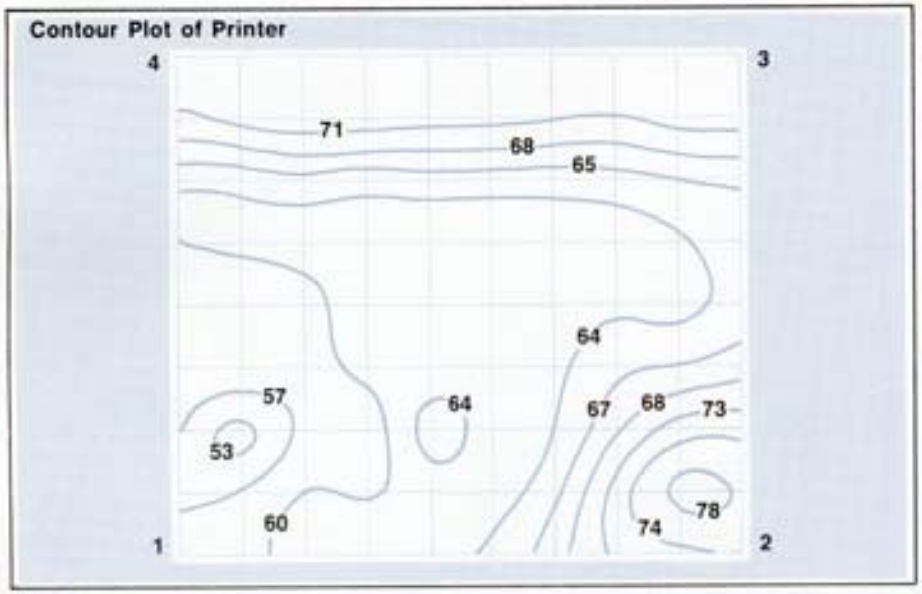
Contour and Three-Dimensional Plots
Contour and 3-D plots give a more detailed picture of the sound field generated by a source. Several sources and/or sinks can then be identified with accuracy.

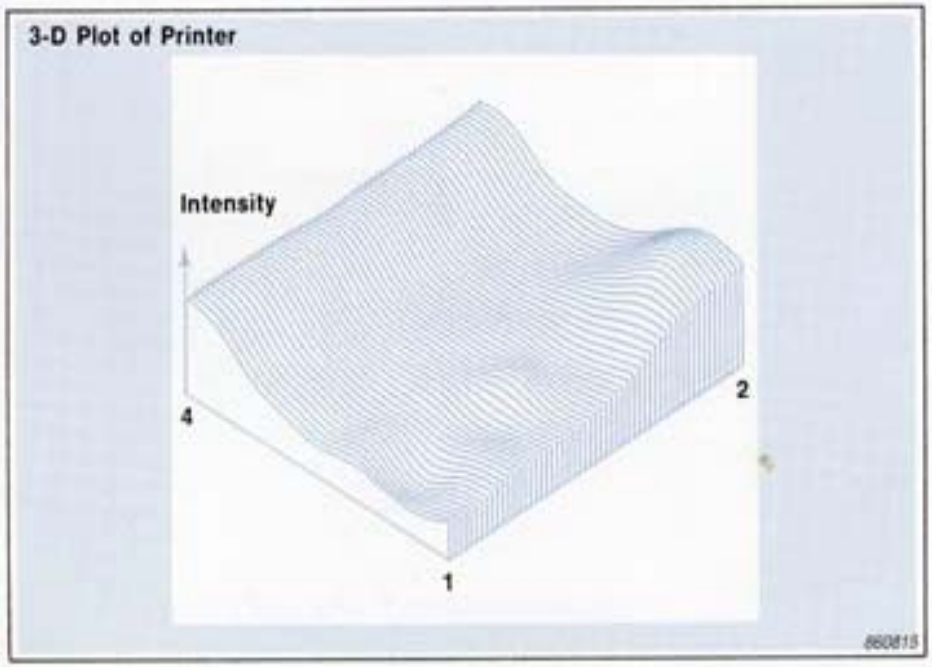
A grid is set up to define a surface. Sound intensity measurements normal to the surface are made from a number of equally spaced points on the surface. We can use the same measurements to calculate the sound power over the grid. These values are then stored. There is now a matrix of intensity levels — one value for each point. Lines of equal intensity can be drawn by interpolating and joining up points of equal intensity. These are sometimes called iso-intensity lines and they can be drawn either at single frequencies or for an overall level. A separate plot can be made for negative-going intensity which can be used to locate sinks of sound energy.

The same data can be used to generate 3-D plots which provide easy visualization of the sound field generated by a source. Three-dimensional plots are plots of the intensity level (on the vertical axis) over the grid. Again, we can plot the positive- or the negative-going intensity. It is, however, necessary to have some post-processing equipment both to store data and to make the calculations. A contour and 3-D plot for the printer are shown opposite. Most noise radiates from the paper opening at the top and the opening for the switch in the lower right corner.

We can, of course, also make contour maps and 3-D plots with pressure measurements. But intensity maps can be made in the near field where the correlation between the measured intensity levels and the source position is greater. This increases the resolution. Furthermore, both sinks and sources can be identified with intensity and measurements can be made in any acoustic environment.



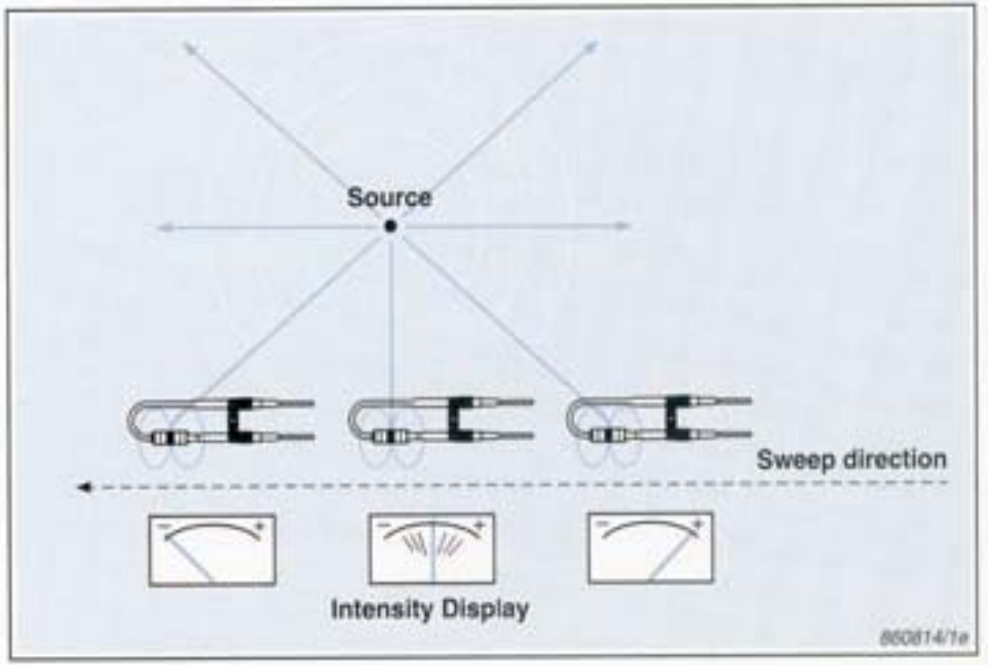




Source Location — the Null Search Method

As a quick and easy test we can make use of the probe's directional characteristic. Sound incident at 85° to the axis will be recorded as positive-going intensity, whereas sound at 95° will give negative-going intensity. Therefore there is a change in direction for only a small change in angle.

While we watch the display, the probe is swept so that its axis makes a line parallel to the plane on which we think the source is located. At some point, the direction will suddenly change. This position is identified where the display alternates rapidly between positive- and negative-going intensity. Here the sound must be incident on the probe at 90° to its axis and thus we have located the source. This method is useful when only one source is dominant — other sources or sinks may confuse the results.



Applications in Building Acoustics

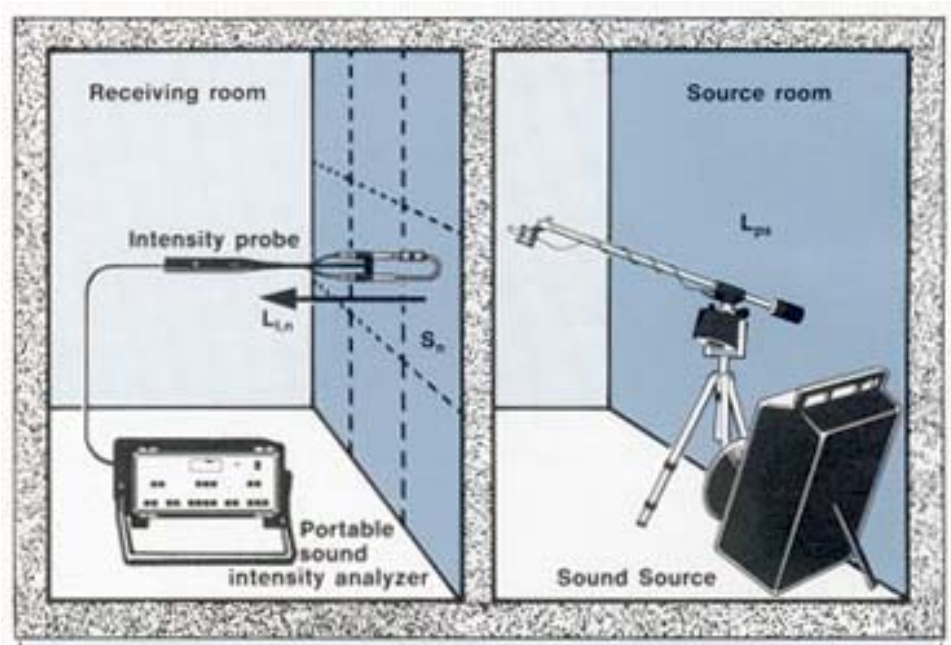
Measuring Airborne Sound Insulation

Sound intensity measurement has many applications in building acoustics; quantities such as noise reduction and acoustic absorption are fundamentally related to sound power. Therefore, intensity rather than pressure is the logical quantity to measure. For example, sound intensity measurements provide an alternative approach for measuring airborne sound insulation.

Measurements of the sound reduction index of a building element can be carried out in the laboratory or in situ, as shown in the diagram. In the source room the spatially averaged sound pressure level is calculated from sound pressure measurements. In the receiving room, a grid applied to the measurement surface defines the areas of interest. The average sound intensity flowing through each grid-segment can be measured directly by using a sound intensity analyzing system. The sound power emitted by each segment in the grid is simply the average sound intensity multiplied by the segment's area.

Since the flow of sound intensity through any surface in the room may be examined, it is possible to measure the contribution of the various flanking and leakage transmissions towards the total power in the receiving room.

A significant advantage of the intensity approach is that the apparent sound reduction index R'_n for any area on the measurement grid may be found. So if a compound partition is to be studied, for example a wall containing a window, R'_n may be found for both the wall material and the glass.



Apparent sound reduction index for surface S_n

$$R'_n = L_{ps} - 6\ dB - L_{I,n} + 10\ Log\ \frac{S}{S_n}$$

L_{ps} = Spatially averaged sound pressure level in source room

S = Area of party wall

S_n = Area of one grid section

$L_{I,n}$ = Average intensity over surface area S_n

Apparent sound reduction index for surface S

$$R' = -10\ \log \sum_{n=1}^{N} 10^{\frac{-R'_n}{10}}$$

870613/1

Instrumentation

There are three essential components in a sound intensity analyzing system: analyzer, probe and calibrator. Brüel&Kjær makes a complete range of these components, as well as providing postprocessing software packages, to give a choice of systems dedicated to intensity measurement.

The Analyzer

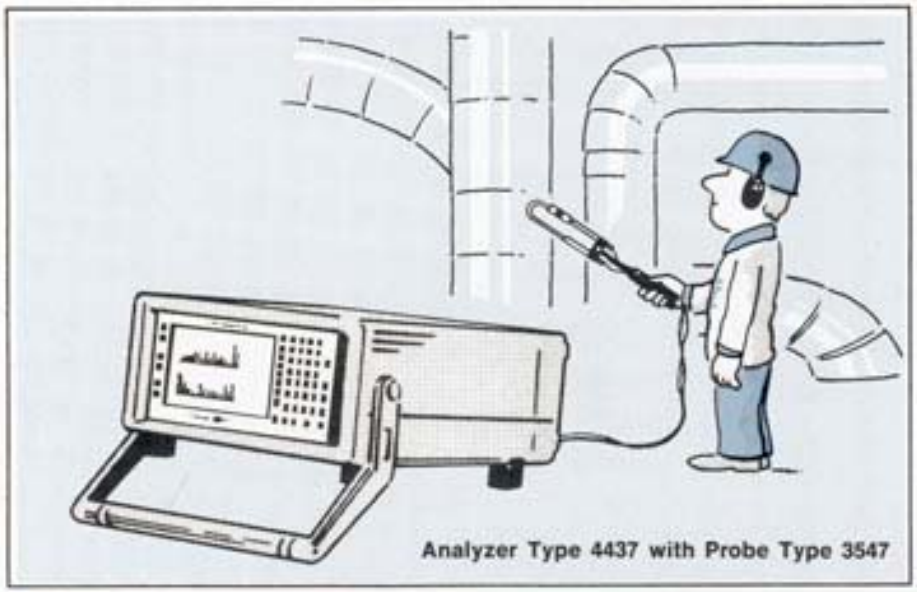
Brüel&Kjær produces many different intensity analyzers for laboratory and field use. Some examples are given here. The Type 2133 is a real-time analyzer with digital filters for parallel analysis of 1/1-, 1/3- and 1/12-octave bands. Dual channel analyzers such as Type 2032 use the Fast Fourier Transform to give the cross spectrum, and hence the intensity in narrow bands. For in-situ measurements, however, portable instruments are advantageous. Here the Type 4437 is an economical solution. It measures the intensity in 1/1-octave bands, is battery operated and is easily portable.

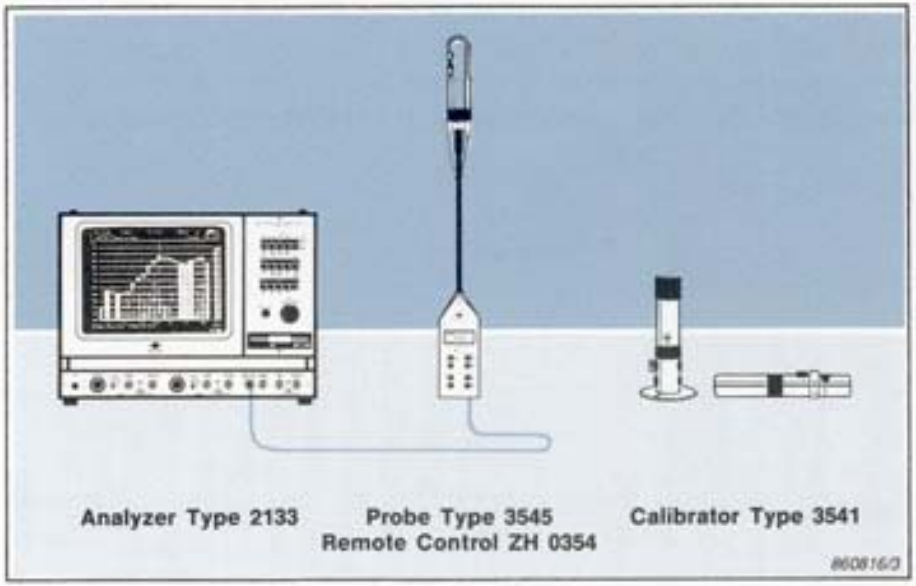
The Two-Microphone Probe

A number of Brüel&Kjær phase-matched probes are available for sound intensity measurements. For all the probes, remote control units allow the averaging to be controlled without the need to touch the analyzer.

The Sound Intensity Calibrator

Type 3541 generates known sound pressure, intensity and particle velocity levels in a small coupler. The calibrator is suitable for amplitude calibrations of the two microphone channels and for checking the values of intensity and particle velocity calculated by the analyzer. The calibrator can also be used to detect the residual intensity in the analyzing system and hence the pressure-residual intensity index which is a measure of the phase mismatch in the system (see Appendix).





Making Measurements

There are, as yet, no standards for measurement of intensity and so we will now discuss several factors to be taken into account when making measurements.

Field Calibration
The two microphones are amplitude calibrated by applying a pistonphone to each microphone in turn, or to both microphones simultaneously by means of a coupler. Displayed intensity is checked against a known intensity level provided by a sound intensity calibrator. A correction accounts for changes in the density of air, but this is usually negligible except at high altitudes. The sound intensity calibrator can also be used to check the quality of phase-matching in the analyzing system by finding the pressure-intensity index and hence the dynamic capability of the system (page 33).

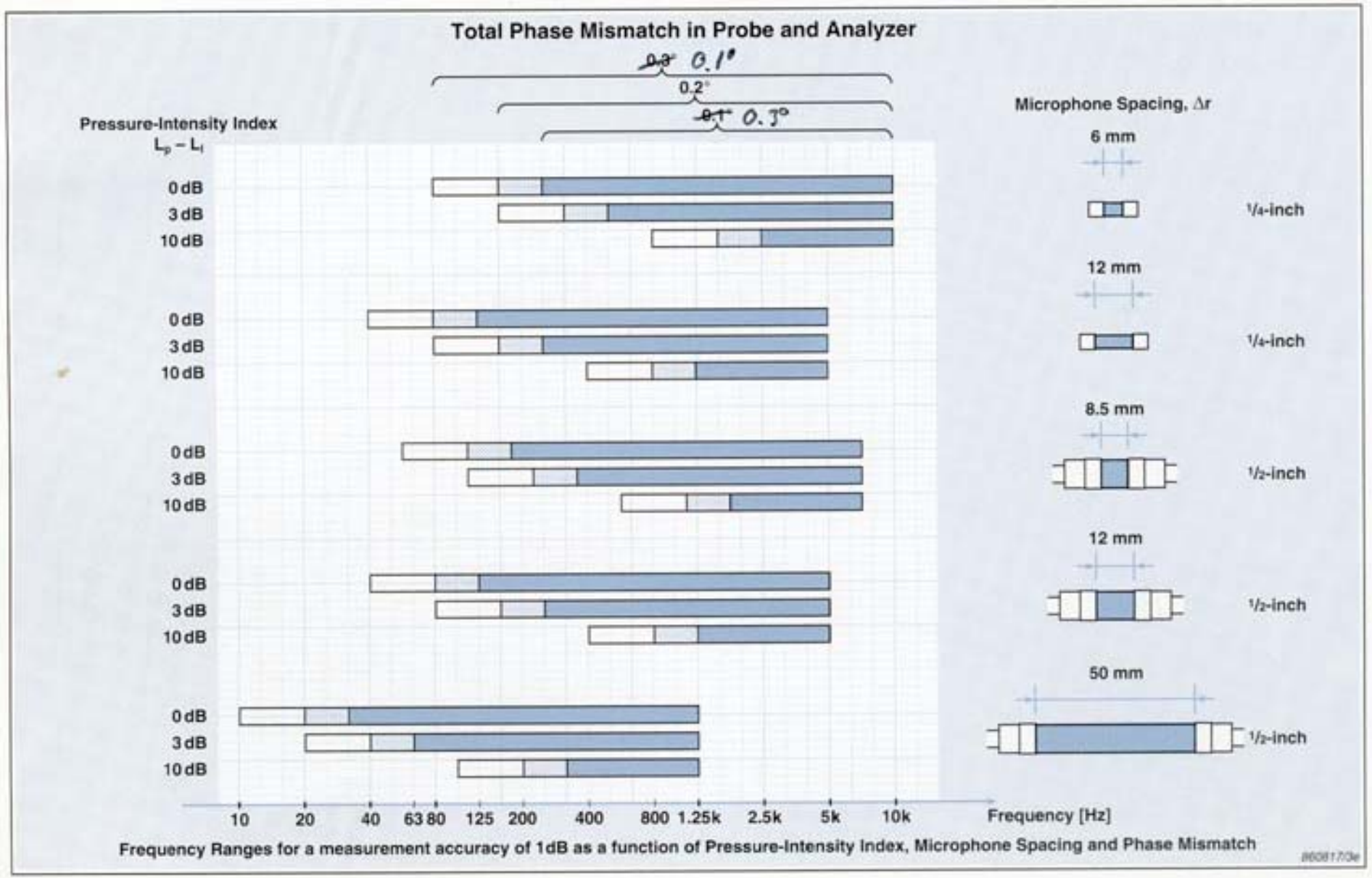
Time Averaging
To minimise the *random* error we require an averaging time long enough to give steady results. To judge the averaging time needed, several measurements can be taken and the averaging time increased until the results are repeatable.

Spatial Averaging
With swept measurements we must cover all areas equally. The sweep rate must therefore be constant and the area must be covered with a whole number of sweeps. With discrete point measurements the variability in the intensity over the measuring surface determines the number of points needed. If the variability is high the number of measuring points must be increased. It is easy to see when the spatial averaging is correct. Repeatable results for a number of different measurement surfaces, or for different measuring positions on the same surface, imply correct spatial averaging.

Background Noise
Providing the background noise is steady, measurements can be made to an accuracy of 1 dB even when the background level exceeds the source level by as much as 10 dB. If it is possible, measuring the sound power with the source turned off (background noise on) will give an idea of the contribution of the background noise. The effect of background noise is reduced by measuring closer to the source.

Choice of Spacer
We can choose between many lengths of spacer: 6, 8.5, 12 or 50 mm. The assumptions made in the theory impose an upper frequency limit on the intensity measurements — the *smaller the* spacer, the higher the frequency that can be measured. Phase mismatch in the analyzing system causes a low frequency limit — and the *larger* the spacer, the lower the frequency limit. This low frequency limit also depends on the ease of measurement in a general sound field, described by the *pressure-intensity index.*

The graph shown opposite can be used to determine the limits. To use it we need to measure the pressure-intensity Index which describes the sound field. The pressure-intensity Index is simply the pressure level minus the intensity level. The other factor determining the low frequency limit is the phase mismatch in the analyzing system. A conservative estimate for Brüel&Kjær instrumentation is ± 0.3°. Let us find the limits in a field where the pressure-intensity index is - 3dB. Looking at the bar for a 12mm spacer we see that the limit is about 250 Hz. To measure a lower frequency we need a 50 mm spacer. With this we can measure down to 63 Hz. However, with this spacer the high frequency limit is only 1.25 kHz. And so no single spacer can cover a wide frequency range.



Frequency Ranges for a measurement accuracy of 1dB as a function of Pressure-Intensity Index, Microphone Spacing and Phase Mismatch

Further Applications and Advanced Topics

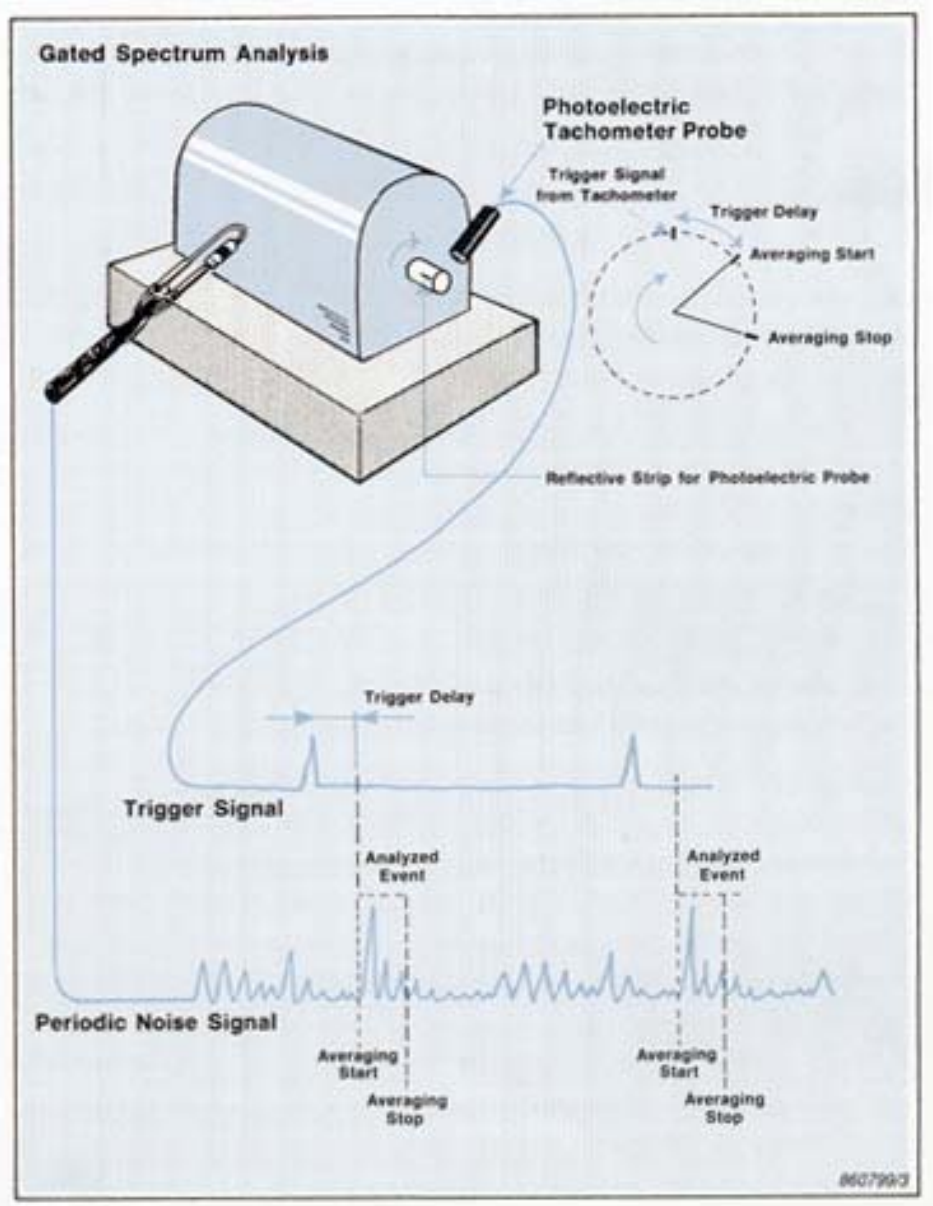
So far only the most common applications of intensity measurement have been described. Many other applications are under investigation and development.

Gated Spectrum Analysis

We often want to study the noise signals from rotating and reciprocating machinery, in particular one part of the signal. By measuring the signal for a certain interval of the cycle only (gating), and then repeating the process for many cycles, enough averages are taken to make the signal appear stationary. To measure only one interval of a cycle the intensity measurement is usually triggered by a reflecting strip on one part of the rotating machinery which is sensed by a photoelectric probe. The trigger pulse then starts or stops the analysis for a fixed amount of time. In this way it is possible to study one part of a cycle only, for example the initiation of combustion in an engine, or a particular event in a production process. Gated analysis can be used with both pressure and intensity measurements. With intensity, however, we can use the results for source location and make gated contour plots, etc.

Radiation Efficiency

A surface radiates energy by transmitting the vibrations of the surface to the air. The efficiency with which it does this is called the radiation efficiency. Knowledge of this is useful for development work and allows the sound power of the surface to be predicted. Radiation efficiency is defined as the intensity produced divided by the intensity that would be radiated by a piston moving at the same velocity as the surface of interest. The intensity produced can be measured with the two-microphone probe and the velocity of the surface can be measured with an accelerometer.



Full Vector Intensity Measurement

Intensity is a vector quantity. Usually only the component in the axial direction is measured. However, it is possible, by using three mutually perpendicular microphone pairs, to measure all three components at once and then to calculate the vector with a computer.

Structural Intensity

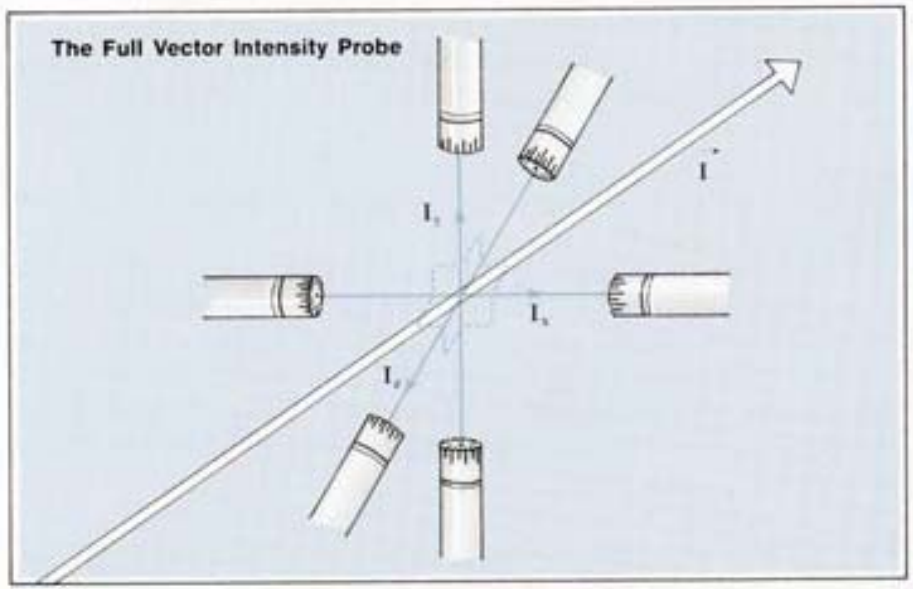
With two microphones we can find the intensity in air. Similarly it is possible to measure the structural intensity through a solid plate with two closely spaced accelerometers. The technique is used for determining the power flow through large noise-radiating structures.

Intensity in Ducts

It has long been of interest to study the energy flow in ducts, such as air-conditioning systems. Now the complicated intensity distributions in ducts can be studied and the sound power found. For ducts with flow, a windscreen must be placed over the microphones to reduce flow noise. Measurements cannot be made in very high speed flows.

Spatial Transformation of Sound Fields (STSF)

By correlating pressure measurements close to a machine with measurements at reference points it is possible to obtain a detailed picture of the sound field at the measurement plane and at other specified planes. In this way the pressure and intensity can be predicted far away from the source. This is of importance to the motor industry where standards give limits for noise levels far from the source. By using this technique the noise level far from the source can be predicted at the developmental stage based on measurements close to the source.



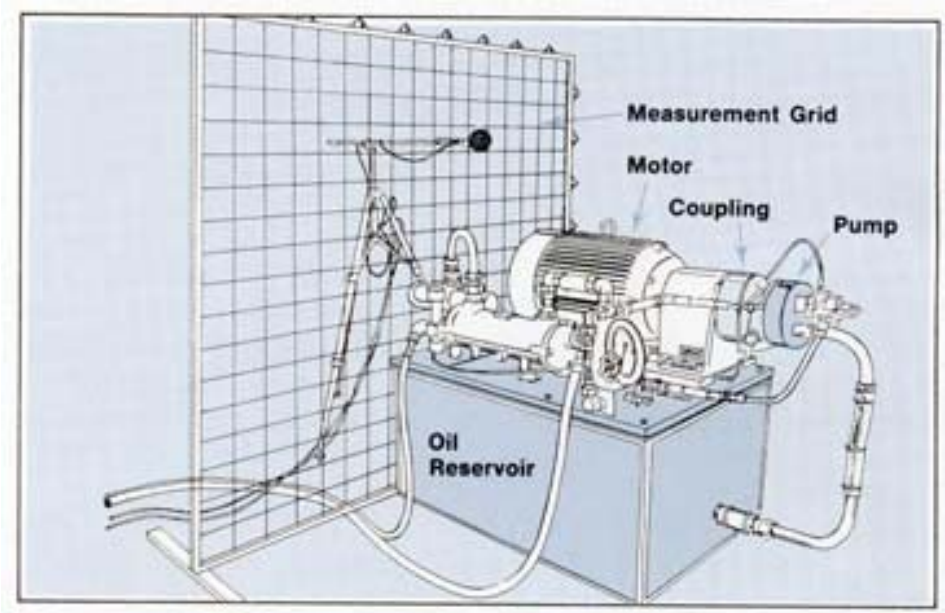
Case Studies

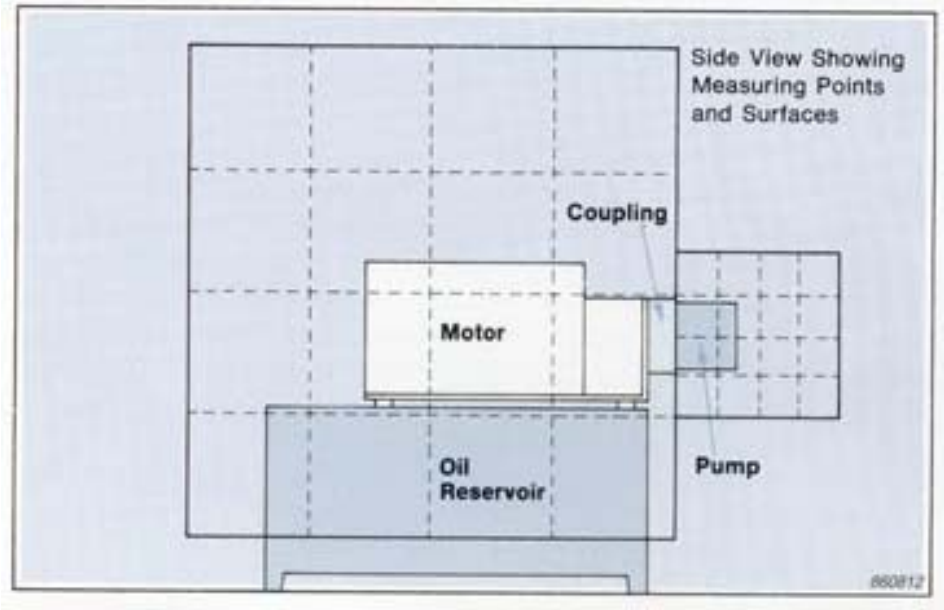
To illustrate the importance and usefulness of the sound intensity method two actual applications follow where intensity measurements gave clear and quick answers to real-life problems.

1. Effective Noise Control on a Coupled Pump and Motor Assembly

A pump and motor assembly was producing too much noise. The pump and motor noise was measured in a reverberation room in order to determine the sound power from pressure measurements. At 88.4 dB this was unacceptable. The motor was uncoupled and measured alone; the sound power was only 65 dB. Therefore the problem seemed to be the pump.

But clearly these measurements were not made under operating conditions. With pressure measurements, the only way to measure the pump separately under load would have been by enclosing the motor in a soundproof box. This would have been impractical and since no box is completely soundproof it would also have been inaccurate. However, with intensity measurements we can distinguish between the pump and motor in situ. Since the assembly was already in the reverberant room it was left there. Time could, however, have been saved by performing measurements in situ since sound intensity measurements do not require controlled sound fields.



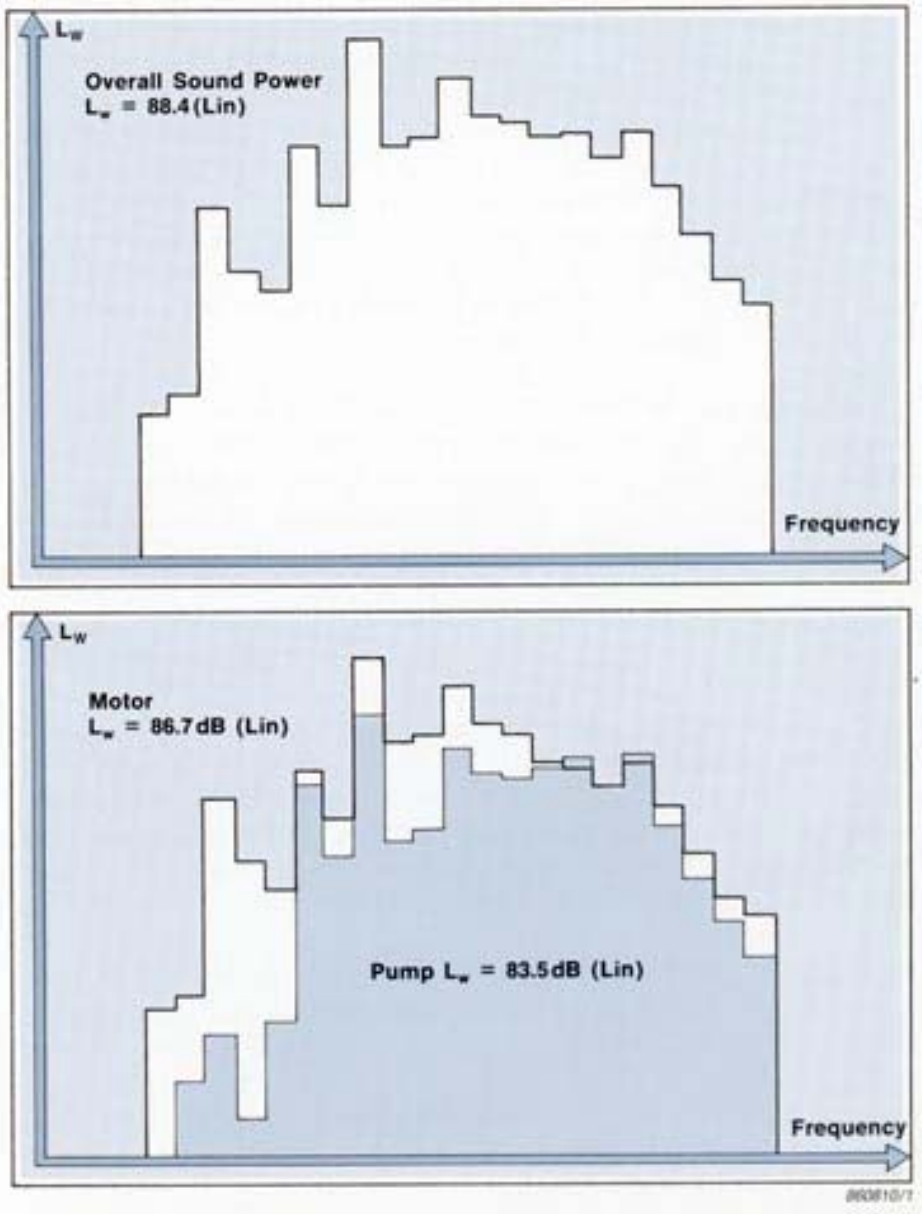


The first step in determining the sound power was to define the measurement areas. Two boxes were defined with rectangular frames and a grid of string locating the measurement points. The smaller box enclosed the pump and a larger box enclosed the motor and its oil reservoir. The boxes fitted closely around the assembly to improve the signal-to-noise ratio. In this case the "noise" consisted of the reflections from the walls of the room.

The sound power of each box was measured and it was found that that the motor radiated more noise than the pump — the level from the motor was 86.7 dB and the level from the pump was 83.5 dB. These results could not be found from pressure measurements without the previously mentioned soundproof enclosures.

The reason for the high level from the motor was that it was radiating vibrational energy transferred through the coupling from the pump. The motor and its oil reservoir had large surface areas which were extremely efficient at radiating noise. To reduce the noise the oil reservoir was removed. This conclusion could have been made with experience, but sound intensity measurements give the noise control engineer clear experimental evidence.

Note that although these measurements took place in a diffuse field where there was a large difference between pressure and intensity (pressure-intensity index), the measurements were still valid.



Case Study Two: Measurement of Wall Transmission Paths

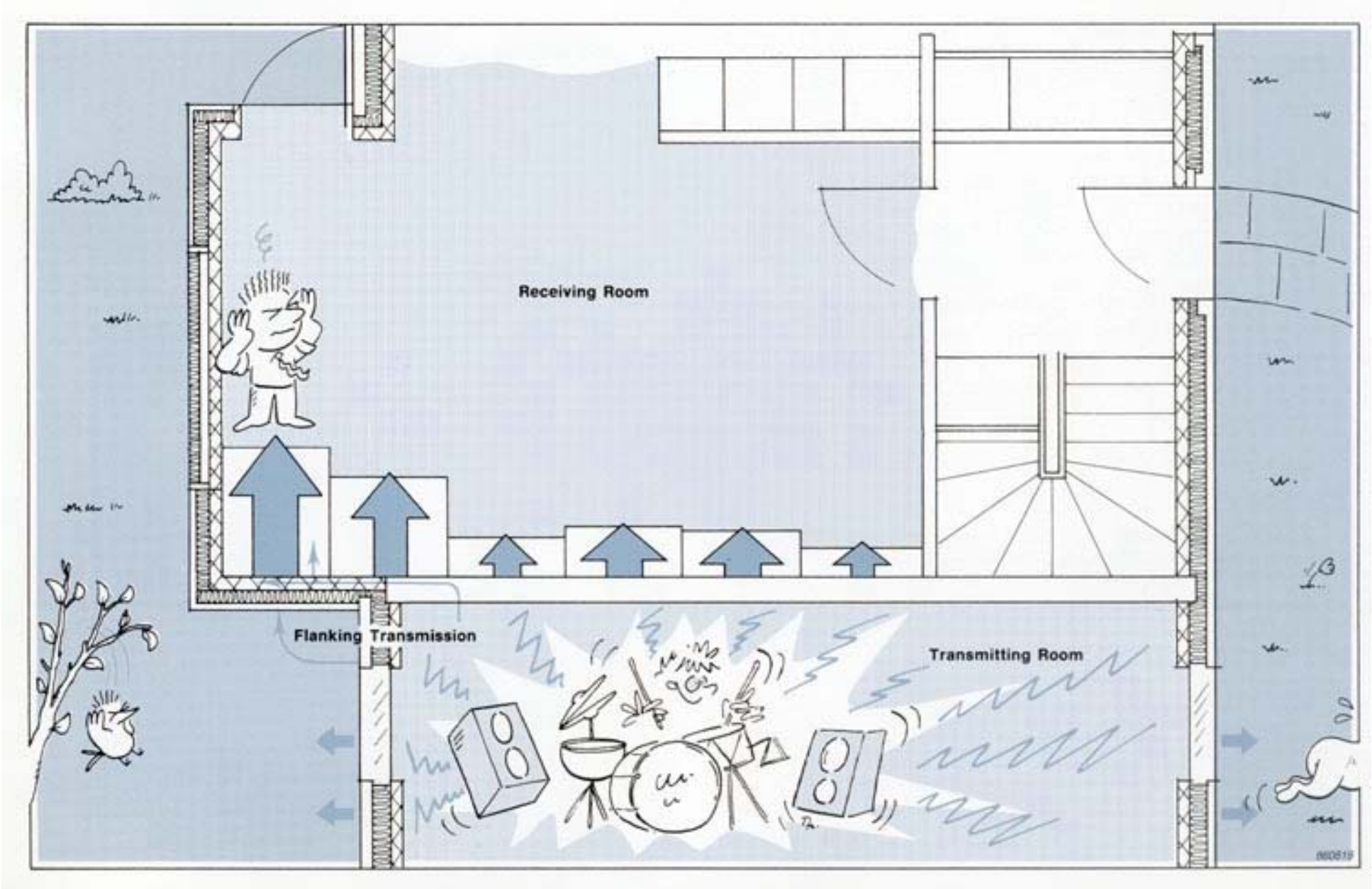
Sound can enter buildings in many ways, not only through the walls. Sound may also be transmitted through structure-borne paths and air-conditioning ducts. Walls may be constructed of different materials and have windows and doors which have acoustic leaks. Thus, although we can place a sound source in an adjacent room and, with spatially averaged pressure measurements, calculate the sound transmitted, we cannot necessarily find out how it is being transmitted into the room. Furthermore the presence of standing waves can confuse the results.

By making sound intensity measurements we can measure sound power transmitted through small sections of a wall. We can also locate the sources of sound from the wall by making contour plots. Another technique is to scan the sound intensity probe over the surface of a wall and use the null search method (page 19) to locate sources of sound from leakage paths.

A short study was made in a row of terraced houses. A sound source was placed in one room and in an adjacent room the sound power was measured over segments of a wall. In order to make valid measurements some absorbent material was placed in the room. This made the room less reverberant; the reverberation time was reduced to about half a second.

The results were surprising. The highest levels were measured at the extreme left hand part of the wall (referring to the figure opposite). The part which faced the outside, and not the adjoining room. An outside pressure measurement excluded airborne transmission from the outside. And therefore the high levels must be caused by flanking transmission via a structural path.

Different materials were used in the wall's construction. The left hand side of the wall was made of breezeblock (cinder block) whereas the rest was concrete. The breezeblock radiated more sound because it was lighter. But this was not immediately obvious and could not have been found simply by making pressure measurements.


Receiving Room
Flanking Transmission
Transmitting Room

Appendix: Measurement Limitations

The "Making Measurements" section (page 22) gave several guidelines for measuring sound intensity. We will now discuss in more detail how the frequency and pressure-intensity index limitations arise.

The High Frequency Limit:
Finite Difference Approximation Errors

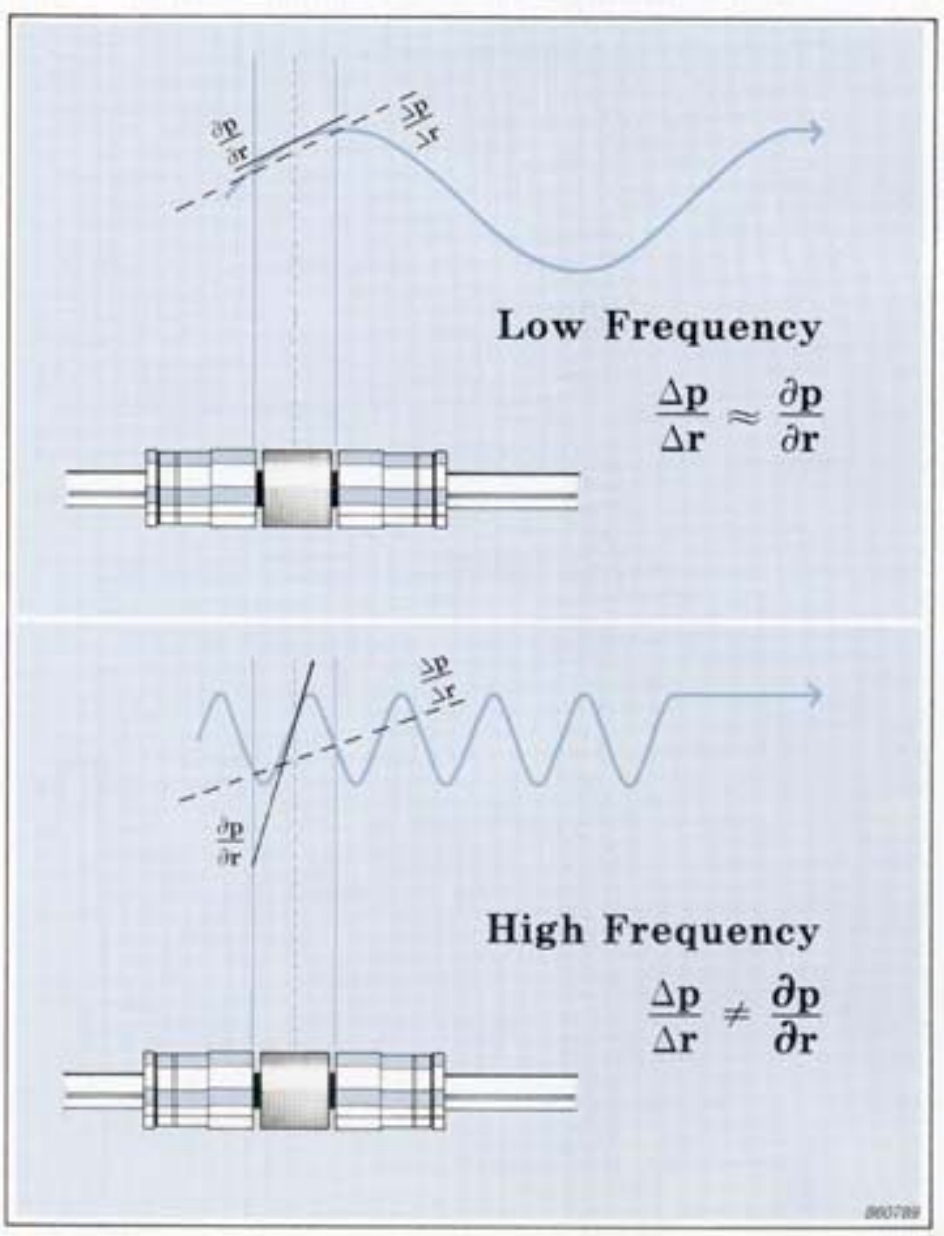
The high frequency error is sometimes called a *bias* error as it will result in the same error (in this case an underestimation) every time the intensity is measured. The two microphones approximate the gradient of a curve to a straight line between two points. If the curve changes too rapidly with distance, the estimate will be inaccurate. This will happen if the wavelength measured becomes small compared to the effective microphone separation (see the diagram opposite).

For a given effective microphone separation there will be a high frequency limit beyond which errors will increase significantly. For accuracy to within 1 dB, the wavelength measured must be greater than six times the spacer distance. This corresponds to the following high frequency limits:

50mm: up to 1.25kHz

12mm: up to 5 kHz

6mm: up to 10kHz



The Low Frequency Limit: Phase Mismatch Errors

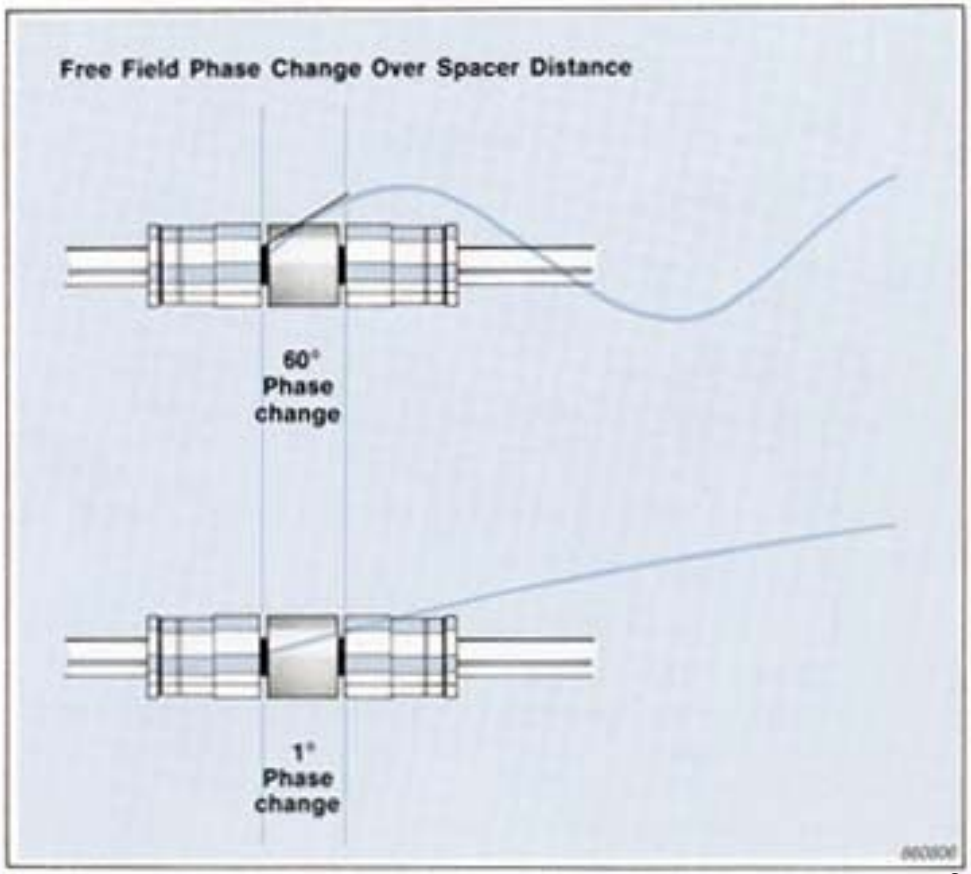
The amount of phase mismatch between the two channels in the analyzing system determines the low frequency limit. Earlier in this booklet, the term phase was used to describe the shift between pressure and particle velocity. Here it is used to describe the shift in a wave with *time* or *distance.* One wavelength can be expressed in terms of a rotation of 360°. The distance between the two microphones can be expressed as a fraction of a wavelength or equivalently as a change of phase between the two points. Intensity is directly related to this phase change; without a phase change there is no propagation and therefore no intensity.

This phase shift is also equivalent to the time taken for the wave to propagate over the spacer distance. The time separation must be preserved to measure the correct intensity. However, in all analyzing systems there will be a small time delay between the two channels which introduces a small phase change. This is called a *phase mismatch* error. For a good probe and analyzer combination an outside estimate might be ± 0.3°. The phase mismatch error is a *bias* error and the intensity is under- or overestimated according to the sign of the phase mismatch. For accuracy to within 1 dB the phase change over the spacer distance should be more than five times the phase mismatch.

To obtain negligible high frequency error the wavelength must be six times the spacer distance. Then the spacer corresponds to one sixth of a wavelength and so the change in phase across the spacer distance is 60°. Obviously a phase error of ± 0.3° will be insignificant. Now let us try to measure a lower frequency: At 63 Hz the wavelength is approximately 5.5 metres and the change of phase over a 12mm spacer is only 0.8°. So a phase mismatch of ± 0.3° will cause a significant error in the intensity.

Now let us try a larger spacer. With a 50 mm (approximately four times 12 mm) spacer the phase change is 3.3° (approximately four times 0.8°) and so our results will be sufficiently accurate. This is why a large spacer is needed for low frequencies.

These examples are only valid for free field propagation along the probe axis. In general, the phase change will be reduced with angle of incidence and in a reactive or diffuse field. Fortunately it is not simply a matter of guess work to determine the phase change. Read on!



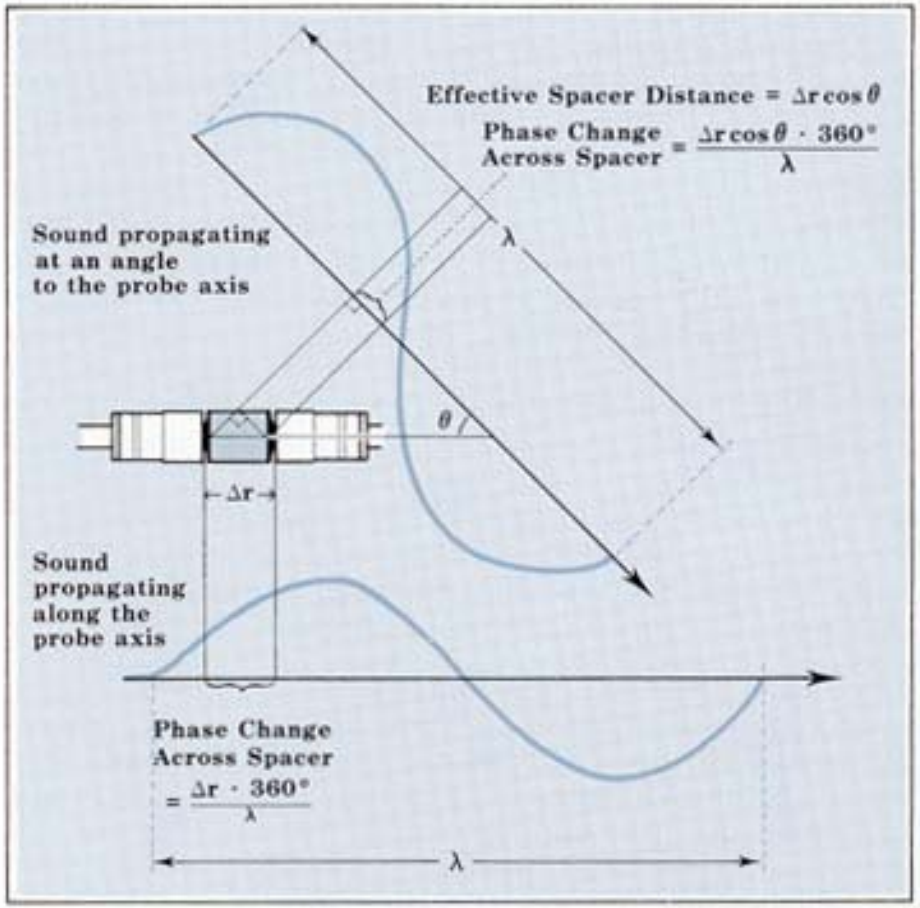
Pressure-Intensity Index and Phase

If sound is incident at an angle to the probe axis, the phase change to be detected is smaller. In other words the effective spacer distance is reduced. The decrease in the phase change causes the measured intensity to be reduced by the $\cos\theta$ factor. But the pressure, a scalar quantity, is the same whatever the angle of incidence. Hence there is a difference between the intensity and pressure levels. And the phase mismatch error will become more significant and the measurement frequency range will be reduced.

The difference between pressure and intensity also occurs in reactive and diffuse fields, as the intensity can be low even when the pressure is high. The name for this difference is the *pressure-Intensity index.*

The pressure-intensity index is a very important indicator to the accuracy of a measurement. This is because it can be related to the phase change across the spacer. By measuring the pressure-intensity index we can determine phase change across the spacer, and find out if the phase mismatch will make the measurement inaccurate. The phase change in degrees is calculated with the formula shown opposite. With this formula we can determine whether the phase mismatch error will be significant compared to the phase change over the spacer.

In a general sound field, the phase change varies from point to point and so the pressure-intensity index should, strictly speaking, be measured at each measurement point. However, an average *global* value, the space-average pressure level minus intensity level, is often sufficient to give an idea of the accuracy.



$$10\log_{10}\left(\frac{\rho c}{400}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{\lambda}{\Delta r}\cdot\frac{\phi}{360°}\right) + L_p - L_I$$

$L_p - L_I$ is the measured pressure-intensity index

ϕ is the phase change over the spacer distance Δr

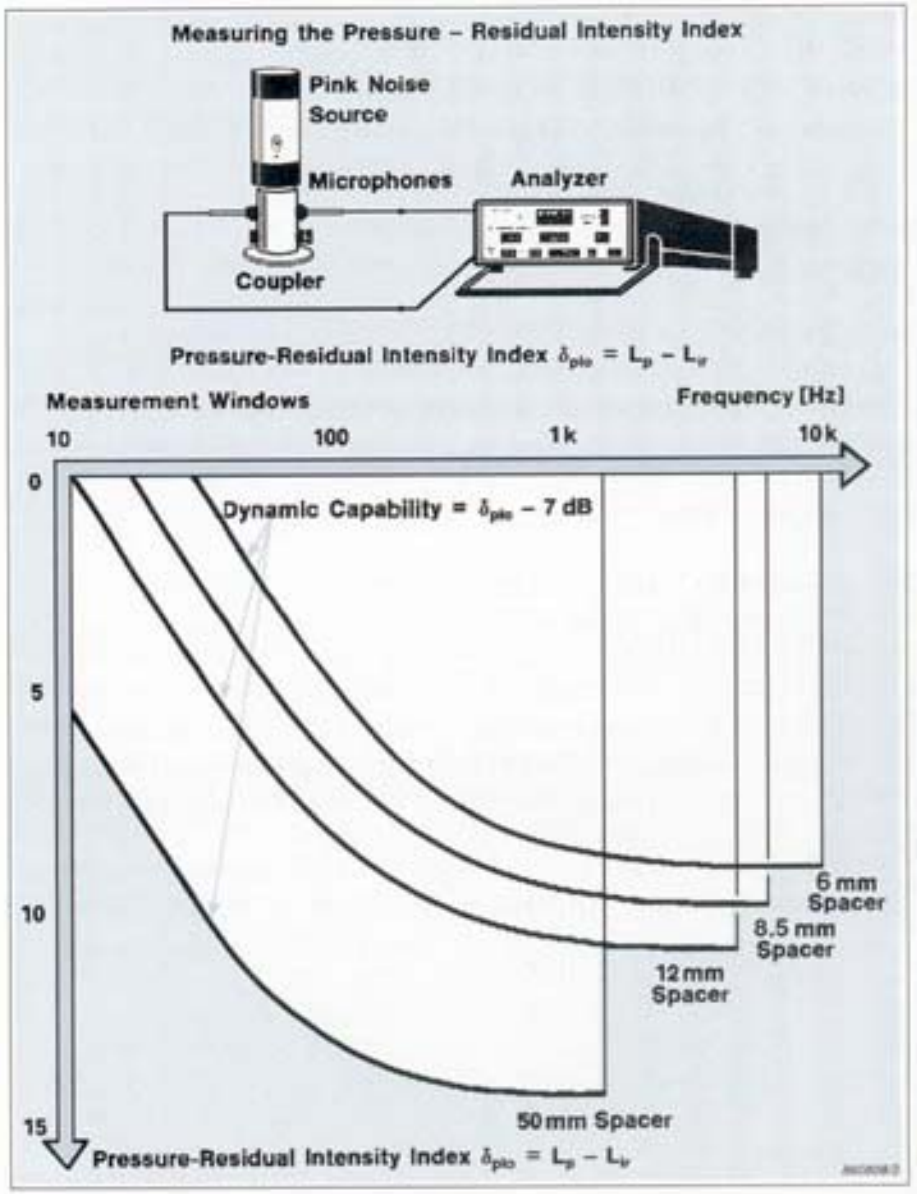
$10\log_{10}\left(\frac{\rho c}{400}\right)$ is a small correction term usually negligible.

Pressure-Residual Intensity Index and Dynamic Capability

Now we must quantify the phase mismatch: The pressure-intensity index describes the phase change over the spacer. Similarly the phase mismatch can be described with the *pressure-residual intensity index.*

If the same signal is fed to the two microphones the analyzer should ideally measure zero intensity. However, the phase mismatch causes a small phase difference between the two signals which the analyzer interprets as intensity along the spacer. The intensity detected can be likened to a noise floor below which measurements cannot be made. This intensity floor is not fixed. It varies with the pressure level. What is fixed is the difference between the pressure and the intensity level when the same signal is fed to both channels. The difference is defined as the pressure-residual intensity index and can be related to phase mismatch in degrees with the formula on the previous page.

The pressure-residual intensity index can be measured in a small coupler which gives the same signal to the two microphones. In degrees the phase change along the spacer distance must be five times the phase mismatch for accuracy to within 1 dB. This corresponds to the criterion that the pressure-intensity index must be 7dB smaller than the pressure-residual intensity index. Therefore we can subtract 7dB from the pressure-residual intensity index to find the *dynamic capability* which gives a limit to the pressure-intensity index that can be measured with accuracy. Now we can draw measurement windows for each spacer which give the pressure-intensity index and frequency limits for accurate measurement. Typical measurement windows are shown opposite. The upper frequency limit is set by the finite difference approximation errors.



Further Reading

Sound intensity measurement is a new technique which has developed rapidly over the last few years. Because of this there is a growing collection of papers on all aspects of the subject. More than sixty of these are listed in the Brüel & Kjær publication "Reference Literature, Sound Intensity and Related Topics" BA 0072-14 (1988). Many other papers are to be found in the proceedings of recent conferences.

Brüel & Kjær is at the forefront of new developments and is constantly introducing new applications and improving older techniques. These advances are recorded in a series of application notes published regularly by Brüel & Kjær.

Review Articles

S. GADE.

"Sound Intensity (Part 1 Theory)." *Brüel & Kjær Technical Review* 3, 3-39 (1982).

S. GADE.

"Sound Intensity (Part 2 Instrumentation and Applications)." *Brüel & Kjær Technical Review* 4, 3-32 (1982).

S. GADE.

"Sound Intensity and its Application in Noise Control." *Sound and Vibration* March, 14-26 (1985).

Historical Background

C. F. CLAPP & F. A. FIRESTONE.

"The Acoustic Watt Meter — An Instrument for Measuring Sound Energy Flow." *J. Acoust. Soc. Am.* 13, 124-136 (1941).

H. F. OLSON.

"System Responsive to the Energy Flow of Sound Waves." *U.S. Patent No. 1.892,644* (1932).

T.J. SCHULTZ.

"Acoustic Wattmeter." *J. Acoust. Soc. Am.* 28, 693-699 (1956).

Modern Formulations

J. Y. CHUNG.

"Cross-Spectral Method of Measuring Acoustic Intensity Without Error Caused by Instrument Phase Mismatch." *J. Acoust. Soc. Am.* 64, 1613-1616 (1978).

F. J. FAHY.

"Measurement of Acoustic Intensity Using the Cross-Spectral Density of Two Microphone Signals." *J. Acoust. Soc. Am.* 62, 1057-1059 (Letter) (1977).

F. J. FAHY.

"Sound Intensity." Elsevier Science Publishers LTD. (1990).

Applications

BRÜEL & KJÆR PUBLICATION.

"Intensity Measurements." Collection of papers. BA 7196 (1988).

B. FORSSEN & M. J. CROCKER.

"Estimation of Acoustic Velocity, Surface Velocity and Radiation Efficiency by use of the Two-Microphone Technique." *J. Acoust. Soc. Am.* 73, 1047-1053 (1983).

K. B. GINN & R. UPTON.

"Business Machines Measurements Using Sound Intensity." *Brüel&Kjær Application Note* BO 0126 (1986).

R. E. HALLIWELL & A. C. C. WARNOCK.

"Sound Transmission Loss: Comparison of Conventional Techniques with Sound Intensity Techniques." *J. Acoust. Soc. Am.* 77, 2094-2103 (1985).

P. KRUPPA.

"Measurement of Structural Intensity in Building Constructions." *Applied Acoustics* 19 (1986) 61 -74.

T. G. NIELSEN.

"Intensity Measurements in Building Acoustics." *Brüel&Kjær Application Note* BO 0147 (1986).

T. G. NIELSEN & E. WALTON.

"Sound Power Determination of Household Appliances on the Production Line." *Brüel & Kjær Application Note* BO 0148 (1986).

J. PEKKINEN, HALTON OY, J. NUOTIO & K. B. GINN.

"Sound Insulation of Ventilation Elements using Sound Intensity Techniques." *Brüel & Kjær Application Note* BO 0151 (1986).

P. RASMUSSEN & T. L. MØLLER

"Gated Sound-Intensity Measurements on a Diesel Engine." *Brüel&Kjær Application Note* BO 0203 (1987).

B. G. van ZYL, P. J. ERASMUS & G. J. J. van der MERWE.

"Determination of Sound Reduction Indices in the Presence of Flanking Transmission." *Applied Acoustics* 19 (1986) 25-39.

M. L. S. VERCAMMEN, H. J. MARTIN & W. CORNELISSEN

"Application of the Intensity Measurement Technique to Building Acoustics and the Influence of an Absorbing Partition Wall on the Measured Intensity." *Applied Acoustics* 23 (1988) 45-62.

ING. OPERTI, G. PRETI & K. B. GINN

"Acoustical Testing in the Automotive Industry using STSF." *Brüel&Kjær Application Note* BO 0340 (1990).

Conference Proceedings

Proc. 1st International Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, *CETIM, Senlis, France.* (1981).

Proc. 2nd International Congress on Recent Developments in Acoustic Intensity Measurement, *CETIM, Senlis, France.* (1985).

Proc. Symposium on Acoustic Intensity, *Tokyo, Japan.* (1987).

Proc. 2nd Symposium on Acoustic Intensity, *Tokyo, Japan.* (1988).

Proc. 3rd International Congress on Intensity Techniques, *CETIM, Senlis, France.* (1990).

Many other papers on sound intensity measurement are also to be found in the **INTER-NOISE** proceedings from 1978 onwards.

Measurement Accuracy

S. GADE.
"The Validity of Intensity Measurements in Partially Diffuse Sound Field." *Brüel & Kjær Technical Review* 4, 3-31 (1985).

A. F. SEYBERT.
"Statistical Errors in Acoustic Intensity Measurements." *J. Sound Vib.* 75, 519-526 (1981).

P. S. WATKINSON.
"The Practical Assessment of Errors in Sound Intensity Measurement." *J. Sound Vib.* 105, 255-263 (1986).

ISO Standards.

ISO/DIS 9614 (Part 1).
"Determination of Sound Power Levels of Noise Sources using Sound Intensity-Part 1: Measurement at Discrete Points."

ISO 3740 - 3746.
"Determination of Sound Power Levels of Noise Sources." (Pressure Measurements). See also ANSI S.1 31 - 36.

We hope this booklet has answered many of your questions and will continue to serve as a handy reference. If you have other questions about sound intensity measuring techniques or instrumentation, please contact one of our local representatives or write directly to:

Brüel & Kjær
2850 Nærum
Denmark

Brüel & Kjær

WORLD HEADQUARTERS: DK-2850 Nærum · Denmark · Telephone: +45 42 80 05 00 · Telex: 37316 bruka dk · Fax: +45 42 80 14 05

Australia (02) 450-2066 · Austria 0222/816 74 00 · Belgium 02-242 97 45 · Brazil (011) 246-8149/246-8166 · Canada (514) 695-8225 · Czech Republic 02-24310458
Finland (0) 1481577 · France (1) 64 57 20 10 · Germany 04106/70 95-0 · Great Britain (081) 954-2366 · Holland 03402-39994 · Hong Kong 548 7486 · Hungary (1) 215 83 05
Italy (02) 57 60 41 41 · Japan 03-5420-7302 · Republic of Korea (02) 554-0605 · Norway 66 90 44 10 · Poland (0-22) 40 93 92 · Portugal (1) 65 92 56/65 92 80
Singapore 225 8533 · Slovak Republic 07-55666 · Spain (91) 368 10 00 · Sweden (08) 711 27 30 · Switzerland (1) 862 19 60 · Taiwan (02) 713 9303 · Tunisia (01) 232 478
USA: MA (508) 481-7737 GA (404) 981-6225 MI (313) 522-8600 IL (708) 358-7582 CA (800) 442-1030 WA (206) 883-2203/882-4359
Local representatives and service organisations world-wide

Printed in Denmark: K. Larsen & Søn A/S · DK-2600 Glostrup

STATYSTYKA W POMIARACH AKUSTYCZNYCH - PODSTAWY

mgr Mikołaj KIRPLUK

NTL-M.Kirpluk

00-761 Warszawa, ul.Belwederska 3 m.6

www.ntlmk.com

tel.k.: 502 216620

e-mail: mkirpluk@ntlmk.com

1. WSTĘP

W związku z szeregiem wymagań stawianych m.in. przez przepisy prawne zachodzi konieczność określania **niepewności wyników badania hałasu** na podstawie wykonanych pomiarów poziomu dźwięku.

Skoncentruję się tu na aspekcie **fizycznym** tego zagadnienia, pomijając inne aspekty (prawne, faktycznej jakości badań, sensu akredytacji w pomiarach środowiskowych, a hałasu w szczególności - to temat na osobne dyskusje, do prowadzenia których niezbędne jednak jest zrozumienie fizycznej strony zjawiska hałasu, pomiaru poziomu dźwięku oraz statystyki).

Chociaż już ogół osób zajmujących się sprawami hałasu określa **wartość średnią poziomu dźwięku** jako „średnią logarytmiczną” (szczegółowe wyjaśnienie tego pojęcia dalej w treści referatu) **zgodnie z energetycznym charakterem tego zjawiska**, to dalsze rachunki „statystyczne” wielu wykonuje jednak na... poziomach dźwięku!
Jest to „cyferkologia stosowana”...

Żeby zrozumieć źródło takiego błędu trzeba uświadomić sobie genezę pojęć i wzorów statystycznych oraz stosowanych w akustyce definicji m.in. właśnie *poziomu dźwięku*.

Rozdział pt. „Repetytorium” stanowi skrót podstawowych informacji na temat parametrów rozkładów statystycznych i pojęć uzywanych w określaniu niepewności.

Natomiast meritum mojego referatu znajduje się w rozdziale „Statystyka w pomiarach akustycznych” i jest zakończone brzemienną w skutki „Konkluzją”, z której wnioskować można o jakości wydanych dotychczas akredytacji i przepisów prawa... (stan na dzień 3.03.2006r.)

2. REPETYTORIUM

2.1. Parametry rozkładu zmiennych losowych

***Wartość oczekiwana* zmiennej losowej X** (*wartość przeciętna, nadzieja matematyczna*)

- dla zmiennej losowej dyskretnej:

$$E(X) = \sum_k x_k \cdot P\{X = x_k\}$$

- dla zmiennej losowej ciągłej:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x)dx$$

gdzie: $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$

***Moment rzędu n* zmiennej losowej X** to wartość oczekiwana zmiennej losowej $\mathbf{X^n}$, czyli:

- dla zmiennej losowej dyskretnej:

$$E(X^n) = \sum_k x_k^n \cdot P\{X = x_k\}$$

- dla zmiennej losowej ciągłej:

$$E(X^n) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n \cdot f(x)dx$$

***Wariancja* zmiennej losowej X** jest określona zależnością:

$$D^2(X) = E(X^2) - [E(X)]^2$$

Pierwiastek kwadratowy z *wariancji* nazywamy ***odchyleniem standardowym***.

2.2. Przypadki szczególne

A. Średnia arytmetyczna to wartość oczekiwana zmiennej losowej dyskretnej o jednakowych prawdopodobieństwach dla skończonej liczby możliwych wartości:

$$E(X)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$$

Dla średniej arytmetycznej ***wariancja*** wyraża się wzorem:

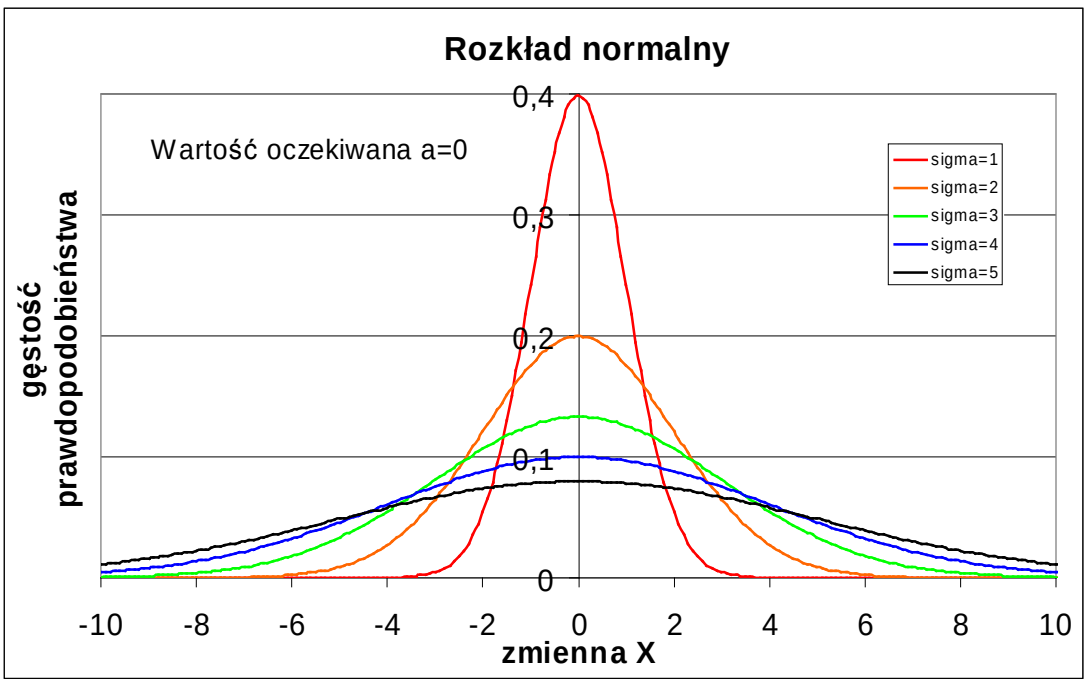
$$D^2(X)=E(X^2)-[E(X)]^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i^2-\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i\right)^2=(...)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[X_i-E(X)]^2$$

i jest to *moment centralny 2-rzędu, lub* wartość oczekiwana *kwadratu odchylenia zmiennej losowej od jej wartości oczekiwanej*, czyli ***średnie odchylenie kwadratowe*** [6] (lub *średni błąd kwadratowy* [1]) - takie nazewnictwo jest prawidłowe (przyp.MK), a pierwiastek kwadratowy z tej wariancji to ***odchylenie standardowe***, ale też średnia kwadratowa odchylenia lub ***dyspersja*** [2].

B. Rozkład normalny zmiennej losowej X to rozkład o gęstości prawdopodobieństwa określonej wzorem:

$$f(x;a,s)=\frac{1}{s\cdot\sqrt{2p}}\exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2s^2}\right)$$

gdzie:
a - badana wielkość lub wartość oczekiwana
σ - odchylenie standardowe



2.3. Niepewność [2,3]

- **niepewność rozszerzona** - U_R:

  (*zasada propagacji niepewności*)

$$U_R = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$$

Niepewność możemy określać z różnym poziomem ufności, wyrażanym zazwyczaj w procentach, oznaczającym prawdopodobieństwo uzyskania wyniku leżącego w pobliżu wartości oczekiwanej w przedziale zdefiniowanym przez tą niepewność, np.:

$$P\left\{ X \in \underbrace{\left(E(X) - U_{R,95}, E(X) + U_{R,95}\right)}_{\text{przedzial niepewnosci}} \right\} = 95\%$$

- **niepewność typu A** - U_A

  możemy ją określać metodami statystyki matematycznej,

  dotyczy głównie wyników pomiarów traktowanych jako zmienne losowe:

  - niezależne,
  - powtarzalne,
  - pomiar nie wpływa na wynik.

- **niepewność typu B** - U_B

  określamy ją metodami innymi niż statystyki matematycznej, np:

  - metryki, certyfikaty,
  - dane literaturowe,
  - wcześniej uzyskane dane pomiarowe,
  - własne doświadczenie i wiedza,
  - **szczegółowa znajomość badanych zjawisk.**

  „Szacowanie niepewności typu B to bardziej sztuka doświadczalna niż rzemiosło” [2]

3. STATYSTYKA W POMIARACH AKUSTYCZNYCH

Średni poziom dźwięku (dla jednakowo prawdopodobnych zdarzeń / pomiarów) obliczamy jako tzw. „średnią logarytmiczną” określoną wzorem:

$$L_{śr.} = 10 \cdot \log_{10}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_i}{10}}\right] \qquad [A]$$

Definicja poziomu dźwięku

Poziom dźwięku wyrażony w decybelach to 10 logarytmów dziesiętnych ze stosunku kwadratu ciśnienia akustycznego do kwadratu ciśnienia odniesienia równego $2*10^{-5}$ Pa:

$$L_p = 10 \cdot \log_{10}\frac{p^2}{p_0^2},\ dB \qquad [B]$$

gdzie: p_0 - ciśnienie odniesienia $2*10^{-5}$ Pa (próg słyszenia dla 1000 Hz)

UWAGA 1:

Często w literaturze spotyka się zapis:

$$L_p = 20 \cdot \log_{10}\frac{p}{p_0},\ dB$$

Zapis taki, choć z formalnie prawidłowy z matematycznego punktu widzenia, **traci sens fizyczny**:

- w fizycznej definicji *poziomu* wyrażanego w decybelach - wielkości logarytmizowane muszą być proporcjonalne do energii - w akustyce taką wielkością jest kwadrat ciśnienia akustycznego,
- ciśnienie akustyczne (chwilowe?) w pierwszej potędze może być ujemne i wychodzi poza dziedzinę logarytmu.

Stąd próba obliczeń, np. sumy hałasu z kilku źródeł (sumowanie poziomów) lub niepewności wyników (przez różniczkowanie) prowadzi do błędów interpretacyjnych!

Przekształcając wzory [A] i [B] otrzymujemy:

$$\frac{p_{śr.}^2}{p_0^2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{p_i^2}{p_0^2}$$

czyli **wartość oczekiwaną** dla wielkości $\mathbf{p^2/p_0^2}$ - ekspozycji względnej - określoną wzorem dla którego jest stworzony cały statystyczny aparat matematyczny!

W dalszych rachunkach ekspozycję względną, rozumianą jako wielkość $\mathbf{p^2/p_0^2}$, będę oznaczał przez **X** i traktował jako zmienną losową opisującą zdarzenia akustyczne:

$$X_{śr.} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$$

Ekspozycja X jest proporcjonalna do energii fali akustycznej, jest addytywna i można oczekiwać, że jej rozkład będzie miał charakter rozkładu normalnego wokół wartości średniej.

Dla opisu takiej wielkości można stosować parametry statystyczne wyprowadzane ze wzorów na wartość oczekiwaną.

UWAGA 2:

Natomiast w przypadku poziomów dźwięku sytuacja wygląda zgoła inaczej:

Poziom dźwięku nie jest wielkością fizyczną - jest umowną reprezentacją wielkości fizycznej przy wykorzystaniu funkcji logarytmicznej ze wszelkimi tego konsekwencjami:

- nie jest addytywny - nie dodaje się algebraicznie - sumowanie poziomów polega na sumowaniu energii („suma logarytmiczna" poziomów),
- różnica poziomów jest krotnością - jest to różnica logarytmów! - i chociaż jest stosowana jako wskaźnik skuteczności akustycznej (np. dźwiękoizolacyjności, wyciszenia), to liczenie „wariancji" na różnicach poziomów nie ma sensu fizycznego,
- poziom dźwięku nie reprezentuje wartości „zerowej" - odpowiadającej braku emisji energii (wartość poziomu dąży do $-\infty$).

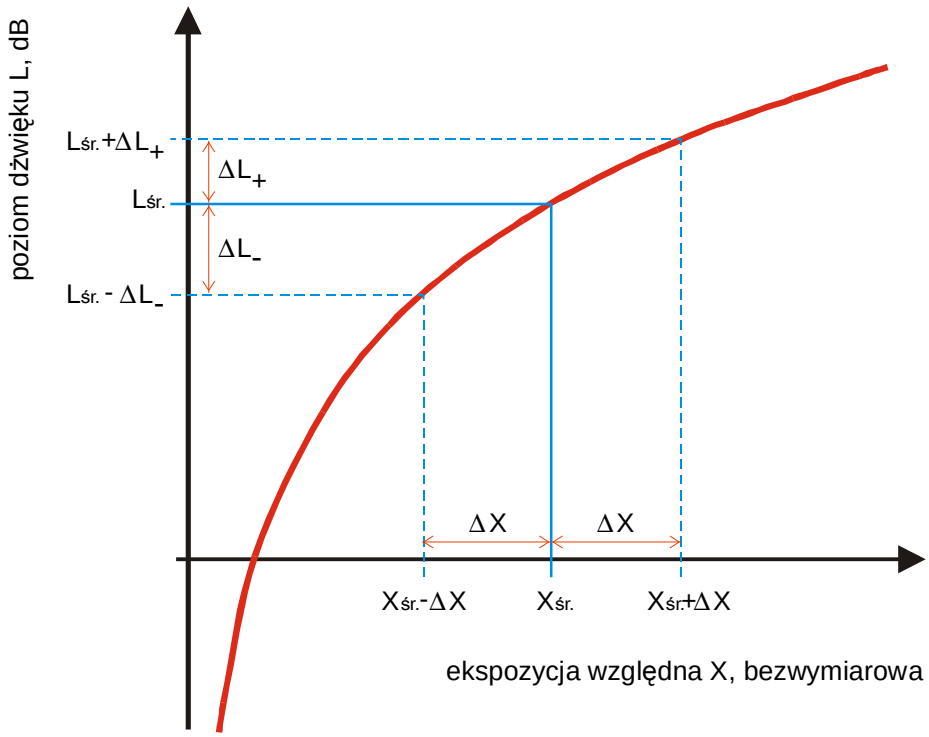
Oczywiście, aby dalej badać zjawiska akustyczne i określać dla nich parametry statystyczne, trzeba zapewnić spełnienie innych warunków stosowania statystyki:

- zdarzenia akustyczne powinny być ***niezależne*** - stąd należy mierzyć całe cykle jako zdarzenie akustyczne (np. cykl = wjazd + manewry + wyjazd pojazdu),
- zdarzenia akustyczne powinny być ***powtarzalne*** - należy uwzględniać czynniki mające wpływ na przebieg badanego zdarzenia poprzez prawidłowe określenie modelu zjawiska - błędem jest np. badanie statystyczne hałasu komunikacyjnego w czasie narastania natężenia ruchu pomiędzy kolejnymi pomiarami lub podczas blokowania pasa ruchu spowodowanego awarią pojazdu,
- badanie ***nie powinno wpływać na przebieg*** zdarzenia akustycznego - np. ustawienie punktu pomiarowego zbyt blisko jezdni w polu widzenia kierowcy nadjeżdżającego pojazdu powoduje jego reakcję (na ogół zmniejszenie prędkości...).

4. KONKLUZJA

Konsekwencją określenia średniej wartości ekspozycji względnej $X_{śr.}$ z niepewnością $\pm \Delta_X$, czyli przedziału ufności dla ekspozycji względnej $[X_{śr.}-\Delta X,\ X_{śr.}+\Delta X]$, jest przedział ufności dla poziomów dźwięku $[10\log_{10}(X_{śr.}-\Delta X),\ 10\log_{10}(X_{śr.}+\Delta X)]$ równy przedziałowi $[L_{śr.}-\Delta L_-,\ L_{śr.}+\Delta L_+]$, gdzie wartość oczekiwana poziomu dźwięku $L_{śr.}=10\log_{10}(X_{śr.})$ leży niesymetrycznie wewnątrz tego przedziału (bliżej wartości górnej), stąd wartość średnia poziomu dźwięku podawana wraz z niepewnością musi mieć <u>niesymetryczne</u> wartości niepewności:

$$\mathbf{L_{śr.}\ (+D_{L+};\ -D_{L-})}$$



Wartości niepewności dla poziomów - „plus" i „minus" - są dla takiego rachunku ścisle ze sobą powiązane:

$+\Delta L_+$	$-\Delta L_-$	$\Delta L_- = 10 \cdot \log_{10}\left(2 - 10^{\frac{\Delta L_+}{10}}\right)$
0,10	-0,10	granica stosowalności przybliżeń liniowych !
0,25	-0,27	asymetria wartości niepewności
0,81	-1,00	
1,00	-1,30	
1,65	**-2,70**	
2,00	-3,82	
2,70	-8,60	dolne granice są już nieinterpretowalne !
3,00	-23,24	

Na koniec uwaga praktyczna:

- jeśli w czasie pomiarów obserwujemy zbyt wielki rozrzut wyników (rzędu kilku decybeli), to na pewno nie wiemy co mierzymy!

  Zastosowanie statystyki do takich wyników nie da nam żadnej odkrywczej informacji, poza unaocznieniem faktu, że wyciąganie średniej z takich wyników jest obarczone kolosalnym błędem.

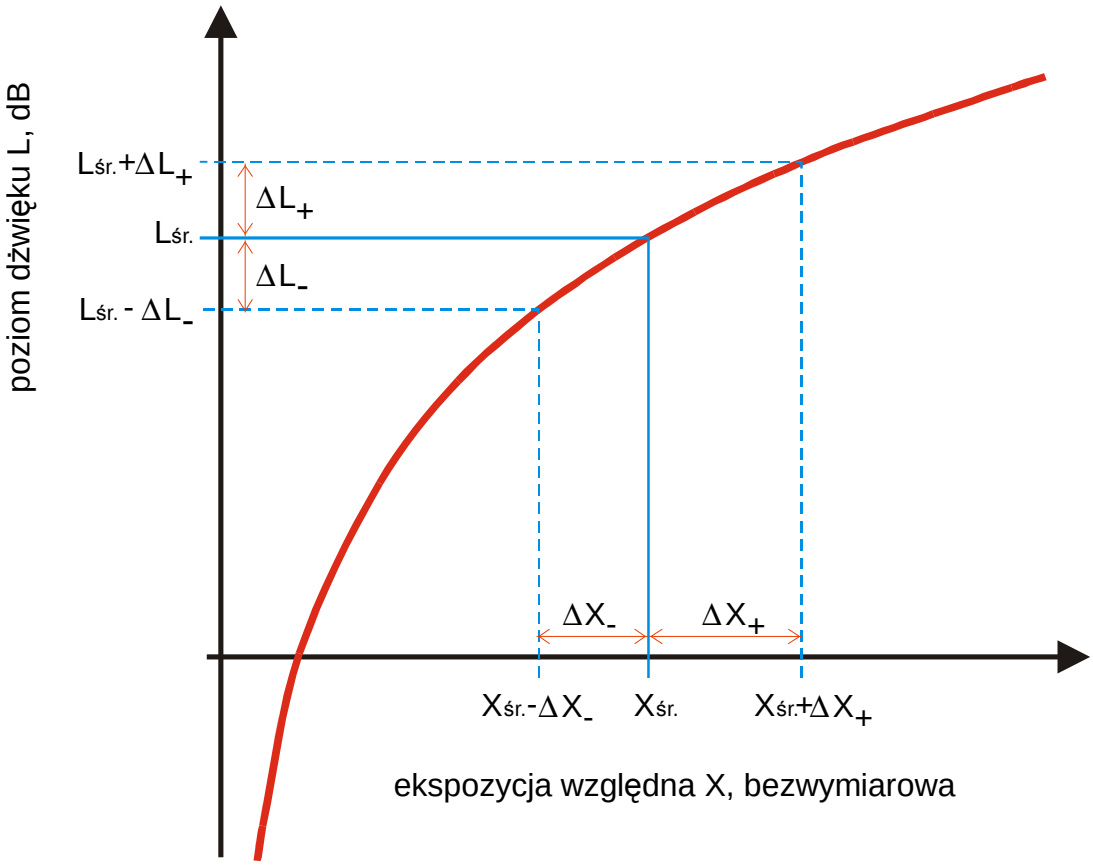
Jest też istotna pozytywna konsekwencja prowadzenia dalszych rachunków niepewności na ekspozycjach względnych - ponieważ ekspozycja jest addytywna, to wszelkie wzory się wyjątkowo upraszczają i liczenie różniczek jest już *„trywialne”*[1]...

LITERATURA:
1. I.N.Bronsztejn, K.A.Siemiendiajew, „Matematyka - Poradnik encyklopedyczny”, PWN, Warszawa 1976
2. Roman Nowak, „Statystyka dla fizyków”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002, ISBN 83-01-13702-9
3. „Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik.”, GUM, 1999, ISBN 83-906546-1-x
4. „Tablice matematyczne”, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 2004, ISBN 83-7350-048-0
5. Polska Norma PN-83/B-02154/02 - „*Akustyka budowlana. Pomiary izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych. Ustalenia dotyczące dokładności.*”
6. T.Gerstenkorn, T.Śródka, „Kombinatoryka i rachunek prawdopodobieństwa”, PWN, Warszawa 1972, ISBN 83-01-00204-2

[1] *trivium* - niższy stopień nauki szkolnej w średniowieczu, obejmujący studium trzech przedmiotów (gramatyki, retoryki i dialektyki), wchodzących w skład sztuk wyzwolonych (Słownik wyrazów obcych, WN PWN S.A., Warszawa 2000)

Dodatek - niepewności typu B

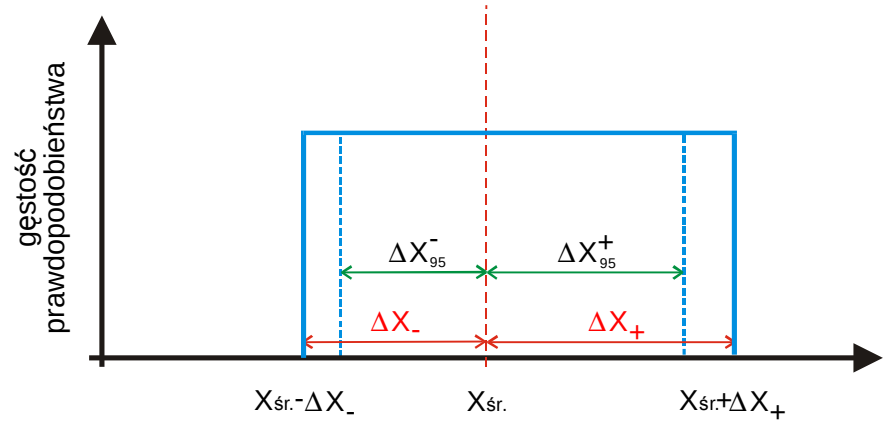
Co zrobić dla rachunku na wielkościach X, gdy mamy dane symetryczne granice błędów dla poziomu L ?



$$\Delta X_{+} = 10^{\frac{L_{śr.}+\Delta L_{+}}{10}} - 10^{\frac{L_{śr.}}{10}} = 10^{\frac{L_{śr.}}{10}} \cdot \left(10^{\frac{\Delta L_{+}}{10}} - 1 \right)$$

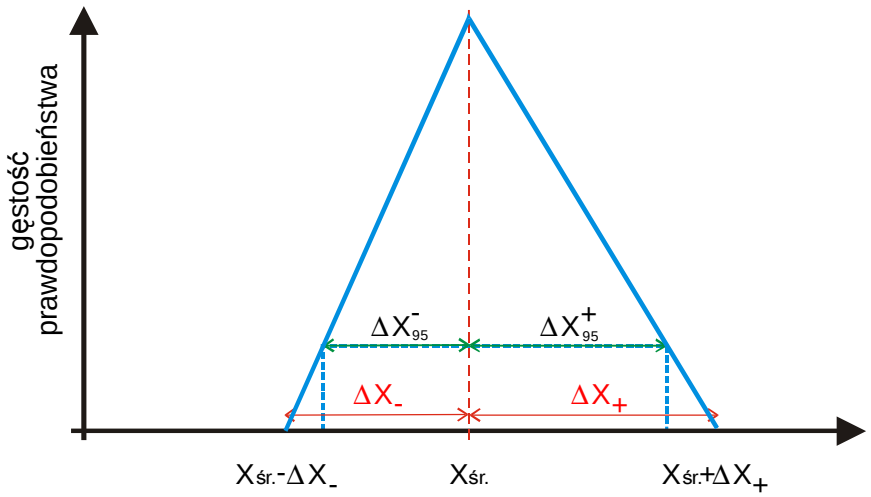
$$\Delta X_{-} = 10^{\frac{L_{śr.}}{10}} - 10^{\frac{L_{śr.}-\Delta L_{-}}{10}} = 10^{\frac{L_{śr.}}{10}} \cdot \left(1 - 10^{\frac{\Delta L_{-}}{10}} \right)$$

$$\Delta L_{+} = \Delta L_{-} = \Delta L \quad \Rightarrow \quad \Delta X_{-} = \Delta X_{+} \cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}}$$



ekspozycja względna X, bezwymiarowa

$$\left(\Delta L_{+}=\Delta L_{-}=\Delta L\right)\Rightarrow\begin{cases}\Delta X_{95}^{+}=10^{\frac{L_{śr.}}{10}}\cdot\left(10^{\frac{\Delta L}{10}}-1\right)\cdot 0{,}95\\ \Delta X_{95}^{-}=\Delta X_{95}^{+}\cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}}\end{cases}$$



ekspozycja względna X, bezwymiarowa

$$\left(\Delta L_{+}=\Delta L_{-}=\Delta L\right)\Rightarrow\begin{cases}\Delta X_{95}^{+}=10^{\frac{L_{śr.}}{10}}\cdot\left(10^{\frac{\Delta L}{10}}-1\right)\cdot\left(1-\underbrace{\frac{\sqrt{5}}{10}}_{\approx 0{,}767}\right)\\ \Delta X_{95}^{-}=\Delta X_{95}^{+}\cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}}\end{cases}$$

14 2 43