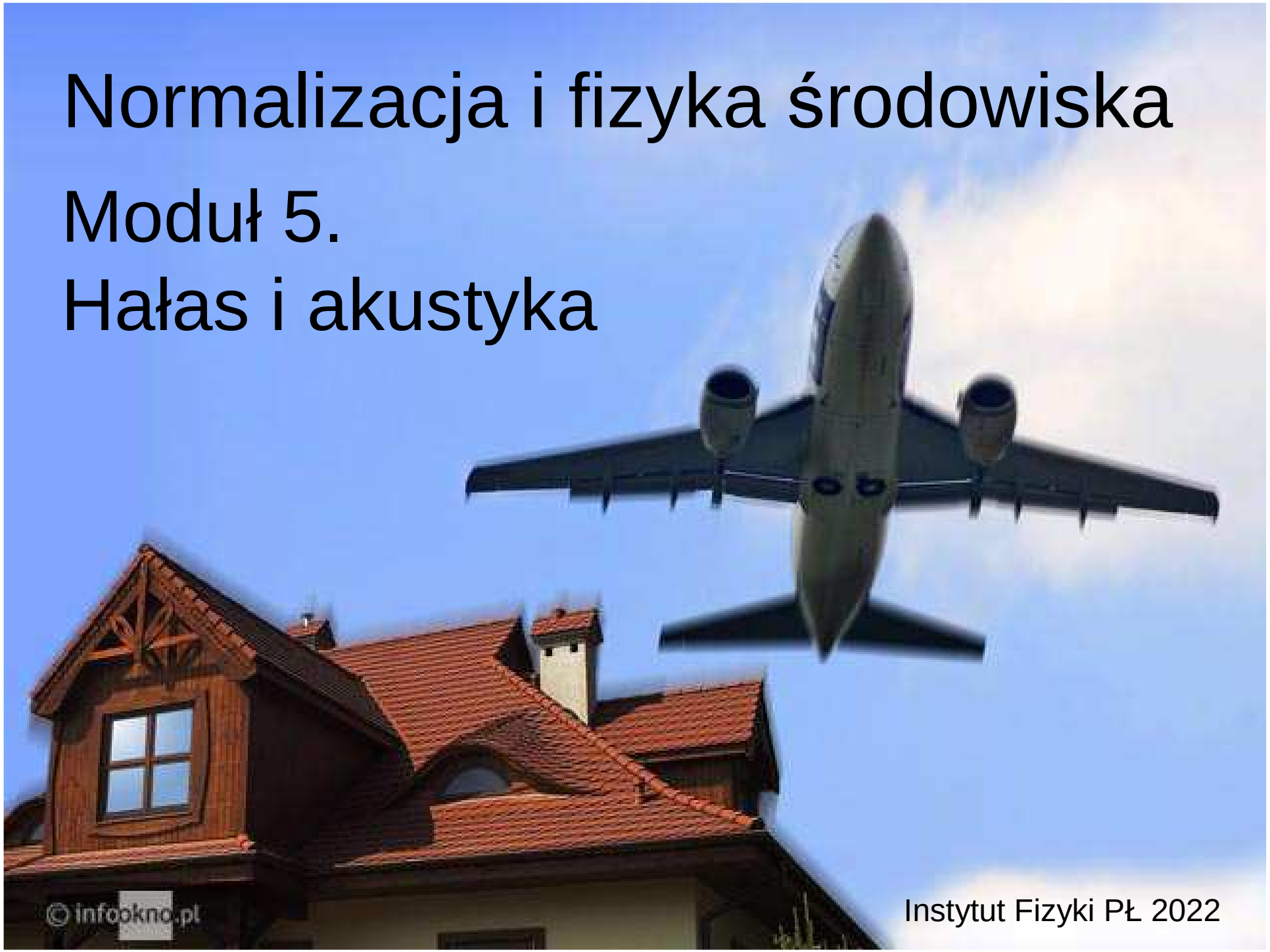
Normalizacja i fizyka środowiska

Moduł 5.
Hałas i akustyka



Instytut Fizyki PŁ 2022

5.1. Podstawowe terminy i definicje

W celu opisu intensywności dźwięku Polskie Normy definiują kilka wielkości podstawowych razem z ich symbolami i jednostkami:

p [Pa] *ciśnienie akustyczne* - różnica między całkowitym ciśnieniem chwilowym a ciśnieniem statycznym [wg PN-EN ISO 3744:2011 oraz PN-EN 61672-1:2014-03]

E_T [Pa^2·s] *ekspozycja na dźwięk / hałas* w czasie *T* [PN-ISO 1999:2000]

$$\boxed{E_T = \int_T p^2(t)dt} \tag{5.1}$$

P lub W [W] *moc akustyczna* – dla danej powierzchni iloczyn ciśnienia akustycznego *p* i składowej prędkości akustycznej u_n w punkcie na tej powierzchni i w kierunku prostopadłym do tej powierzchni, scałkowany na tej powierzchni [PN-EN ISO 3744:2011]

$$\boxed{P = \int_S p\, u_n\, dS.} \tag{5.2}$$

J [J - dżul] *energia akustyczna* – całka mocy akustycznej *P* w ustalonym przedziale czasu trwania [PN-EN ISO 3744:2011]

$$\boxed{J = \int_{t_1}^{t_2} P(t)\, dt} \tag{5.3}$$

I [W/m^2] *natężenie dźwięku* – moc akustyczna *P* przez pole powierzchni *S* prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali

$$\boxed{I = P/S} \tag{5.4}$$

Uwaga: natężenie dźwięku nie zostało zdefiniowane w PN, natomiast jest szeroko używane w literaturze, np. [1, 2].

5.2. Logarytmiczna skala natężenia dźwięku

Ponieważ wielkości podstawowe zmieniają się o wiele rzędów wartości, w praktyce stosuje się różnego rodzaju *poziomy* wyrażone w decybelach [dB]:

L_p *poziom ciśnienia akustycznego* [PN-EN ISO 3744:2011, PN-EN 61672-1:2014-03, PN-ISO 1999:2000], znany także jako *poziom dźwięku* [PN-ISO 1996-1:2006]

$$\boxed{L_p\,[\mathrm{dB}] = 10\lg\frac{p^2}{p_{\mathrm{odn}}^2},} \qquad \text{gdzie } p_{\mathrm{odn}} = 2\cdot 10^{-5}\ \mathrm{Pa} \qquad (5.5)$$

$L_{E,T}$ poziom *ekspozycji na dźwięk / hałas* w czasie T [PN-ISO 1999:2000, PN-ISO 1996-1:2006]

$$\boxed{L_{E,T}\,[\mathrm{dB}] = 10\lg\frac{E_T}{E_{\mathrm{odn}}},} \qquad \text{gdzie } E_{\mathrm{odn}} = (20\ \mu\mathrm{Pa})^2\cdot \mathrm{s} \qquad (5.6)$$

L_W *poziom mocy akustycznej* [PN-EN ISO 3744:2011]

$$\boxed{L_W\,[\mathrm{dB}] = 10\lg\frac{P}{P_{\mathrm{odn}}},} \qquad \text{gdzie } P_{\mathrm{odn}} = 1\ \mathrm{pW} \qquad (5.7)$$

L_J *poziom energii akustycznej* [PN-EN ISO 3744:2011]

$$\boxed{L_J\,[\mathrm{dB}] = 10\lg\frac{J}{J_{\mathrm{odn}}},} \qquad \text{gdzie } J_{\mathrm{odn}} = 1\ \mathrm{pJ} \qquad (5.8)$$

L_I *poziom natężenia dźwięku* [1, 2]

$$\boxed{L_I\,[\mathrm{dB}] = 10\lg\frac{I}{I_{\mathrm{odn}}},} \qquad \text{gdzie } I_{\mathrm{odn}} = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2} \qquad (5.9)$$

Logarytmiczna skala natężenia dźwięku

Dla poziomów wyrażonych w decybelach potrzeby jest zbiór uzgodnionych wartości odniesienia. Oprócz norm wprowadzających poszczególne poziomy, wszystkie wartości odniesienia zebrano w [PN-EN ISO 1683:2015-09] i podzielone na trzy przypadki rozchodzenia się dźwięku:
1) w powietrzu i innych gazach,
2) w wodzie i innych cieczach,
3) drgania mechaniczne w materiałach stałych.

Tabela 5.1. Poziomy odniesienia dla wielkości charakteryzujących dźwięki rozchodzące się w powietrzu i gazach wg [PN-EN ISO 1683:2015-09].

Wielkość	Poziom odniesienia
Ciśnienie akustyczne	20 μPa
Ekspozycja na dźwięk	$(20\ \mu Pa)^2 \cdot s$
Moc akustyczna	1 pW
Energia akustyczna	1 pJ
Natężenie dźwięku	$1\ pW/m^2$

Uwaga 1: poziomy odniesienia 20 μPa oraz $1\ pW/m^2$ odpowiadają w przybliżeniu progowi słyszalności, natomiast pozostałem poziomy nie mogą być jednoznacznie powiązane z tym progiem.

Uwaga 2: dla przypadków ośrodków ciekłych oraz materiałów stałych obowiązują inne wartości poziomów odniesienia (pominięte w tym kursie).

5.3. Uśrednianie poziomów w czasie

Lokalne fluktuacje ciśnienia akustycznego $p(t)$ w ogólności są nieharmoniczne, zatem nie mają dobrze określonej amplitudy. Postępowanie podczas uśredniania zależy od charakteru dźwięku.
Według [PN-EN ISO 3744:2011] wprowadza się:

$L_{p,T}$ *uśredniony w czasie poziom ciśnienia akustycznego*, w ustalonym przedziale czasu trwania T rozpoczynając od t_1 a kończąc na t_2 :

$$\boxed{L_{p,T}[\mathrm{dB}] = 10\lg\left[\frac{\overline{p^2(t)}}{p_{\mathrm{odn}}^2}\right],} \tag{5.10}$$

gdzie wartość średnia kwadratowa ciśnienia akustycznego

$$\overline{p^2(t)} \equiv p_{\mathrm{rms}}^2 = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} p^2(t)\,\mathrm{d}t. \tag{5.11}$$

$L_{E,T}$ *uśredniony w czasie poziom ciśnienia akustycznego* <u>*pojedynczego zdarzenia*</u>:

$$\boxed{L_{E,T}[\mathrm{dB}] = 10\lg\left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t)\,\mathrm{d}t}{E_{\mathrm{odn}}}\right],} \tag{5.12}$$

Uwaga: zdefiniowana powyżej wielkość jest równoważnie nazywana *poziomem ekspozycji na hałas*.

5.4. Związki między wielkościami opisującymi hałas

Gęstość energii fali ε [J/m^3] jest sumą energii kinetycznej i potencjalnej podzielonej przez objętość V_0

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\rho_0 u^2 + \frac{1}{2}\frac{p^2}{\rho_0 c_0^2} \xrightarrow[\text{po czasie}]{\text{średnia}} \varepsilon = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho_0 c_0^2}, \tag{5.13}$$

gdzie: u – prędkość ośrodka, ρ_0 – wartość średnia gęstości ośrodka, c_0 – prędkość dźwięku.

Wykorzystując zasadę zachowania energii możemy powiązać *natężenie dźwięku I* [W/m^2], czyli gęstość strumienia energii, z gęstością energii ε [J/m^3].

- Dla fali płaskiej rozchodzącej się wzdłuż określonej osi otrzymujemy

$$I = \varepsilon c_0 \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{I = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho_0 c_0},} \tag{5.14}$$

- W przypadku pola dźwięku rozproszonego, zdefiniowanego jako pole fal o równej mocy nadchodzących z różnych kierunków, natężenie odpowiadające pewnemu ciśnieniu akustycznemu okazuje się mniejsze 4 razy

$$I = \frac{1}{4}\varepsilon c_0 \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{I = \frac{p_{\text{rms}}^2}{4\rho_0 c_0},} \tag{5.15}$$

Wniosek: związek pomiędzy I oraz p_{rms} jest niejednoznaczny, gdyż zależy od:
- geometrii układu,
- warunków atmosferycznych, które wpływają na wartości ρ_0 i c_0.

Związki między wielkościami opisującymi hałas

Ponieważ wielkości p_{rms} [Pa] i I [W/m^2] nie są jednoznacznie powiązane, odpowiadające im p**oziomy L_I i L_p nie są równoważne.** Przyrządy pomiarowe reagują zwykle na ciśnienie i podają wartość L_p.

Poziom natężenia dźwięku jest zdefiniowany

$$\boxed{L_I\,[\mathrm{dB}] = 10\log\frac{I}{I_{\mathrm{odn}}},} \qquad (5.9)$$

Śr. poziom ciśnienia akustycznego definiuje się

$$\boxed{L_{p,T}\,[\mathrm{dB}] = 10\log\frac{p_{\mathrm{rms}}^2}{p_{\mathrm{odn}}^2},} \qquad (5.10)$$

W przypadku fali płaskiej rozchodzącej się wzdłuż określonej osi

$$L_{p,T} = 10\ \lg\frac{p_{\mathrm{rms}}^2}{p_{\mathrm{odn}}^2} = 10\ \lg\left(\frac{I\ \rho_0 c_0 I_{\mathrm{odn}}}{I_{\mathrm{odn}}\,p_{\mathrm{odn}}^2}\right) = L_I + 10\ \lg\left(\frac{\rho_0 c_0 I_{\mathrm{odn}}}{p_{\mathrm{odn}}^2}\right) = L_I + 0{,}06\ \mathrm{dB} \qquad (5.16)$$

dla suchego powietrza w temp. 23°C, pod ciśnieniem 101325 Pa.

Dla pola dźwięku rozproszonego

$$L_{p,T} = L_I + 6{,}06\ \mathrm{dB}. \qquad (5.17)$$

W normie [PN-EN ISO 3744:2011], w której nie występuje poziom natężenia dźwięku L_I, podano związek *średniego poziomu ciśnienia akustycznego* $L_{p.T}$ z *poziomem mocy akustycznej* L_W

$$L_W = L_{p.T} + 10\ \lg\frac{S}{1\mathrm{m}^2}, \qquad (5.18)$$

gdzie S jest polem powierzchni pomiarowej w [m^2]. W przypadku znacznych odchyleń od warunków odniesienia 23°C i 101325 Pa, norma określa potrzebne poprawki do powyższego związku.

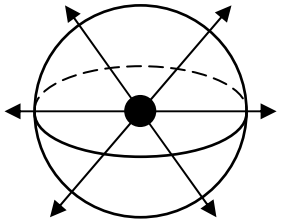
5.5. Rozchodzenie się fali dźwiękowej

Natężenie dźwięku *I* pochodzącego od źródła o mocy akustycznej *P*

$$I = \frac{P}{S}, \tag{5.19}$$

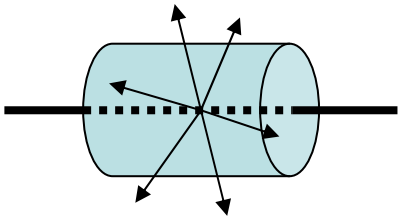
gdzie S jest polem powierzchni.

- W przypadku gdy ze źródła punktowego rozchodzi się fala kulista natężenie dźwięku w odległości *r*



$$I = \frac{P}{4\pi r^2}. \tag{5.20}$$

- Jeżeli dźwięk rozchodzi się ze źródła liniowego, np. linia wysokiego napięcia, opisanego mocą na jednostkę długości *P'* [W/m]



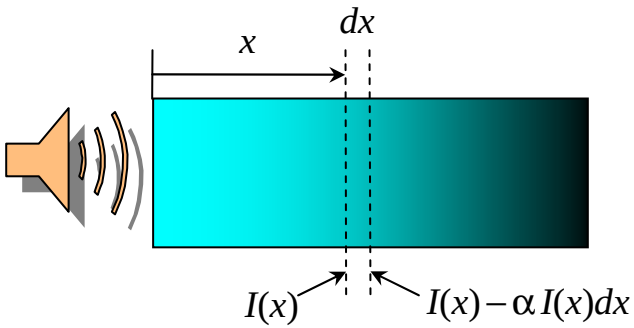
$$I = \frac{P'}{2\pi r}. \tag{5.21}$$

- Jeżeli dźwięk rozchodzi się z płaszczyzny o dużych wymiarach w porównaniu do odległości źródła, np. płaska ściana budynku i opisany jest mocą na jednostkę powierzchni *P''* [W/m^2]

$$I = P''. \tag{5.22}$$

5.6. Ograniczanie przenoszenia dźwięków

Natężenie płaskiej fali dźwiękowej po przejściu przez ośrodek tłumiący jest opisane prawem analogicznym do prawa Lamberta-Beera dla promienia fali świetlnej



Rys. 5.1.

Absorpcja fali w cienkiej warstwie ośrodka jest proporcjonalna do grubości warstwy dx i do natężenia fali $I(x)$ [W/m^2]

$$dI = -\alpha\, I(x)dx\,, \tag{5.23}$$

gdzie α [m^{-1}] jest współczynnikiem absorpcji fali akustycznej. Stąd po scałkowaniu otrzymujemy

$$\boxed{I(x) = I_0\, \mathrm{e}^{-\alpha \cdot x}\,.} \tag{5.24}$$

Izolacja dźwiękowa

Gdy fala dźwiękowa o mocy akustycznej W_1 pada na element rozdzielający i na drugą stronę transmitowana jest moc W_2, to *izolacyjność akustyczną właściwą* określa się jako [PN-EN 12354-1:2002]:

$$\boxed{R = 10\lg\frac{1}{t} = 10\lg\frac{W_1}{W_2} = L_{W1} - L_{W2}.} \quad (5.25)$$

Poziom mocy L_{W1} padającej na powierzchnię S wiąże się z poziomem ciśnienia akustycznego L_{p1} w pomieszczeniu źródłowym wzorem (5.18)

$$L_{W1} = L_{p1} + 10\lg\left(S/1\,\mathrm{m}^2\right). \quad (5.26)$$

Po stronie pomieszczenia odbiorczego:

$$L_{W2} = L_{p2} + 10\lg\left(A/1\,\mathrm{m}^2\right), \quad (5.27)$$

L_{p2} [dB] – poziom średniego ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym,

A [m^2] – *równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej w pomieszczeniu odbiorczym* [PN-EN 12354-1:2002]

Podstawiając (5.26) i (5.27) do (5.25) otrzymujemy

$$\boxed{R[\mathrm{dB}] = L_{p1} - L_{p2} + 10\lg\frac{S}{A}.} \quad (5.28)$$

Uwagi:

1). Równoważne pole powierzchni A nie jest tożsame z powierzchnią wewnętrzną pomieszczenia. Wielkość ta uwzględnia rodzaj materiałów wpływających na odbicia i pochłanianie dźwięku w pomieszczeniu,

2). Izolacyjność właściwa R jest funkcją częstotliwości, tak więc należy rozważać izolacyjność w danym wąskim paśmie. Podwójne ściany oddzielone warstwą izolacji cieplnej oraz podwójne szyby mogą mieć małą izolacyjność R dla niskich częstotliwości z powodu wpadania w rezonans.

Nieszczelność dźwiękowa

Rozważmy nieszczelność o powierzchni S_1 i izolacyjności dźwiękowej R_1 oraz współczynniku transmisji akustycznej t_1. Pole pozostałej powierzchni ściany wynosi $(S - S_1)$, izolacyjność R i wsp. transmisji t. Średni współczynnik t_r dla całej ściany otrzymujemy rozważając moc W przenoszoną do pokoju odbierającego hałas, w którym natężenie dźwięku wynosi I_2 [W/m^2]

$$P = I_2 t_r S = I_2 t_1 S_1 + I_2 t (S - S_1) \qquad \Rightarrow \qquad t_r = t_1 \frac{S_1}{S} + t\left(1 - \frac{S_1}{S}\right) = \frac{S_1}{S}(t_1 - t) + t. \qquad (5.29)$$

Stąd efektywna izolacyjność

$$R_{\mathrm{ef}} = 10 \lg \frac{1}{t_r} = -10 \lg\left[t + \frac{S_1}{S}(t_1 - t)\right] = -10 \lg t - 10 \lg\left[1 + \frac{S_1}{S}\left(\frac{t_1}{t} - 1\right)\right]. \qquad (5.30)$$

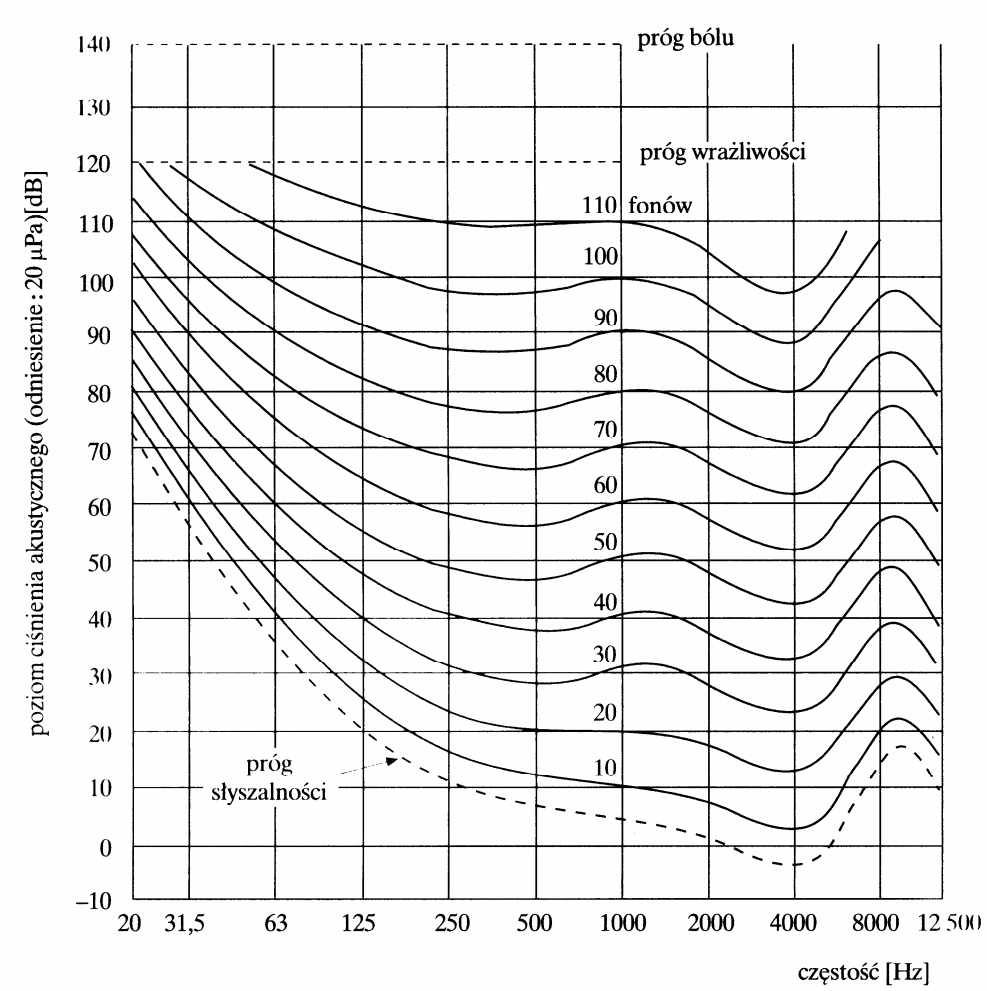
Podstawiając $t = 10^{-R/10}$ oraz $t_1 = 10^{-R1/10}$, otrzymujemy

$$\boxed{R_{\mathrm{ef}} = R - 10 \lg\left[1 + \frac{S_1}{S}\left(10^{(R - R_1)/10} - 1\right)\right].} \qquad (5.31)$$

<u>Przykład:</u>
Dla ściany o R = 50 dB z małym otworem $S_1/S = 10^{-4}$ w którym R_1 = 0 otrzymujemy R_{ef} = 39,6 dB. Należy zatem zatykać wszystkie otwory, ze szparami pod drzwiami włącznie.

Nieszczelność dźwiękowa opracowana na podst. [1].

5.7. Zdolność percepcyjna człowieka i kryteria hałasu



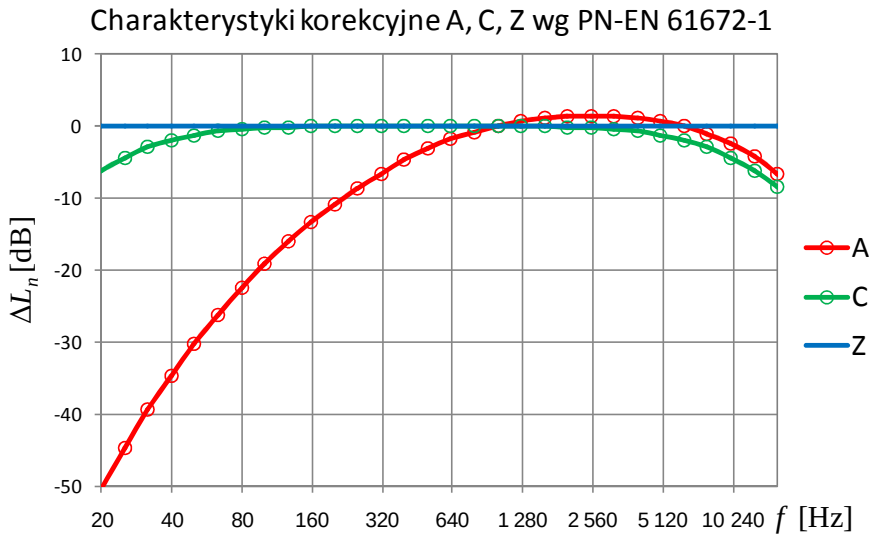
Czułość ludzkiego ucha na dźwięki zależy od częstotliwości (rys. 5.2). Największa czułość występuje przy częstotliwości około 4 kHz.

Dla częstotliwości 1 kHz odczuwalny poziom głośności wyrażony w *fonach* jest równy liczbowo poziomowi natężenia [dB]. Dźwięki o tej samej liczbie fonów wywołują to samo wrażenie głośności, ale nie muszą to być dźwięki o takiej samej barwie i tonie podstawowym.

Rys. 5.2. Krzywe jednakowego poziomu głośności (izofoniczne) dla osób w wieku 18-30 lat. Ponieważ układ doświadczalny korzysta z fal płaskich poziomy $L_p \approx L_I$. (*źródło: [1], rys. 6.6*)

Skala dBA

W praktyce w celu wyznaczenia odczuwalnego poziomu dźwięku na podstawie rozkładu poziomów ciśnień akustycznych L_{pi} [dB] w pasmach częstotliwości korzysta się z charakterystyk korekcyjnych A i C (rys. 5.4). Poprawki ΔL_i należy dodać do poziomów L_{pi} określonych w pasmach tercjowych (1 tercja = 1/3 oktawy; 1 oktawa obejmuje zakres częstotliwości różniących się dwa razy).



Rys. 5.4. Krzywe korekcyjne A, C i Z (bez korekty). Krzywa A wynika z odwrócenia i wygładzenia krzywych izofonicznych z rys. 5.2 dla dźwięków o niebyt dużej głośności.

Po zastosowaniu poprawek ΔL_i do poziomów ciśnień akustycznych L_{pi} znajdujemy wypadkowy poziom L_A [dBA] albo L_C [dBC] zgodnie z prawem składania skorygowanych poziomów L'_{p1}, L'_{p2},…

$$L_A = 10\,\lg\left(10^{L'_{p1}/10} + 10^{L'_{p2}/10} + \ldots\right), \qquad L'_{pi} = L_{pi} + \Delta L_i\,. \tag{5.32}$$

Skala dBA

Norma PN-EN 61672-1:2014-03 definiuje krzywe korekcyjne A i C bez wskazania w jakich sytuacjach należy je stosować.

Zwyczajowo przyjmuje się:
krzywa A – dla niezbyt dużych poziomów dźwięku,
krzywa C – dla dużych poziomów > 85 dB.

Według aktów polskiego prawa:
krzywa A – jest stosowana dla wszelkich pomiarów hałasu niezależnie od jego poziomu,
krzywa C – **nie wymieniana w polskim prawie.**

Norma PN-T-06460:1979 (z 1979 roku) definiowała aż cztery krzywe korekcyjne A, B, C oraz D.
Po zastąpieniu tej normy przez PN-EN 61672-1:2014-03 krzywe B i D stały się formalnie niezdefiniowane, jednakże wciąż spotykane są urządzenia oferujące tego typu korekty.

Kryteria hałasu

Skala dBA jest zwykle wykorzystywana w normach regulujących poziom dopuszczalnego hałasu.
W Polsce obowiązuje norma **PN-B-02151-2:2018-01** dotycząca hałasu w pomieszczeniach.

Tabela 5.1. Wybrane dopuszczalne poziomy dźwięku [dBA] w pomieszczeniach.

Przeznaczenie pomieszczenia	Równoważny średni poziom	Maksymalny poziom
Pomieszczenia mieszkalne	25	30
Kuchnie i pomieszczenia sanitarne	35	-
Pokoje w hotelach turystycznych	30	35
Sale łóżkowe w szpitalach	25	30
Obiekty sportowe	50	-
Sklepy	50	-

Kryteria hałasu

Skala dBA jest zwykle wykorzystywana w normach regulujących poziom dopuszczalnego hałasu.
W Polsce obowiązuje dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej **2002/49/WE** dotycząca hałasu w środowisku, wprowadzona na podstawie rozporządzeń Ministra Infrastruktury oraz Ministra Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnych (tereny otwarte).

Tabela 5.2. Docelowa jakość akustyczna w odniesieniu do hałasu dla istniejących obszarów zurbanizowanych [dBA].

Przeznaczenie terenu	dzień	noc
Strefa z przewagą placówek medycznych, oświatowych i kulturalnych	60	50
Strefy z przewagą terenów mieszkalnych	65	55
Strefy z przewagą terenów sektora usługowego	70	65
Strefy z przewagą terenów rekreacyjnych i widowiskowych	73	63
Strefy z przewagą terenów przemysłowych.	75	65
Strefy zajmowane przez systemy infrastruktury transportowej lub inne niezbędne wyposażenie publiczne	brak	brak

Literatura do modułu 5

1. E. Boeker, R. van Grondelle, „Fizyka środowiska”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
2. https://pl.wikipedia.org - hasło „Natężenie dźwięku”.
3. PN-EN 61672-1:2014-03 „Elektroakustyka -- Mierniki poziomu dźwięku -- Część 1: Wymagania”.
4. PN-T-06460:1979 „Mierniki poziomu dźwięku”.
5. PN-EN ISO 3744:2011 „Akustyka -- Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego -- Metody techniczne stosowane w warunkach zbliżonych do pola swobodnego nad płaszczyzną odbijającą dźwięk”.
6. PN-ISO 1999:2000 „Akustyka -- Wyznaczanie ekspozycji zawodowej na hałas i szacowanie uszkodzenia słuchu wywołanego hałasem”.
7. PN-ISO 1996-1:2006 „Akustyka -- Opis, pomiary i ocena hałasu środowiskowego -- Część 1: Wielkości podstawowe i procedury oceny”.
8. PN-EN ISO 1683:2015-09 „Akustyka -- Preferowane wartości odniesienia dla poziomów akustycznych i drganiowych”.
9. PN-EN 12354-1:2002 „Akustyka budowlana -- Określenie właściwości akustycznych budynków na podstawie właściwości elementów -- Część 1: Izolacyjność od dźwięków powietrznych między pomieszczeniami”.
10. PN-B-02151-2:2018-01 „Akustyka budowlana -- Ochrona przed hałasem w budynkach -- Część 2: Wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu dźwięku w pomieszczeniach”.

K O N I E C