VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

PAVEL SCHAUER

APLIKOVANÁ FYZIKA

MODUL 5

AKUSTIKA

STUDIJNÍ OPORY

PRO STUDIJNÍ PROGRAMY S KOMBINOVANOU FORMOU STUDIA

Recenzoval: Prof. RNDr. Tomáš Ficker, CSc.

OBSAH

1 Úvod

Akustika je oblast fyziky, která je v učebnicích fyziky většinou nedostatečně popsána. Pod pojmem akustika nebo zvuk v učebnicích často najdeme jen strohé informace. Je to tím, že principy akustiky častěji popisují technici nežli fyzici a to ještě každý po svém. Při výměně informací a spolupráci fyziků s akustickými inženýry často dochází ke střetu zájmů. Proč? Výstižně tuto skutečnost vyslovil F.V. Hunt.

> „Akustika je charakterizována tím, že spoléhá na využití fyzikálních principů čerpaných z jiných (rozuměj nefyzikálních) zdrojů. A proto, primární **úloha moderní akustiky** je převést tuto směs principů do srozumitelných a promyšlených zákonitostí, abychom mohli pochopit, změřit, ovládat a využít celou škálu fenoménu kmitů v jakékoliv oblasti.“

Origins in Acoustics. F.V. Hunt. Yale University Press, 1978

Pokusíme se alespoň zčásti naplnit jeho slova.

1.1 Cíle

Tento studijní text je určen pro posluchače Stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně a má sloužit jako jeden z učebních textů pro studium aplikované fyziky. Cílem je vybudování spolehlivého základu vědomostí jež umožní budoucímu stavebnímu inženýrovi zvládat technické problémy v aplikační oblasti. Studijní text navazuje na moduly základní řady fyzikálních studijních opor a je součástí série modulů Aplikovaná fyzika, které spolu jako jeden celek tvoří úplnou studijní literaturu z oblasti termiky, záření a akustiky.

Tento pátý modul Akustika, je rozdělen do tří kapitol. Cílem je popsat základní definice a zákony a rozšířit tyto poznatky o znalosti pro použití v technické praxi.

Výklad je průběžně doplněn kontrolními otázkami, řešenými příklady, neřešenými příklady a aplikacemi vyskytujícími se v technické praxi.

1.2 Požadované znalosti

1.2.1 Fyzika

Veličiny a jednotky, fyzikální rovnice, mechanika, hydromechanika, kmity a vlnění, stavové veličiny, termodynamika.

1.2.2 Matematika

Vektory, derivace, určitý a neurčitý integrál.

1.3 Doba potřebná ke studiu

10 hodin

1.4 Klíčová slova

Vlnění, akustický tlak, akustická rychlost, vlnová rovnice, rovinná vlna, akustická impedance, akustický odpor, akustická energie, objemová hustota akustické energie, akustický výkon, akustická intenzita, hladina akustické intenzity, hladina akustického tlaku, hladina akustického výkonu, fyziologická akustika, vnímání zvuku, hladina hlasitosti, hlasitost, zvuková spektra, analýza zvuku, účinky zvuku na člověka, fyzikální akustika, maskování zvuku, směšování zvuku, ozvěna, šíření zvuku v otevřeném prostoru, akustika interiéru, statistická akustika, činitel zvukové pohltivosti, názvuk a dozvuk, doba dozvuku

1.5 Přehled použitých symbolů

α	činitel útlumu, činitel zvukové pohltivosti
λ	vlnová délka
γ	Poissonova konstanta
μ	Poissonovo číslo
∇	gradient (operátor), někdy jen grad
∇^2	Laplaceův operátor
ρ	hustota, činitel zvukové odrazivosti
$\vec{\xi}, \xi, \xi_{\max}$	výchylka částice prostředí, amplituda výchylky částice prostředí
ω	úhlová frekvence vlny
a	zrychlení částice prostředí
A	zvuková pohltivost
c, c_t, c_l	rychlost šíření vlny, rychlost šíření příčné vlny, rychlost šíření podélné vlny
f	frekvence vlny
d	vzdálenost
E	modul pružnosti v tahu, akustická energie
F	síla
G	modul pružnosti ve smyku
I, I_r	akustická intenzita, referenční hodnota akustické intenzity
K	modul objemové pružnosti
L_I, L_p, L_P	hladina akustické intenzity, hladina akustického tlaku, hladina akustického výkonu
L_N	hladina hlasitosti

m	hmotnost
N	měrný akustický výkon, hlasitost
$p, p_{\mathrm{ef}}, p_{\mathrm{r}}$	tlak, akustický tlak, efektivní hodnota akustického tlaku, referenční hodnota akustického tlaku
$\hat{p}$	komplexní vyjádření akustického tlaku
p_0	atmosférický tlak
P, P_{r}, P_a	akustický výkon, referenční hodnota akustického výkonu, pohlcený akustický výkon
r	poloměr, vzdálenost, měrný akustický odpor
R	zvuková odrazivost
S	plocha, průřez
t	čas, teplota (ve $^{\circ}$C)
T	termodynamická teplota (v K), zvuková průzvučnost
V	objem
$\vec{v}, v$	akustická rychlost
w	měrný objemový výkon, objemová hustota akustické energie
W	práce
x	souřadnice polohy
$\hat{Z}$	měrná akustická impedance

2 Úvod do akustiky

Akustika je nauka o zvuku. **Zvuk je mechanické vlnění** v plynech, kapalinách a pevných látkách, které dokáže vnímat lidský sluchový orgán a mozek zpracovat ve zvukový vjem. Akustika tedy velice těsně navazuje na **kmity a vlnění**, které byly vyučovány v základním kurzu. Abychom lépe navázali, provedeme si malou rekapitulaci pojmů mechanického vlnění.

2.1 Rekapitulace základních pojmů vlnění

Mechanické vlnění je děj, při němž se kmitání šíří látkovým prostředím. Šíření vln není spojeno s přenosem látky. Vlněním se přenáší energie.

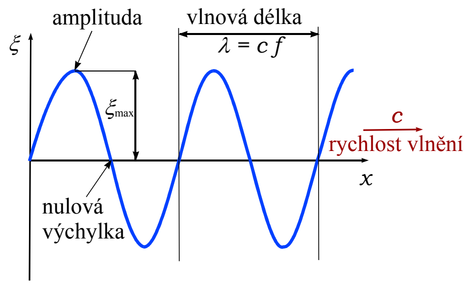
Postupné vlnění je takové, při kterém vlnění postupuje – šíří se prostředím. **Postupné vlnění příčné** je takové, při němž částice pružného prostředí kmitají kolmo na směr postupu vlny. **Postupné vlnění podélné** je takové, při němž částice pružného prostředí kmitají ve směru postupu vlny. To, zda vznikne vlnění příčné nebo podélné, závisí zejména na skupenství prostředí. Příčné vlnění může vzniknout pouze v prostředí, kde mohou existovat smyková napětí a to je v **pevném prostředí**. V tomto prostředí se může šířit i vlnění podélné, závisí to na způsobu buzení vlny. V **kapalném a plynném prostředí** může vzniknout jen podélné vlnění.

Stojaté vlnění vznikne jestliže dvě vlnění o stejné amplitudě výchylky a stejné frekvenci postupují pružným prostředí proti sobě. Vznikne vlna, která nepostupuje. Vlna má **uzly**, ve kterých je amplituda výchylky částic trvale nulová a jež jsou navzájem vzdáleny o polovinu vlnové délky λ a **kmitny,** ve kterých je amplituda trvale maximální a jsou rovněž vzdáleny o $\frac{\lambda}{2}$.

Vlnová délka je délka opakujícího se úseku vlny, značíme ji λ. **Frekvence vlny** vyjadřuje počet vlnových délek, které vlna urazí za 1 s. Vlnová délka λ souvisí s **frekvenci vlny** f rovnicí,

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

kde c je **rychlost šíření** vlny. Místo frekvence vlny se často používá **úhlová frekvence vlny** $\omega = 2\pi f$.



obr. 2.1 parametry vlny (příčná vlna)

Fáze popisuje stav vlny v daném místě $\vec{r}$ a čase t, v jednorozměrném případě je vyjádřena vztahem $\omega(t - \frac{x}{c})$.

Rychlost šíření vlny c závisí na fyzikálních parametrech prostředí. Pro rychlost příčných vln v pevném prostředí platí

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \tag{1}$$

kde G je modul pružnosti ve smyku a ρ je hustota prostředí.

Pro rychlost podélných vln v pevných látkách tvaru tenké tyče, kde dochází k namáhání v tahu, lze psát

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{2}$$

kde E je modul pružnosti v tahu. Pokud nemá pevná látka tvar tenké tyče, je třeba pro výpočet rychlosti podélných vln použít vztah

$$c_l = \sqrt{\frac{2G}{\rho}\,\frac{\mu-1}{2\mu-1}}, \tag{3}$$

Nechť a je rozměr tělesa ve směru namáhání, b rozměr kolmý na směr namáhání, pak

$\mu = \frac{\eta}{\varepsilon}$

$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a}$

$\eta = \frac{\Delta b}{b}$

kde μ je Poissonovo číslo známé z mechaniky pružnosti. U pevné látky namáhané v tahu udává Poissonovo číslo souvislost mezi poměrným podélným prodloužením ε a poměrným příčným zkrácením η.

V kapalinách a plynech není možno vytvořit smyková napětí, proto v nich nemůže vzniknout příčné vlnění, ale **pouze podélné**. Rychlost podélných vln v kapalinách je dána vztahem

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \tag{4}$$

kde K je **modul objemové pružnosti** kapalného prostředí, související s vnějším dodatečným tlakem Δp působícím na kapalinu vztahem $\Delta p = -K\frac{\Delta V}{V}$.

Pro plyny, pokud neuvažujeme výměnu tepla, tj. při adiabatických změnách plynu, je možno modul objemové pružnosti nahradit součinem Poissonovy konstanty γ známé z termiky a tlaku p_0.

κ je poměr měrných tepelných kapacit plynu při konstantním tlaku a konstantním objemu,

$\gamma = \frac{c_p}{c_V}$,

například pro suchý vzduch je γ = 1,405

$$K = \gamma p_0, \tag{5}$$

proto je rychlost vlnění v plynech

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}}, \tag{6}$$

kde p_0 je tlak v plynném prostředí a ρ je hustota prostředí. Jelikož tlak, hustota a teplota spolu souvisí, je možno rychlost šíření akustické vlny ve vzduchu popsat rovnicí

souvislost p,V,T určuje stavová rovnice pro plyny známá z termiky

$$c = 331{,}8\ \mathrm{m.s^{-1}} + 0{,}6\ \mathrm{m.s^{-1}.{}^{o}C^{-1}}.\,t\,. \tag{7}$$

Další veličiny, které u vlnění sledujeme, jsou **výchylka částice prostředí** $\vec{\xi}$, **akustická rychlost** $\vec{v}$ a **akustický tlak** p. Při obecném prostorovém vlnění jsou uvedené veličiny funkcí všech souřadnic a času. Pokud jsou funkcí pouze jedné souřadnice a času, jde o jednorozměrný případ, který stačí popsat v jediném směru. Takové je např. **rovinné vlnění**, jehož vlnoplochy jsou roviny kolmé k ose x. **Vlnoplocha** je množina bodů prostředí, ve kterých má vlna stejnou fázi.

2.2 Akustický tlak a akustická rychlost

K popisu zvukového pole používáme zejména 2 veličiny - **akustický tlak** p a **akustickou rychlost** $\vec{v}$.

2.2.1 Akustický tlak

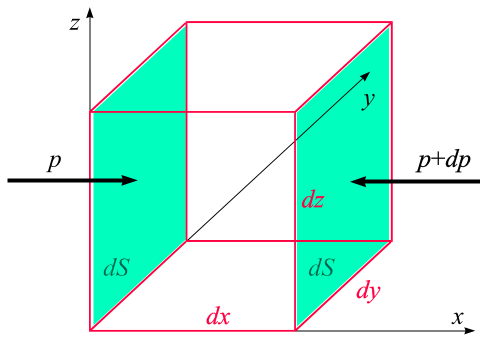
Akustický tlak p vzniká v důsledku zhuštění a zředění kmitajících částic. Musíme ho sečíst se statickým tlakem prostředí, např. s atmosférickým tlakem p_0. Výsledný tlak při šíření zvukové vlny v plynném prostředí je pak součet $p+p_0$. Akustický tlak je časově proměnná veličina, která nabývá kladných i záporných hodnot, výsledný tlak tedy kolísá kolem stálé hodnoty statického tlaku. Jednotkou akustického tlaku je pascal (Pa).

2.2.2 Akustická rychlost

Akustická rychlost $\vec{v}$ je rychlost, kterou kmitají částice prostředí, které tvoří akustickou vlnu, kolem svých rovnovážných poloh. Na rozdíl od akustického tlaku je to vektor, který má u podélného vlnění směr šíření vlny, u příčného vlnění směr kolmý na směr šíření vlny. Akustická rychlost je časově periodicky proměnná veličina. **Nesmíme ji zaměňovat s rychlostí šíření akustické vlny**. Jednotkou akustické rychlosti je $m.s^{-1}$.

2.2.3 Souvislost akustického tlaku s akustickou rychlostí

Našim úkolem bude nalézt vztahy mezi veličinami zvukového pole a odvodit vlnovou rovnici. Nejprve vyjdeme z druhého Newtonova zákona síly, který aplikujeme na elementární vzduchový objem $dV = dx\,dy\,dz$. Podle obr. 2.2 působí na plochu $dS = dy\,dz$ zleva akustický tlak p, zprava akustický tlak $p + \frac{\partial p}{\partial x} dx$.



obr. 2.2 K odvození souvislosti akustického tlaku a akustické rychlosti

Výsledná síla

$$dF_x = -dp\,dS = -\frac{\partial p}{\partial x} dx\,dy\,dz$$

způsobuje ve směru x zrychlení a_x elementu vzduchu o hmotnosti $dm = \rho\, dx\, dy\, dz$, kde ρ je hustota vzduchu, která se sice působením akustického tlaku mění, ale změny jsou tak malé, že je lze zanedbat. Podle Newtonova zákona síly dále platí rovnice

$$dF_x = dm\, a_x = dm \frac{\partial v_x}{\partial t}, \tag{8}$$

po dosazení

$$-\frac{\partial p}{\partial x} dxdydz = \rho\, dxdydz \frac{\partial v_x}{\partial t}, \tag{9}$$

a po úpravě

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v_x}{\partial t}, \tag{10}$$

Tuto rovnici vynásobíme jednotkovým základním vektorem $\vec{i}$. Dostaneme

$$\frac{\partial p}{\partial x}\vec{i} = -\rho \frac{dv_x}{dt}\vec{i}, \tag{11}$$

základní vektory $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ jsou vektory ležící v osách x, y, z s velikostí 1.

Pro vlnění šířící se obecným směrem můžeme napsat další složky

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial y}\vec{j} &= -\rho \frac{\partial v_y}{\partial t}\vec{j}, \\ \frac{\partial p}{\partial z}\vec{k} &= -\rho \frac{\partial v_z}{\partial t}\vec{k}. \end{aligned} \tag{12}$$

Sečtením těchto tří rovnic dostaneme

$$\mathrm{grad}\, p = -\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \tag{13}$$

kde operátor grad představuje vektorovou operaci

$$\mathrm{grad} = \left(\frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z}\right). \tag{14}$$

Rovnice (13) představuje důležitou souvislost mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí. V akustice se nazývá **Eulerova rovnice**.

2.3 Vlnová rovnice pro akustický tlak

Akustická vlnová rovnice je obecná diferenciální rovnice druhého řádu, jejíž řešení poskytuje informace o šíření akustické vlny prostředím. Vlnová rovnice pro akustický tlak má tvar

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \tag{15}$$

kde p je akustický tlak a c je rychlost šíření vlnění v prostředí. ∇^2 je Laplaceův operátor

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{dx^2} + \frac{\partial^2}{dy^2} + \frac{\partial^2}{dz^2}. \tag{16}$$

2.3.1 Odvození vlnové rovnice

adiabatický děj známe z termodynamiky, je to děj, při kterém nedochází k výměně tepla mezi plynem a okolím

Tlakové změny, ke kterým dochází při šíření vlnění ve vzduchu jsou tak rychlé, že nemůže docházet k vyrovnání teploty prostředí, jinými slovy, nedochází k výměně tepla jedné části prostředí s jinou. Proto může být prostředí popsáno zákonem pro **adiabatický děj**. Jak už jsme poznamenali, celkový tlak v prostředí se skládá z atmosférického tlaku p_0, který můžeme považovat za konstantní, a proměnného akustického tlaku p. Potom je příslušná adiabatická změna dána výrazem

$$(p + p_0)V^\gamma = konst., \tag{17}$$

kde ρ je hustota prostředí a γ je Poissonova konstanta známá z termodynamiky, kterou jsme komentovali na str. 9. Po dosazení $V = \frac{m}{\rho}$ bude

$$\frac{p_0 + p}{\rho^\gamma} = konst. \tag{18}$$

Derivujme rovnici (18) podle času. Vzhledem k $p << p_0$ dostaneme po úpravě

$$\rho\frac{\partial p}{\partial t} - \gamma\, p_0 \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{19}$$

a následně ještě jednou derivujme rovnici (19) podle času a zanedbejme člen s časovou derivací hustoty, který je mnohem menší než ostatní členy rovnice. Tím získáme rovnici

$$\rho\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \gamma\, p_0 \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = 0, \tag{20}$$

Dále použijeme rovnici kontinuity pro stlačitelné prostředí, která je známa z mechaniky kontinua

$$\mathrm{div}(\rho\,\vec{v}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \tag{21}$$

Udává souvislost mezi hustotou prostředí a rychlostí částic, které prostředí tvoří. Rovnici kontinuity můžeme vzhledem k tomu, že hustota akustického prostředí je téměř nezávislá na poloze ($\operatorname{grad}\rho \to 0$), napsat ve tvaru

$$\rho \operatorname{div}(\vec{v}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \tag{22}$$

Derivujme rovnici (22) podle času, dosaďme rovnici (13) upravenou na tvar $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p$ a zanedbejme člen s derivací hustoty. Dostaneme

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} p) = \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}, \tag{23}$$

kde operátor $\operatorname{div}(\operatorname{grad})$ je skalární Laplaceův operátor ∇^2, pro který platí

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{dx^2} + \frac{\partial^2}{dy^2} + \frac{\partial^2}{dz^2}. \tag{24}$$

Potom rovnice (23) přejde na tvar

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}. \tag{25}$$

Dosadíme rovnici (25) do rovnice (20),

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\gamma p_0}{\rho} \nabla^2 p. \tag{26}$$

Nakonec využijeme vztah pro rychlost šíření vlnění v plynech ve tvaru $c = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}}$ a dostaneme konečný tvar **vlnové rovnice pro akustický tlak** (15).

2.3.2 Řešení vlnové rovnice pro rovinnou vlnu

Rovinná vlna je taková vlna, která se šíří jen v jednom směru, jejíž vlnoplochy (popsané na str. 10) mají tvar roviny. Tento směr můžeme spojit s osou x souřadného systému. Potom se vlnová rovnice pro akustický tlak (15) zjednoduší na tvar

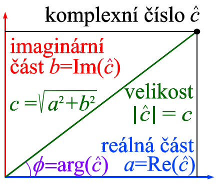
$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \tag{27}$$

Matematické řešení této rovnice je

$$\hat{p}(x,t) = \hat{p}_{\max} e^{j\omega(t - \frac{x}{c})}, \tag{28}$$

kde j je imaginární jednotka, ω je úhlová frekvence, $\hat{p}_{\max}$ je komplexní amplituda akustického tlaku a c je rychlost šíření vlny. Akustický tlak je tedy komplexní veličina.

Komplexní číslo má tvar $\hat{c}=a+jb$, kde j je imaginární jednotka pro kterou platí $j^2=-1$, a je reálná část, b imaginární část komplexního čísla. $\phi=\mathrm{arctg}(b/a)=\arg(\hat{c})$ je komplexní argument. Komplexní číslo lze zakreslit do komplexní roviny:



Známe-li akustický tlak, můžeme zjistit akustickou rychlost. Využijeme jednorozměrný tvar Eulerovy rovnice (13), převedeme ji na integrální tvar a akustický tlak a akustickou rychlost označíme komplexně,

$$\hat{v} = -\frac{1}{\rho}\int \frac{d\hat{p}}{dx}\,dt \tag{29}$$

a současně derivujeme akustický tlak určený rovnicí (28) podle x

$$\frac{d\hat{p}}{dx} = -\frac{j\,\omega}{c}\,\hat{p}_{\max}\,e^{j\omega(t-\frac{x}{c})}\,. \tag{30}$$

Dosadíme do rovnice (29), upravíme a integrujeme. Získáme rovnici

$$\hat{v} = \frac{1}{\rho\,c}\,\hat{p}_{\max}\,e^{j\omega(t-\frac{x}{c})}\,. \tag{31}$$

Z rovnic (28) a (31) plyne, že u rovinné vlny jsou akustický tlak a akustická rychlost ve fázi (mají v komplexní rovině stejný směr). Toto je charakteristická vlastnost rovinných vln.

2.4 Měrná akustická impedance

Měrná akustická impedance $\hat{Z}$ je podíl akustického tlaku a akustické rychlosti, obecně je to komplexní číslo

$$\hat{Z} = \frac{\hat{p}}{\hat{v}}\,. \tag{32}$$

Měrná akustická impedance má jednotku Pa.s.m^{-1}.

Reálná část měrné akustické impedance $r = \mathrm{Re}(\hat{Z})$ je **měrný akustický odpor**.

Pro rovinnou vlnu, jak vyplývá z rovnic (28) a (31), můžeme měrnou akustickou impedanci počítat libovolně podílem okamžitých, efektivních nebo maximálních hodnot. Vzhledem k tomu, že $\hat{p}$ a $\hat{v}$ jsou ve fázi, vyjde vždy stejný reálný výsledek. Měrná akustická impedance a zároveň měrný akustický odpor má pro rovinnou vlnu tvar, který získáme dosazením rovnic (28) a (31) do definice (32), tedy

$$Z = r = \rho\,c\,. \tag{33}$$

Pokud je měrná akustická impedance reálné číslo, nazývá se **měrný akustický odpor**.

Pro využití v akustice většinou stačí pracovat s **akustickým tlakem** (28) a s **akustickou rychlosti** (31) pouze v oboru reálných čísel, tedy s rovnicemi

$$p = p_{\max} \sin \omega (t - \frac{x}{c}) \,, \tag{34}$$

$$v = \frac{p_{\max}}{\rho c} \sin \omega (t - \frac{x}{c}) \,. \tag{35}$$

Porovnáním rovnic (34) a (35) dostaneme vzájemnou souvislost akustického tlaku a akustické rychlosti pro rovinnou vlnu

$$p = \rho c v \,, \tag{36}$$

kde ρ je hustota prostředí a c je rychlost šíření vlny. Poslední vztah má v akustice velký význam.

2.5 Energetické veličiny v akustice

Energetické veličiny mají ve fyzice mimořádný význam. Většinou je totiž možné problém vyřešit energeticky, přičemž toto řešení bývá jednodušší než řešení pomocí jiných veličin. Platí to i v akustice. Dále budeme předpokládat, že akustický tlak a akustická rychlost jsou periodickými funkcemi času, které splňují rovnice (34) a (35). Takovým veličinám říkáme **harmonické**.

2.5.1 Akustický výkon, měrný akustický výkon

Akustickým výkonem P rozumíme energii zvukových vln E vyzářenou zdrojem, případně prošlou plochou nebo dopadající na plochu za jednu sekundu. Jedná se tedy o výkon přenášený akustickým vlněním.

Okamžitá hodnota akustického výkonu je definovaná

$$P(t) = \frac{dE}{dt} \,, \tag{37}$$

kde dE je akustická energie prošlá uvažovanou plochou za čas dt. Projde-li ploškou dS, orientovanou kolmo na směr šíření vlny, vlnění o akustickém výkonu dP, pak podíl

$$N(t) = \frac{dP}{dS} \tag{38}$$

je okamžitá hodnota **měrného akustického výkonu**. Jedná se tedy o plošnou hustotu akustického výkonu. Veličiny definované rovnicemi (37) a (38) jsou periodicky závislé na čase, podobně jako již dříve zavedené akustická rychlost a akustický tlak, přestavují tedy okamžité hodnoty.

Dokážeme si, že měrný akustický výkon je možné vyjádřit součinem okamžitých hodnot akustického tlaku a akustické rychlosti. Předpokládejme, že akustická vlna dopadá kolmo na plošku *dS*. Pak pro okamžité hodnoty v čase *t* platí

$$N(t) = \frac{dP}{dS} = \frac{dF\,v}{dS} = \frac{p\,dS\,v}{dS} = p(t)\,v(t)\,, \tag{39}$$

kde jsme nejdříve zaměnili výkon dP zvukové vlny podle vztahu $dP = dF\,v$ a potom dosadili za tlakovou sílu zvukové vlny $dF = p\,dS$. Výsledný součin akustického tlaku a akustické rychlosti se dá snadno provést **pro rovinnou vlnu**, u níž jsou obě veličiny ve fázi. Využijeme k tomu rovnice (34) a (35),

$$N(t) = \frac{p_{\max}^2}{\rho\,c}\sin^2\omega\left(t - \frac{x}{c}\right), \tag{40}$$

U kulové vlny je však třeba zohlednit fázový posuv mezi oběma veličinami.

2.5.2 Časová střední hodnota akustického výkonu

Jak už jsme zmínili, veličiny definované rovnicemi (37) a (38) jsou periodicky závislé na čase a přestavují okamžité hodnoty. Jejich střední časové hodnoty za dobu jedné periody, které budeme označovat s pruhem, získáme časovou integrací po dobu jedné periody *T* a vydělením periodou *T*. Střední hodnotu akustického výkonu pak definujeme ve tvaru

$$\overline{P} = \frac{1}{T}\int_0^T P(t)\,dt \tag{41}$$

a střední hodnotu měrného akustického výkonu definujeme rovnicí

$$\overline{N} = \frac{1}{T}\int_0^T N(t)\,dt\,. \tag{42}$$

Obě střední hodnoty mezi sebou souvisí vztahem

$$\overline{N} = \frac{1}{T}\int_0^T N(t)\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{dP(t)}{dS}\,dt = \frac{d}{dS}\left[\frac{1}{T}\int_0^T P(t)\,dt\right] = \frac{d\overline{P}}{dS}\,. \tag{43}$$

2.5.3 Akustická intenzita

Střední časová hodnota měrného akustického výkonu za dobu jedné periody je **akustická intenzita,** $I = \overline{N}$.

Pro rovinnou vlnu získáme akustickou intenzitu, dosadíme-li měrný akustický výkon z rovnice (40) do definice (42) a provedeme integraci. Bude

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{p_{\max}^2}{\rho\, c}\sin^2 \omega(t - \frac{x}{c})\, dt = \frac{p_{\mathrm{ef}}^2}{\rho\, c} \tag{44}$$

kde p_{ef} je **efektivní hodnota akustického tlaku** definovaná rovnicí

$$p_{\mathrm{ef}} = \frac{1}{T}\int_0^T p^2 dt \tag{45}$$

Akustická intenzita pro rovinnou vlnu tedy souvisí s akustickým tlakem rovnicí

$$I = \frac{p_{\mathrm{ef}}^2}{\rho c} \ . \tag{46}$$

2.5.4 Objemová hustota akustické energie

Často je výhodné používat **objemovou hustotu akustické energie**. Definujeme ji poměrem střední časové energie vlny $d\overline{E}$, která se nachází v objemu dV, k témuž objemu,

tedy

$$w = \frac{d\overline{E}}{dV} \ . \tag{47}$$

Nechť $d\overline{P}$ je střední časový výkon čela vlny o ploše dS. Potom vlna vykoná za čas dt práci, která se rovná energii vytvořené v objemu $dV = dS\, c\, dt$, kde c je rychlost postupu vlny. Hledaná objemová hustota energie pak přejde na tvar

$$w = \frac{d\overline{P}\, dt}{dS\, c\, dt} = \frac{d\overline{P}}{dS\, c} \ . \tag{48}$$

Nahradíme-li střední časový výkon vlny na jednotku plochy intenzitou, $I = \overline{N} = \frac{d\overline{P}}{dS}$, viz rovnice (43), dostaneme relaci mezi objemovou hustotou energie vlny a intenzitou vlny

$$w = \frac{I}{c} \ . \tag{49}$$

S přihlédnutím k rovnici (46) bude

$$w = \frac{p_{\mathrm{ef}}^2}{\rho c^2} = \rho\, v_{\mathrm{ef}}^2 \ . \tag{50}$$

2.5.5 Hladiny akustických veličin

Poněvadž rozsah intenzit zvuků v přírodě je značný a také proto, že lidské ucho vnímá zvuk spíše v logaritmické stupnici (viz také Weberův-Fechnerův zákon v 3.1.1), zavádíme hladiny akustických veličin. Hladinu akustické intenzity v decibelech definujeme vztahem

$$L_I = 10\text{dB}\log\frac{I}{I_\mathrm{r}}, \tag{51}$$

kde I_r je mezinárodně stanovená referenční hodnota $I_\mathrm{r} = 10^{-12}$ W.m^{-2}. Nahradíme-li poměr intenzit v souladu s rovnicí (46) poměrem kvadrátů akustických tlaků, dostaneme hladinu akustického tlaku

$$L_p = 20\text{dB}\log\frac{p}{p_\mathrm{r}}, \tag{52}$$

kde p_r je referenční hodnota akustického tlaku, $p_\mathrm{r} = 2.10^{-5}$ Pa. Obě vztažné hodnoty I_r a p_r přibližně odpovídají prahovým hodnotám lidského sluchu pro tón kmitočtu 1 kHz.

Hladina akustické intenzity a hladina akustického tlaku si nejsou zcela rovny, protože pro obě veličiny jsou stanoveny nezávisle referenční hodnoty I_r a p_r, přičemž mezi intenzitou a tlakem platí pro postupnou rovinnou vlnu vztah (46). Referenční hodnoty si odpovídají jen pro určitou hodnotu vlnového odporu prostředí a to pro $\rho c = 400$ kg.m^{-2}.s^{-1}. Tato hodnota je splněna jen pro vzduch a určité atmosférické podmínky, tj. pro určitý tlak a určitou teplotu. Při těchto podmínkách jsou si hladina akustického tlaku a hladina intenzity zcela rovny. Ovšem v rozmezí běžných atmosférických podmínek bývá rozdíl mezi hladinou intenzity a hladinou akustického tlaku menší než 0,2 dB, a tak se rozdíl mezi hladinou intenzity a hladinou akustického tlaku většinou zanedbává. Pro prostředí, která splňují podmínku $\rho c = 400$ kg.m^{-2}.s^{-1} platí

$$L_p = L_I\ . \tag{53}$$

Hladina akustického výkonu je definována výrazem

$$L_P = 10\text{dB}\log\frac{P}{P_\mathrm{r}}, \tag{54}$$

kde P_r je referenční hodnota akustického výkon 10^{-12} W.

2.6 Kontrolní otázky

(1) Proč vzniká při podélném vlnění akustický tlak?

(2) Je akustická vlna vlnění podélné nebo příčné? Rozlište podle prostředí.

(3) Napište rovnici pro výpočet rychlosti šíření zvuku v kapalinách.

(4) *Napište rovnici pro výpočet rychlosti šíření zvuku v plynech.*

(5) *Napište rovnici pro výpočet rychlosti šíření zvuku v pevných látkách.*

(6) *Definujte okamžitý akustický výkon rovinné zvukové vlny.*

(7) *Definujte akustickou intenzitu jako střední časovou hodnotu akustického výkonu. Neopomeňte skutečnost, že akustický výkon není výkon na jednotku plochy.*

(8) *V jakých jednotkách se měří akustická intenzita?*

(9) *Co vyjadřuje objemová hustota akustické energie? Jakou má jednotku?*

(10) *Jak vyjádříte efektivní hodnotu akustického tlaku pomocí efektivní akustické rychlosti a jak pomocí akustické intenzity?*

(11) *Definujte hladinu akustické intenzity, hladinu akustického tlaku a hladinu akustického výkonu vlnění.*

2.7 Příklady k procvičení

Řešený příklad 2.1

Nejslabší zvuk, který je slyšet na kmitočtu $f = 100$ Hz, má tlakovou amplitudu p_{max}=2.10^{-3} Pa. Jaká je amplituda výchylky této zvukové vlny ve vzduchu? Hustota vzduchu je 1,188 kg.m^{-3}, rychlost zvuku ve vzduchu je 343 m.s^{-1}, obojí při teplotě 20 ^{o}C.

Řešeni:

Řešení vychází ze vztahu mezi akustickým tlakem p a akustickou rychlostí v pro rovinnou vlnu (36)

$$p_{\max} = \rho\, c\, v_{\max} \ ,$$

drobnou úpravou dostaneme

$$v_{\max} = \frac{p_{\max}}{\rho\, c} \, .$$

Mezi akustickou rychlostí a amplitudou výchylky platí

$$v_{\max} = \xi_{\max}\, \omega \, .$$

Kombinací předchozích vztahů získáme hledanou amplitudu výchylky zvukové vlny

$$\xi_{\max} = \frac{v_{\max}}{\omega} = \frac{p_{\max}}{\omega \rho\, c} = \frac{p_{\max}}{2\pi f \rho\, c} \, ,$$

po dosazení numericky

$$\xi_{\max} = \frac{2.10^{-3}\ \text{Pa}}{2\pi .100\,\text{Hz}.1{,}188\ \text{kg.m}^{-3}.343\ \text{m.s}^{-1}} = 7{,}81.10^{-9}\ \text{m} \, .$$

Řešený příklad 2.2

Hustota vzduchu při teplotě 0 °C a tlaku $p_1 = 0{,}1$ MPa je $\rho_1 = 1{,}293$ kg.m^{-3}. Jaká je rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě 27 °C a tlaku $p_2 = 0{,}2$ MPa, je-li Poissonova konstanta pro vzduch $\gamma = 1{,}4$?

Řešení:

Vycházíme ze stavové rovnice $pV = \frac{m}{M} RT$, ze které vyjádříme hustotu vzduchu ve tvaru

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}.$$

Odtud získáme

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} \quad \Rightarrow \quad c = \sqrt{\frac{\gamma p_2}{\rho_2}} = \sqrt{\frac{\gamma p_1 T_2}{\rho_1 T_1}} = 345 \text{ m.s}^{-1}$$

Řešený příklad 2.3

Jaké chyby se dopustíme, položíme-li rovnítko mezi L_I a L_p při podmínce prostředí $\rho c = 415$ kg.m^{-2}.s^{-1}?

Řešení:

Vycházíme ze vztahu (46) mezi akustickou intenzitou a akustickým tlakem. Pro referenční hodnoty bude

$$I_r = \frac{p_r^2}{\rho c}$$

a úpravou

$$\rho c = \frac{p_r^2}{I_r} = \frac{(2.10^{-5})^2}{10^{-12}} = 400 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.$$

Odtud lze vyjádřit chybu

$$\Delta L = 10 \log \frac{415}{I_r} - 10 \log \frac{400}{I_r} = 10 \log \frac{415}{400} = 0{,}16 \text{ dB}.$$

Řešený příklad 2.4

Vzduchem se šíří zvukové vlnění o kmitočtu 2 kHz. Amplituda výchylky je 2.10^{-8} m. Vypočítejte: a) intenzitu zvukového vlnění, b) objemovou hustotu akustické energie, c) hladinu akustického tlaku. Hustota vzduchu je 1,2 kg.m^{-3}. Rychlost šíření vlnění ve vzduchu je 340 m.s^{-1}.

Řešení

Využijeme rovnice popsané v této kapitole a nejdříve vyjádříme efektivní akustickou rychlost

$$v_{\text{ef}} = \frac{v_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega\, \xi_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi.1{,}5.10^3}{\sqrt{2}} = 1.10^{-4} \text{ m/s},$$

dále pomocí rovnice (50)

$$w = \rho\, v_{\mathrm{ef}}^2 = 1{,}2.(10^{-4})^2 = 1{,}2.10^{-8}\ \mathrm{J.m^{-3}}$$

a následně intenzita zvuku

$$I = w\,c = 1{,}2.10^{-8}.340 = 4{,}08.10^{-6}\ \mathrm{W.m^{-2}}\,.$$

Akustický tlak získáme z rovnic (36) a (46)

$$p_{\mathrm{ef}} = \frac{I}{v_{\mathrm{ef}}} = \frac{4{,}08.10^{-6}}{10^{-4}} = 4{,}08.10^{-6}\ \mathrm{Pa}$$

a nakonec z definice (52) získáme hladinu akustického tlaku

$$L_p = 20\mathrm{dB}\log\frac{4{,}08.10^{-6}}{2.10^{-5}} = 66{,}2\ \mathrm{dB}\,.$$

Neřešený příklad 2.5

Jak se změní hladina akustické intenzity zdvojnásobíme-li akustický výkon zdroje? Zobecněte pro libovolný n–násobek výkonu, kde n je kladné reálné číslo. [3,01 dB, 10log *n*]

Neřešený příklad 2.6

Kolikrát je nutno snížit akustický výkon zdroje, chceme-li snížit hladinu akustického tlaku zvuku o 3 dB, 5 dB, 10 dB? [2, 3,16, 10]

3 Fyziologická akustika

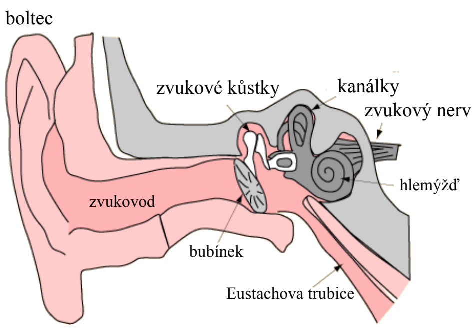
Jak již bylo napsáno, akustika je nauka o zvuku. Zákonitosti zvuku lze popisovat ve **dvou stupních**.

Pokud přistoupíme k popisu zvuku s využitím **zákonů vlnění** a **výpočet** těchto veličin a jejich **měření** bude náš **konečný cíl**, budeme se věnovat **fyzikální akustice**. Tento akustický popis se nazývá **objektivní**.

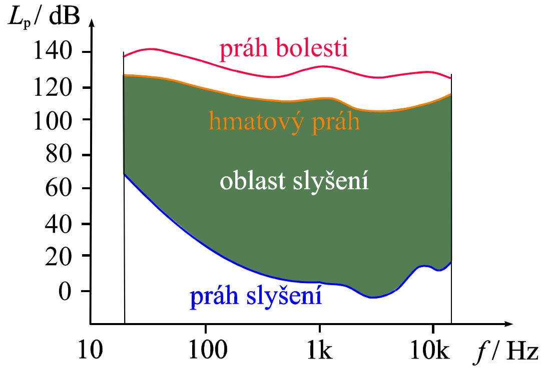
To však v akustice nestačí, protože v akustice a zejména v aplikované akustice nás bude zajímat **účinek zvuku na lidský sluchový orgán,** který nazveme **sluchový vjem**. Při této studii již **nevystačíme se zákony vlnění**, musíme zavést další komplikované veličiny a nalézt pro ně příslušné zákony. Komplikované proto, neboť každý lidský sluchový orgán je komplikovaný originál a nemá vlastnosti jako přístroj. Této problematice se věnuje **fyziologická akustika**. Vzhledem k individuálním vlastnostem lidského sluchového ústrojí se **fyziologický akustický popis nazývá subjektivní**.

3.1 Vnímání zvuku

Fyziologická akustika se zabývá sluchovými vjemy. Sluchový vjem je akustická informace zachycená lidským sluchovým orgánem a zpracovaná mozkem. Proto se ve sluchových vjemech projevují jevy, které nemají fyzikální podstatu. Přesto však lze říci, že základním akustickým fyzikálním veličinám odpovídají vlastnosti sluchového vjemu. Intenzitě zvuku odpovídá **hlasitost**, kmitočtu odpovídá **výška tónu** a spektrálnímu (frekvenčnímu) složení akustické vlny **barva tónu**. Tyto souvislosti však nejsou jednoduché.



Vzhledem k originalitě a složitosti lidského sluchového orgánu musíme zavést pojem **otologicky normální osoba**. Je to **myšlená osoba, jejíž sluchový orgán má vlastnosti stanovené konvencí** podle statisticky zjištěného průměru u zdravých lidí ve věku mezi 18 až 25 roků. Pro tuto osobu budou



obr. 3.1 Hranice slyšitelnosti zvuku

platit všechny veličiny a zákony fysiologické akustiky.

Lidské ucho vnímá zvuky přibližně v rozmezí kmitočtů 20 Hz až 20 kHz. Horní hranice se stářím snižuje. Aby byl zvuk slyšitelný, musí mít větší intenzitu, než která odpovídá prahové hodnotě, což je minimální hodnota intenzity zvuku nebo akustického tlaku pro určitý kmitočet, která je schopna vyvolat sluchový vjem. Při zvyšování intenzity zvuku dospějeme k mezi, kdy sluchový vjem přechází v bolest. Všechny slyšitelné zvuky leží mezi prahem slyšení a prahem bolesti, jak je naznačeno na obr. 3.1.

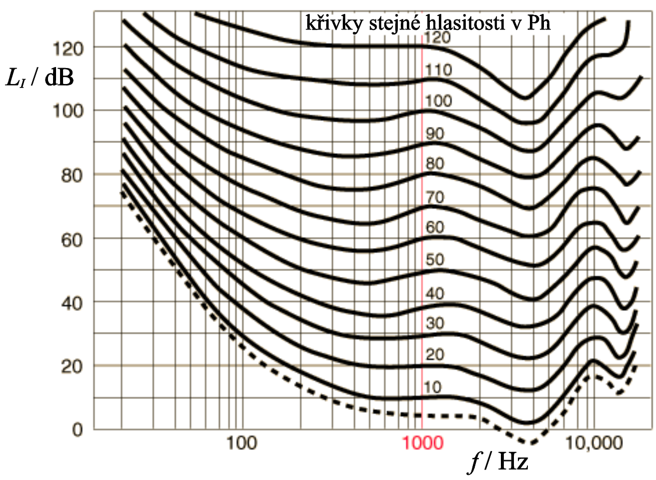
3.1.1 Weberův−Fechnerův zákon

Pro sluchový vjem platí **Weberův−Fechnerův zákon** (Ernst Heinrich Weber 1795–1878, Gustav Theodor Fechner 1801–1887), který říká, že míra fyziologického vjemu je úměrná logaritmu míry jeho fyzikální příčiny. Jinak řečeno, stoupá-li popud, tj. fyzikální veličina, např. akustická intenzita, geometrickou řadou (tj. po násobcích), stoupá sluchový vjem řadou aritmetickou (tj. vždy o určitou hodnotu).

3.2 Hladina hlasitosti

Hladina hlasitosti pro tón frekvence **1 kHz** je rovna hladině akustického tlaku, tedy

$$L_N = L_p \,. \tag{55}$$



obr. 3.2 Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti

Tónu o frekvenci 1 kHz splňujícímu podmínku (55) říkáme **referenční zvuk**. Pro ostatní kmitočty je nutno hladinu hlasitosti stanovit porovnáním s referenčním zvukem. Otologicky normální osoba musí zvuk o jiné frekvenci než 1 kHz **slyšet stejně hlasitě** jako referenční zvuk. Docílíme to tak, že intenzitu zvuku při zkoumané frekvenci buď zesílíme nebo zeslabíme podle citlivosti lidského sluchového orgánu. Tímto způsobem dostaneme grafické vyjádření vztahů mezi hladinou intenzity zvuku a hladinou hlasitosti, kterým jsou **Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti** na obr. 3.2. Podél Barkhausenovy křivky je hladina hlasitosti konstantní. Tyto křivky jsou zároveň křivkami citlivosti lidského sluchového orgánu. Vyšší hodnota křivky je nižší citlivost lidského sluchového orgánu.

Bezrozměrnou **jednotkou hladiny hlasitosti** je fón (Ph).

3.3 Hlasitost

Měření ukázala, že hladina hlasitosti ve fónech nevyjadřuje přesně míru fyziologického vjemu zvuku. Proto byla zavedena přesnější veličina **hlasitost** N. Jednotkou hlasitosti je bezrozměrný son. Tuto hlasitost má zvuk o hladině hlasitosti 40 Ph. Podle mezinárodní dohody platí mezi hladinou hlasitosti ve fónech a hlasitostí v sonech vztah

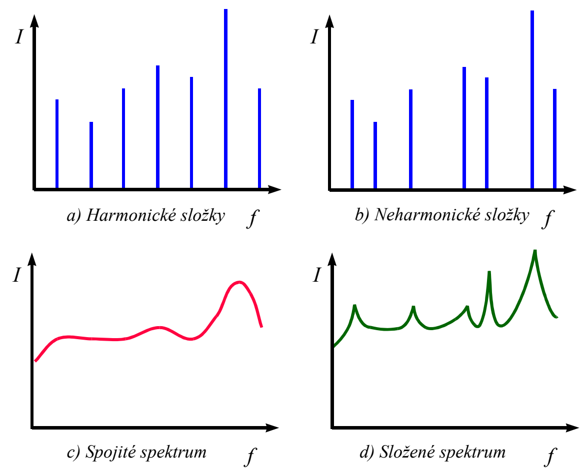
$$N=2^{\frac{L_N-40}{10}}. \qquad (56)$$

Takto definovaná hlasitost má tu vlastnost, že zvuk, který se jeví dvakrát hlasitější než druhý, je též číselně vyjádřen dvojnásobnou hlasitostí.

3.4 Zvuková spektra, analýza zvuku

Dosud jsme ve výkladu látky předpokládali zvuky popsané sinusovou funkcí, v krajním případě směsi (součty) sinusových zvuků. Takové zvuky se v přírodě nevyskytují, téměř vždy jde o složené zvuky. Právě u nich nás zajímá jejich složení. Stanovení těchto složek se nazývá **analýza zvuku**. Analýzu můžeme provádět dvojím způsobem. Buď změříme průběh zvuku jako funkci času a následně matematickou cestou stanovíme amplitudy, kmitočty a fáze jednotlivých složek. Provádí se to **Fourrierovou transformací** nebo také **Fourrierovou analýzou**. V druhém případě provedeme analýzu zvuku měřením bez potřeby provést transformaci. Zvuk sejmutý mikrofonem a přeměněný v elektrický signál necháme **projít filtry** a výsledek zaznamenáme. Filtry mohou být takové, které propouštějí prakticky jediný nastavený kmitočet (přesněji zvuk v blízkém okolí tohoto kmitočtu), nebo **pásmové**, které propouštějí určité pásmo vymezené krajními kmitočty f_1 a f_2. Toto pásmo se charakterizuje kmitočtem, který je jejich geometrickým středem

$$f=\sqrt{f_1 f_2}. \qquad (57)$$



obr. 3.3 Příklady čtyř různých spekter

Na obr. 3.3 jsou znázorněny příklady čtyř různých spekter. Obrázek a) představuje spektrum obsahující jen harmonické složky, které odpovídá 7 zvukům s časově periodickým průběhem, b) spektrum neharmonických složek, přičemž spektra a) i b) jsou tzv. čárová nebo **tónová spektra**. Obrázek c) představuje **spojité spektrum**, které odpovídá zvuku s časově neperiodickým průběhem a obrázek d) znázorňuje **složené spektrum**, které vzniklo sloučením zvuků se spektry typu b) a c).

3.5 Účinky zvuku na člověka

Budeme se zabývat **nežádoucími účinky** zvuku na člověka. Nežádoucí zvuk, který vyvolá nepříjemný nebo rušivý vjem na lidský sluchový orgán, se nazývá **hluk**. Nežádoucími zvuky přitom nejsou pouze zvuky intenzivní, ale také, například v případě spánku, zvuky relativně nízkých intenzit zvuku.

3.5.1 Definice hluku

Hlukem rozumíme každý zvuk, který svou intenzitou nepříznivě ovlivňuje pohodu člověka nežádoucími, nepříjemnými nebo škodlivými účinky. Hluk se z hlediska ohrožení člověka řadí ihned za znečištění ovzduší a ochranu povrchových vod. Hluk působí negativně na kvalitu spánku, působí obecně rozmrzelost, zhoršení sociálního chování a zejména snižuje psychický výkon. Při svém dlouhodobém působení způsobuje stres, únavu, nespavost a lze ho považovat za potenciální patogenní činitel, který může ovlivnit zvýšený výskyt dalších nemocí. Doprava způsobuje 85-90% veškerého hluku.

3.5.2 Ekvivalentní a maximální hladina akustického tlaku

Vzhledem k tomu, že hluk potřebujeme vyjádřit jako jednu hodnotu za delší časové období, zavádíme **ekvivalentní hladinu akustického tlaku** L_{Aeq}. Rovnicí ji můžeme definovat jako

$$L_{\mathrm{Aeq}} = 10\,\mathrm{dB(A)}\log\frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} 10^{0,1L(t)}\,dt, \qquad (58)$$

kde t_2 a t_1 jsou konečný a počáteční čas sledování hluku. Funkce $L(t)$ je časově závislá hladina akustického tlaku frekvenčně korigovaná pomocí váhového filtru typu A, aby bylo zohledněno, že zvuk v různých kmitočtech je sluchem vnímán s nestejnou citlivostí (viz Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti). Bezrozměrná jednotka ekvivalentní hladiny akustického tlaku je dB(A), kde A označuje použitý váhový filtr. Ekvivalentní hodnoty L_{Aeq}, kterými jsou limitovány zdravotně přípustné hladiny hluku v životním prostředí, jsou vyhodnocovány například pro pracovní směnu, pro denní dobu, pro noční dobu a pod.

Druhá možnost hodnocení hluku je pomocí **maximální hladiny akustického tlaku** v daném období, kterou označujeme L_{Amax}. Je to maximální hodnota funkce $L(t)$ v rovnici (58).

3.5.3 Přípustné hodnoty hluku

Maximální hodnoty hluku určují v České republice zákony. Jako hodnotící veličina se nejčastěji používá ekvivalentní hladina akustického tlaku. V době vydání tohoto studijního materiálu je platné **Nařízení vlády č. 148/2006 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací** ze dne 15. 3. 2006 s platností od 1.6.2006. V případě zájmu o bližší informace odkazuji na internetový zdroj http://www.mvcr.cz/sbirka/2006/sb051-06.pdf.

3.6 Kontrolní otázky

(1) Jaký rozdíl je mezi fyzikální a fyziologickou akustikou?

(2) Co je to otologicky normální osoba?

(3) Popište frekvenční rozsah a meze (prahy) vnímání zvuku.

(4) Jaká rozeznáváme spektra zvuku? Dokumentujte obrázky frekvenčních spekter zvuku.

(5) Vysvětlete jak vznikne křivka stejné hlasitosti zvuku.

(6) Jak je definovaná hladina hlasitosti a jak hlasitost zvuku? Uveďte jejich jednotky.

(7) Co říká Weberův−Fechnerův zákon?

(8) Co si představujete pod pojmem hluk?

(9) Co je to ekvivalentní hladinu akustického tlaku? Proč ji zavádíme?

3.7 Příklady k procvičení

Řešený příklad 3.1

Zařízení má hlučný interval s hladinou hluku L_1 = 82 dB a dobou trvání 10 s a tichý interval s hladinou hluku L_2 = 68 dB a dobou trvání 25 s. Jaká je jeho ekvivalentní hladina akustického tlaku?

Řešení:

Celkově vyhodnocujeme zvuk od $t_0 = 0$ do $t_2 = 35$ s. Silný hluk končí v čase $t_1 = 10$ s, kdy začíná slabý hluk a slabý hluk končí v čase $t_3 = 35$ s. Ekvivalentní hladinu akustického tlaku je definována vztahem (58), který převedeme pro dva časové úseky na dva integrály

$$L_{\mathrm{Aeq}}=10\ dB(A)\ \log\frac{1}{t_2-t_0}\left[\int_{t_0}^{t_1}10^{0,1L_1}\,dt+\int_{t_1}^{t_2}10^{0,1L_2}\,dt\right].$$

Vzhledem ke konstantním hladinám v obou integrálech upravíme a dostaneme

$$L_{\mathrm{Aeq}}=10\,\mathrm{dB(A)}\log\frac{1}{t_2-t_0}\left[t_1 10^{0,1L_1}+(t_2-t_1)10^{0,1L_2}\right]$$

a po dosazení zadaných hodnot dostaneme výsledek

$$L_{\mathrm{Aeq}}=10\,\mathrm{dB(A)}\log\left[\frac{1}{35\ \mathrm{s}}\left(10\ \mathrm{s}.10^{0,1.82}+25\ \mathrm{s}.10^{0,1.68}\right)\right]=77\ \mathrm{dB(A)}\,.$$

Řešený příklad 3.2

Hluk o hladině akustického tlaku L = 50 dB je v desetiminutových intervalech pravidelně přerušována po dobu 1 minuty hlukem o akustického tlaku L' = 60 dB. Jaká je ekvivalentní hladina hluku?

Řešení:

Řešení je shodné s řešením příkladu 3.1 s tím rozdílem, že hladina L = 50 dB trvá $t = 54$ minut a hladina $L' = 60$ dB trvá $t' = 6$ minut, přičemž hluk se vyhodnocuje po dobu $t + t' = 50$ minut. Potom

$$L_{\mathrm{Aeq}} = 10\ \mathrm{dB(A)}\ \log \frac{1}{t + t'} \left[t\, 10^{0,1 L_1} + t'\, 10^{0,1 L_2} \right]$$

a po dosazení zadaných hodnot dostaneme výsledek

$$L_{\mathrm{Aeq}} = 10\ \mathrm{dB(A)}\ \log \left[\frac{1}{60\ \mathrm{min}} \left(54\ \mathrm{min}.10^{0,1.50} + 6\ \mathrm{min}.10^{0,1.60} \right) \right] = 52,8\ \mathrm{dB(A)}\,.$$

Neřešený příklad 3.3

Spočtěte úlohu 3.2 pro $L' = 65$ dB, 70 dB, 75 dB a 80 dB. Sledujte o kolik dB je v jednotlivých případech trvalá ekvivalentní hladina nižší než L'. [56,1 dBA, 60,4 dBA, 65,1 dBA, 70,0 dBA]

Neřešený příklad 3.4

Hluk na ulici má hladinu hlasitosti 76 dB a v místnosti jen 26 dB. Vypočítejte poměr hlasitostí zvuku v místnosti a na ulici. [32]

Neřešený příklad 3.5

Jak se změní trvalá hodinová ekvivalentní hladina akustického tlaku z příkladu 3.1, když bezpečnostní tlakový ventil vytváří v průběhu celé hodiny po dobu dvou minut hladinu L = 95dB? [81,9 dB]

4 Fyzikální akustika

Zvuk se šíří látkami ve formě vlnění, v plynech včetně vzduchu, který nás bude nejvíce zajímat, se šíří jako podélné vlnění. Proto může být zvuk popisován pojmy, které jsme zavedli v pojednání o vlnění v části 2 - Úvod do akustiky. Tomuto způsobu popisu zvuku se věnuje fyzikální akustika.

4.1 Úvod do fyzikální akustiky

4.1.1 Sčítání účinků zvukových zdrojů

Dopadá-li více zvukových vln o hladinách intenzity L_1 až L_n na sluchový orgán nebo mikrofon, stanoví se výsledná hladina intenzity na principu energetického sčítání. Intenzity zvuku lze sčítat přímo, zatímco hladiny intenzit ne. To znamená, že z hladin intenzit se nejdříve musí vypočítat intenzity, ty se sečtou a z této výsledné hodnoty se opět určí hladina intenzity následovně

$$L = 10\log\sum_{i=1}^{n}\frac{I_i}{I_0} = 10\log\sum_{i=1}^{n}10^{\frac{L_i}{10}} , \tag{59}$$

protože

$$L_i = 10\log\frac{I_i}{I_0} \;\Rightarrow\; \frac{I_i}{I_0} = 10^{\frac{L_i}{10}} . \tag{60}$$

Princip energetického sčítání platí pro nekoherentní (nezávislé) zvukové zdroje, za které můžeme považovat velkou většinu zdrojů. Pouze u sinusově proměnných zvukových zdrojů při odrazu vlnění od překážek dochází k interferencím a v tomto případě je nutno sčítat akustické tlaky s ohledem na jejich fázi.

4.1.2 Maskování zvuku, směšování zvuku, ozvěna

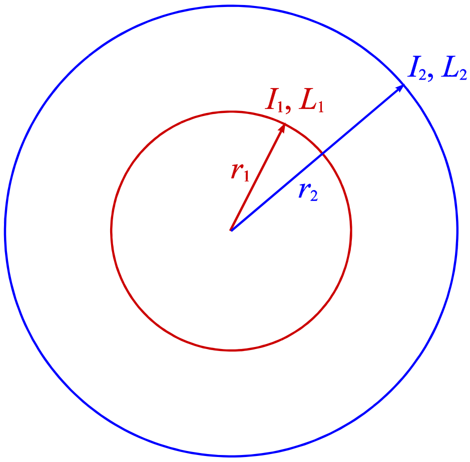
Maskování zvuku je jev vznikající při současném působení dvou zvuků rozdílných hladin. Podle zásad určení výsledné hladiny intenzity zvuku rovnicí (59) můžeme zjistit, že v případě dvou zvuků, jejichž hladiny intenzit se liší o více než 10 dB, přispívá slabší zvuk k výsledné hladině méně než 1 dB, tedy pod hranicí slyšitelnosti. Proto je slabší zvuk pod hranicí vnímání a silnějším zvukem je zcela překryt. Tomuto jevu se říká **maskování** nebo **sluchové překrývání**. S výhodou ho můžeme využít k překrytí slabých, avšak nepříjemných zvuků zvuky silnějšími, ale příjemnými, například ruch hypermarketu můžeme překrýt hudbou.

Dopadá-li na sluchový orgán přímý zvuk a zvuk odražený od určité překážky, je mezi těmito zvuky z důvodů jejich různých drah časové zpoždění. Je-li toto časové zpoždění menší než 50 ms, splývá odražený zvuk spolu s přímým zvukem a neprojeví se nijak rušivě. Je-li časové zpoždění mezi 50 ms až 100 ms, nastává v tomto případě **směšování zvuku**. Odražený zvuk prodlužuje přímý zvuk, což má za následek např. snížení srozumitelnosti řeči. Je-li časový rozdíl mezi přímým a odraženým zvukem větší než 0,1 s, vnímá ucho dva oddělené zvuky a vzniká **ozvěna**.

4.2 Akustika exteriéru

Prostorová akustika je část akustiky, která se zabývá šířením zvuku a řešením akustických veličin v prostoru. Z hlediska akustiky tyto prostory obvykle dělíme na **otevřené (exteriéry)** a **uzavřené (interiéry)**. Studium akustiky exteriérů přesahuje možnosti tohoto studijního materiálu, a proto se omezíme jen na několik základních informací. Podstatně větší pozornost budeme věnovat akustice interiéru.

4.2.1 Šíření zvuku v otevřeném prostoru, vliv prostředí



obr. 4.1 Šíření sférické vlny

U rovinných zvukových vln je intenzita stálá, u kulových klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje. Stanovíme nyní pokles hladiny intenzity. Jak ukazuje obr. 4.1, ve vzdálenosti r_1 od bodového zdroje je intenzita I_1 a hladina intenzity L_1. Podobně ve vzdálenosti r_2 jsou hodnoty I_2 a L_2

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \qquad (61)$$

a upravujme

$$L_1 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0}$$

$$L_2 = 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \frac{r_1^2}{r_2^2} = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} + 10 \cdot \log \frac{r_1^2}{r_2^2} \ . \qquad (62)$$

Předpokládejme, že $I_1 > I_2$, tedy $r_2 > r_1$

$$L_2 = L_1 - 20 \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \qquad (63)$$

Tato rovnice udává, jak klesá hladina intenzity při vzdalování od bodového zdroje. Tento pokles hladiny intenzity zvuku nazveme **sférický útlum**. Dosadíme-li za $r_2/r_1 = 2$, tj. vzdálení na dvojnásobek, bude mít sférický útlum, v souladu s rovnicí (63), hodnotu -6 dB.

Při šíření zvuku ve vzduchu dochází též k absorpci zvukové energie. Tuto absorpci nazveme **atmosférický útlum**. Zvuková energie ubývá ve vzduchu podle Knesera dvěma způsoby: v prvém případě ubývá vlivem vedení a vyzařování tepla, viskozity prostředí a difúze. To je tzv. **klasický útlum**, který je úměrný druhé mocnině kmitočtu. Pro nízké kmitočty je klasický útlum zanedbatelný. Pro vyšší kmitočty je však nutno klasický útlum uvažovat, protože např. pro 10 kHz dosahuje hodnoty asi 1,5 dB na 100 m.

V druhém případě, při tzv. **molekulárním útlumu**, dochází k úbytku zvukové energie vlivem relaxace pohybu molekul kyslíku. Molekulární útlum závisí především na množství vody obsažené ve vzduchu, dále na teplotě a kmitočtu. Mění se v širokém rozsahu hodnot a může dosáhnout až 20 dB na 100 m pro extrémní případy. Označíme-li pokles hladiny intenzity $\Delta L''$ v důsledku atmosférického útlumu a α činitel útlumu na dráze 1 m, platí

$$\Delta L'' = -\alpha (r_2 - r_1)\,. \tag{64}$$

Oba atmosférické útlumy, jak klasický, tak molekulární, rostou lineárně se vzdáleností, tj. jsou přímo úměrné dráze zvukového paprsku, na němž útlum počítáme. Pokles hladiny intenzity způsobený sférickým útlumem stanovíme z rovnice (63)

$$\Delta L' = L_2 - L_1 = -20 \log \frac{r_2}{r_1}\,. \tag{65}$$

Celkový pokles hladiny od bodového zdroje zahrnuje jak sférický, tak atmosférický útlum

$$\Delta L = \Delta L' + \Delta L'' = -20 \log \frac{r_2}{r_1} - \alpha (r_2 - r_1)\,. \tag{66}$$

Hodnoty atmosférického útlumu pro teplotu 15 °C a relativní vlhkost 75 %, tj. tzv. standardní meteorologické podmínky, jsou v tab. 4.1. Pro nižší kmitočty je atmosférický útlum zanedbatelný.

Hodnoty atmosférického útlumu					
Kmitočet / Hz	500	1000	2000	4000	8000
Atmosférický útlum dB/100m	0,16	0,38	0,95	2,42	4,73

tab. 4.1 Hodnoty atmosférického útlumu pro t = 15 °C a relativní vlhkost 75 %

4.3 Akustika interiéru

Možné metody řešení akustiky uzavřeného prostoru jsou tři: **vlnová akustika** (řešení vlnové rovnice)**, geometrická akustika** (sledování akustických paprsků a řešení jejich odrazů od překážek) a **statistická akustika.** Ve většině případů bývají uzavřené prostory nepravidelného tvaru, odrazivé vlastnosti stěn nelze jednoduše vyjádřit a proto není možno stanovit řešení vlnové rovnice. Ze stejného důvodu pak není možno dospět k řešení pomocí geometrické akustiky.

Nejhodnotnější výsledky řešení akustiky uzavřených prostorů poskytuje metoda **statistické akustiky**, která řeší vytvoření a zánik zvukového pole na základě velkého počtu odrazů. Nepravidelný tvar interiéru poskytuje řešení touto metodou dokonce kvalitnější výsledky než u pravidelných tvarů. Metodu statistické akustiky si přiblížíme podrobněji.

4.3.1 Podmínky použití statistické akustiky

Pro běžné uzavřené prostory je možné učinit některé zjednodušující předpoklady, které umožní nalézt hodnoty energetických akustických veličin na základě statistické teorie. Z důvodu mnohočetných odrazů akustických vln od stěn je možné předpokládat, že požadované zjednodušující podmínky, které uvádíme dále, budou splněny. U statistické metody vycházíme z představy, že k vytvoření zvukového pole v určitém místě přispívají odrazy od stěn a jiných ploch (překážek). Vzhledem k jejich nepravidelnému uspořádání a vzhledem k velkému počtu odrazů zvuku budou vztahy akustických veličin podléhat zákonitostem velkého počtu jevů, tedy statistickým zákonům.

Tři předpoklady platnosti statistické akustiky jsou:

1) **Ve všech bodech uzavřeného prostoru je objemová hustota zvukové energie stejná**. Hustota zvukové energie je dána součtem energie přicházející přímo od zdroje zvuku a energie, která do daného bodu dospěje díky odrazům.
2) V každém elementu uzavřeného prostoru je **celková energie dána součtem středních hodnot všech energií**, které do zvoleného bodu dospěly díky odrazům od stěn a překážek. Teorie se nezabývá okamžitými hodnotami energetických veličin, ale jejich středními hodnotami. Uvažujeme pouze nekoherentní (nezávislé) zdroje zvukové energie, neboť teorie nepřipouští vliv interferenčních jevů v daném prostoru.
3) Všechny úhly dopadu zvukových vln v libovolném bodu prostoru jsou stejně pravděpodobné.

Zvukový prostor, splňující podmínky 1) až 3), se nazývá **difúzní zvukové pole**, které je vhodné pro aplikaci statistické akustiky.

4.3.2 Výkon dopadající na stěnu

Pro další úvahy bude mít význam střední časová hodnota akustického výkonu, který jsme zavedli v článku 2.5.2. Vzhledem k tomu, že **v dalším výkladu budou všechny energetické veličiny střední časové hodnoty**, budeme je pro jednoduchost označovat bez pruhu a nebudeme v jejich názvech upřesňovat, že se jedná o střední časové hodnoty.

Pokud bychom byli důslední, označili bychom střední hodnotu $\overline{P}$, pro jednoduchost však uvádějme jen P

Pro rovinnou vlnu bude mít akustický výkon dopadajícího na stěnu, v souladu s rovnicí (43) a definicí intenzity, tvar $P = I\,S$. Pro difúzní zvukové pole je tomu ale jinak. **Vzhledem ke všesměrovému dopadu** a vzhledem ke stejné pravděpodobnosti všech úhlů dopadu, vychází ze statistické teorie pro výkon dopadající na rovinnou stěnu o ploše *S* vztah

Rov. (67) platí s přihlédnutím k tomu, že intenzita zvuku I je střední časová hodnota měrného akustického výkonu N.

$$P = \frac{1}{4} I\,S . \tag{67}$$

Vzhledem k tomu, že $I = w c$, viz (49), lze podobně pro výkon dopadající na rovinnou stěnu o ploše *S* psát

$$P = \frac{1}{4} w\, c\, S\,, \qquad (68)$$

kde w je objemová hustota akustické energie.

Vztahy (67) a (68) vlastně říkají, že zvukové vlny dopadající na stěnu ve směru jiném než kolmém dodají na stěnu menší výkon než vlny šířící se ke stěně v kolmém směru, přičemž pro difúzní zvukové pole je to ¼ výkonu kolmo dopadající vlny.

4.3.3 Činitel zvukové pohltivosti

Z akustického výkonu dopadajícího na stěnu se jeho část vrátí do prostoru, odkud zvuk dopadl a zbývající část zůstane ve stěně (dělícím prvku) nebo projde na druhou stranu stěny. Z hlediska statistické akustiky považujeme zvuk, který se nevrátil zpět do prostoru, za pohlcený. **Činitel zvukové pohltivosti** stěny definujeme jako poměr pohlceného akustického výkonu P_a k dopadajícímu P

$$\alpha = \frac{P_a}{P}\,. \qquad (69)$$

Tento činitel nemůže být záporný a nemůže překročit hodnotu 1. Jedničku lze realizovat například otvorem (otevřeným oknem). Pokud mají stěny různé činitele pohltivosti, potom

$$\overline{\alpha} S = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \ldots + \alpha_n S_n = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i S_i \;, \qquad (70)$$

kde α_i, S_i jsou činitelé pohltivosti a plochy jednotlivých stěn a $\sum_{i=1}^{n} S_i$ je plocha celého povrchu. Činitel zvukové pohltivosti, podobně jako výkon v rovnici (68), je charakterizován všesměrovým dopadem akustické vlny.

4.3.4 Zvuková pohltivost

Zvuková pohltivost A povrchu o ploše S je schopnost pohltit zvuk. Definujeme ji rovnicí

$$A = \alpha\, S\,. \qquad (71)$$

V případě, že je třeba stanovit zvukovou pohltivost většího povrchu skládajícího se z ploch s odlišnými činiteli zvukové pohltivosti, stanovíme celkovou zvukovou pohltivost jako součet jednotlivých pohltivostí, tedy

$$A = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i\, S_i\,, \qquad (72)$$

kde α_i a S_i je činitel zvukové pohltivosti a velikost i-té plochy.

4.3.5 Činitel zvukové průzvučnosti a zvuková průzvučnost

Analogicky k definici činitele zvukové pohltivosti a zvukové pohltivosti definujeme činitel zvukové průzvučnosti

$$\tau = \frac{P_{\mathrm{t}}}{P}. \qquad (73)$$

a zvukovou průzvučnost

$$T = \tau S. \qquad (74)$$

Význam veličin v rovnicích je stejný jako v rovnicích (69) až (72)

4.3.6 Činitel zvukové odrazivosti a zvuková odrazivost

Analogicky k předchozím definicím definujeme činitel zvukové odrazivosti

$$\rho = \frac{P_{\mathrm{r}}}{P}. \qquad (75)$$

a zvukovou odrazivost

$$R = \rho S. \qquad (76)$$

Pro zvukovou pohltivost, propustnost a odrazivost logicky platí, že jejich součet je 1, tedy

$$A + T + R = \frac{P_{\mathrm{a}}}{P} + \frac{P_{\mathrm{t}}}{P} + \frac{P_{\mathrm{r}}}{P} = \frac{P_{\mathrm{a}} + P_{\mathrm{t}} + P_{\mathrm{r}}}{P} = 1, \qquad (77)$$

neboť výkony v čitateli tvoří celkový zvukový výkon dopadající na povrch.

4.3.7 Výkonová rovnováha v difúzním zvukovém poli

Nejdříve vyšetříme zvukové pole **uzavřeného prostoru v ustáleném stavu**, kdy se nemění intenzita zvuku v závislosti na čase. Potom musí platit princip zachování energie, tedy výkon dodávaný zvukovým zdrojem P do prostoru musí být celý pohlcen, $P = P_a$. V opačném případě by intenzita zvuku narůstala. V ustáleném stavu, v souladu s rovnicemi (69) a (67), má potom výkon pohlcený stěnou o ploše S, která má činitel zvukové pohltivosti α, hodnotu

$$P_a = \overline{\alpha} P = \frac{1}{4} A I \quad , \qquad (78)$$

kde $\overline{\alpha}$ je střední hodnota činitele zvukové pohltivosti definovaná vztahem (70) a A je pohltivost uzavřeného prostoru. Jiná situace nastane **v neustáleném stavu**. Pokud se hodnota intenzity zvuku časově mění, tedy $\frac{dI}{dt} \neq 0$, na rozdíl od ustáleného stavu se část akustického výkonu využije ke změně intenzity zvuku v prostoru. Energie vlnění v celém uzavřeném prostoru má hodnotu

$E = w\,V$, kde V je objem sledovaného interiéru a její časové změně odpovídá výkon P_V, který získáme derivací,

$$P_V = \frac{dE}{dt} = V\frac{dw}{dt} = \frac{V}{c}\frac{dI}{dt}, \tag{79}$$

kde jsme využili rovnici (49) $w = \frac{I}{c}$. **Výkonová rovnováha v neustáleném stavu** potom bude

$$P = P_V + P_a = \frac{V}{c}\frac{dI}{dt} + \frac{1}{4}AI \ , \tag{80}$$

kde P je výkon zvukového zdroje. Pokud $\frac{dI}{dt} = 0$, jedná se o ustálený stav a **výkonová rovnováha v ustáleném stavu** přejde na rovnici

$$P = P_a = \frac{1}{4}AI \ . \tag{81}$$

4.3.8 Názvuk a dozvuk

Názvuk je děj (ne fyzikální veličina), který následuje po uvedení zvukového zdroje do činnosti. Trvá dokud nedojde k ustálení stavu, jinými slovy, dokud se neustálí intenzita zvuku nebo objemová hustota energie zvuku. Během názvuku intenzita zvuku narůstá. Vyšetříme její časovou závislost. Vyjdeme z rovnice výkonové rovnováhy (80), odkud po úpravě dostáváme

$$\frac{dI}{dt} + \frac{Ac}{4V}I - \frac{cP}{V} = 0 \ , \tag{82}$$

přičemž výkon P zdroje zvuku je nenulový. Řešení této diferenciální rovnice má tvar

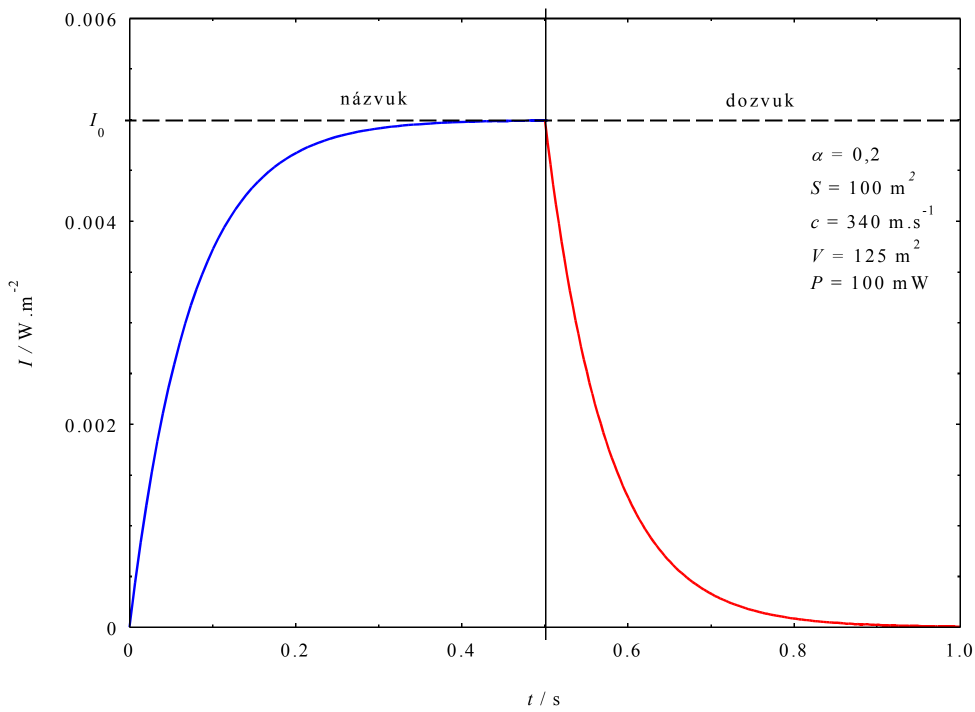
$$I(t) = I_0(1 - \mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}t}), \tag{83}$$

kde hodnota intenzity zvuku

$$I_0 = \frac{4P}{A} \tag{84}$$

přísluší ustálenému stavu pro $t \to \infty$.

Dozvuk je opak názvuku. Jedná se o děj, který následuje po vypnutí zvukového zdroje až po ustálený stav, který je v tomto případě zjevně charakterizovaný hodnotou $I = 0$. Pro určení časové závislosti intenzity zvuku vyjdeme opět z rovnice výkonové rovnováhy (80), do níž při vypnutém zvukovém zdroji dosadíme $P = 0$. Takže diferenciální rovnice výkonové rovnováhy je



obr. 4.2 Časová závislost intenzity zvuku při názvuku a dozvuku, dozvuk začíná v čase 0,5 s

$$\frac{dI}{dt} + \frac{A\,I\,c}{4V} = 0 \tag{85}$$

a její řešení má tvar

$$I(t) = I_0\,\mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}t}\;, \tag{86}$$

kde hodnota

$$I_0 = \frac{4P}{A} \tag{87}$$

je počáteční hodnota intenzity zvuku pro $t = 0$.

Časový průběh intenzity zvuku při názvuku po zapnutí a dozvuku po vypnutí zvukového zdroje je uveden na obr. 4.2.

Ve skutečnosti však objemová intenzita vzrůstá i klesá po nepravidelných skocích, ne plynule jak dokumentují rovnice (83) a (86). Skokové změny jsou způsobeny vlivem nedostatečného počtu odrazů zvukové vlny od stěn, což bývá zejména při vysoké akustické pohltivosti stěn (v praxi pro $\alpha > 0{,}2$). Potom, vzhledem k tomu, že statistická akustika je přesná pouze pro vysoký počet odrazů, budou pro vyšší pohltivosti rovnice (83) a (86) platit pouze orientačně.

4.3.9 Doba dozvuku

Doba dozvuku je doba, za kterou klesne intenzita zvuku na 10^{-6} původní hodnoty, což odpovídá poklesu hladiny intenzity zvuku o 60 dB. Pro dobu dozvuku odvodil **Sabine** vzorec za předpokladu, že v libovolném místě sledovaného interiéru je všude stejná hustota zvukové energie (tedy i intenzity zvuku) a že platí princip sčítání energií bez ohledu na okamžité fáze veličin zvukového pole, tedy při platnosti podmínek statistické akustiky. K odvození Sabinova vzorce použijeme rovnici (86) pro dozvuk, do níž dosadíme pokles intenzity zvuku na 10^{-6}, který nastal mezi časy t_1 a t_2, tedy

$$10^{-6} = \frac{I(t_2)}{I(t_1)} = \frac{\mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}t_2}}{\mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}t_1}} = \mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}(t_2-t_1)} \,, \tag{88}$$

kde $T = t_2 - t_1$ je hledaná doba dozvuku. Logaritmováním předchozí rovnice a úpravou dostaneme

$$T = \frac{24}{c \log e} \frac{V}{A} \tag{89}$$

a po vyčíslení logaritmu a známých fyzikálních konstant získáme **Sabinův vzorec** pro dobu dozvuku

$$T = 0{,}164 \text{ s.m}^{-1} \frac{V}{A} \,, \tag{90}$$

kde V je objem místnosti a A je zvuková pohltivost uzavřeného prostoru. V souladu s poznámkou pod rovnicí (87) platí Sabinův vztah pouze pro prostory se středním činitelem zvukové pohltivosti $\overline{\alpha} < 0{,}2$. Při uvažování pohltivosti zvuku ve vzduchu se zvuková pohltivost uzavřeného prostoru v Sabinově vztahu (90) změní na tvar

$$A = \overline{\alpha}\, S + 4mV \,, \tag{91}$$

kde činitel útlumu m nabývá hodnot od 0,001 m^{-1} do 0,05 m^{-1} v závislosti na frekvenci a relativní vlhkosti vzduchu.

Pro větší pohltivosti stěn používáme výpočet doby dozvuku podle **Eyringa**, který připouští skokovou změnu hustoty energie. Eyring vyšel z předpokladu, že zvuková vlna o intenzitě I se odražením skokově zeslabí na hodnotu $\overline{\alpha}\, I$. Stejně jako Sabine, Eyring předpokládá pro všechny odrazy střední činitel $\overline{\alpha}$, resp. předpokládá od všech ploch stejný počet odrazů. Doba dozvuku podle Eyringa je

$$T_{\mathrm{E}} = 0{,}164 \text{ s.m}^{-1} \frac{V}{-S\ln(1-\overline{\alpha})} \,, \tag{92}$$

kde $-S\ln(1-\overline{\alpha}) = S\overline{\alpha}'$. Pro $\overline{\alpha}' = 1$ vychází $T_{\mathrm{E}} = 0$.

Pro vysoce pohltivé prostory ($\overline{\alpha} > 0{,}8$) je výhodný vztah **Millingtonův**. Předpokládá různý počet odrazů od povrchů stěn s různými činiteli pohltivosti α_i a má tvar

$$T_{\mathrm{M}} = 0{,}164\ \mathrm{s.m^{-1}} \frac{V}{-\sum_{i=1}^{n} S_i \ln(1-\alpha_i)}\ . \tag{93}$$

Tento vztah je výpočetně nejnáročnější. Při uvažování absorpce zvuku ve vzduchu se Eyringův i Millingtonův vztah změní obdobně jako Sabinův, viz rovnice (91).

Činitel zvukové pohltivosti α a doba dozvuku jsou funkcí frekvence zvuku, proto dosažení požadované doby dozvuku pro všechna frekvenční pásma nemusí být snadné. Člověk umí rozpoznat změnu doby dozvuku přibližně o 10%. Požaduje-li se například vyrovnaná doba dozvuku pro všechna frekvenční pásma, znamení to, že ji je nutno dosáhnout s touto tolerancí.

4.4 Kontrolní otázky

(1) *Slovy a rovnicemi definujte činitel pohltivosti a pohltivost.*

(2) *Co je to činitel průzvučnosti a co je průzvučnost? Jaké rovnice je definují?*

(3) *Jaký je součet zvukové pohltivosti, průzvučnosti a zvukové odrazivosti?*

(4) *.Jaké jsou podmínky použití statistické akustiky pro zvuk v uzavřených prostorách?*

(5) *Napište rovnici pro výkon dopadající na stěnu vyplývající ze statistické akustiky.*

(6) *Stručně vysvětlete (nejlépe pomocí grafu) co je to názvuk a dozvuk.*

(7) *Napište rovnice pro výkonové rovnováhy při názvuku a při dozvuku.*

(8) *Graficky popište časovou závislost objemové hustoty energie zvuku při i) názvuku, ii) dozvuku.*

(9) *Definujte dobu dozvuku. Jaké znáte možné výpočty doby dozvuku? Za jakých podmínek rovnice platí?*

(10) *Jak využijete dobu dozvuku pro měření zvukové pohltivosti?*

4.5 Příklady k procvičení

Řešený příklad 4.1

Tři nezávislé zvuky s hladinami intenzit L_1=25 dB, L_2=60 dB a L_3=65 dB se setkají. Jaká je hladina intenzity výsledného zvuku?

Řešení:

Využijeme rovnici (59)

$$L = 10 \log \sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_i}{10}}$$

a po dosazení číselných hodnot dostaneme výsledek

$$L = 10\log\left(10^{\frac{25}{10}} + 10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{65}{10}}\right) = 66{,}2\ \mathrm{dB}.$$

Řešený příklad 4.2

Bodový všesměrový zdroj vytváří ve volném poli ve vzdálenosti r = 3 m hladinu akustického tlaku 92 dB. Jaký je akustický výkon a hladina akustického výkonu tohoto zdroje?

Řešení:

Uvědomíme si, že akustický zdroj o výkonu P vytvoří ve vzdálenosti r kulovou vlnoplochu o ploše $4\pi r^2$. Potom akustická intenzita

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

Využijeme shodnost hladin $L_p = L_I$ a z definice L_I dostaneme

$$L_p = L_I = 20\mathrm{dB}\ \log\frac{\frac{P}{4\pi r^2}}{I_\mathrm{r}} = 10\mathrm{dB}\ \log\frac{P}{4\pi r^2 I_\mathrm{r}},$$

úpravou

$$P = 4\pi r^2 I_\mathrm{r} 10^{\frac{L_p}{10}} = 4\pi .3^2 I_\mathrm{r} 10^{\frac{92\ \mathrm{dB}}{10}} = 1{,}79\ \mathrm{W}.$$

Hladinu akustického výkonu v místě zdroje určíme z definice

$$L_P = 10\mathrm{dB}\ \log\frac{P}{P_\mathrm{r}} = 10\mathrm{dB}\ \log\frac{1{,}79\ \mathrm{W}}{10^{-12}\ \mathrm{W}} = 123\ \mathrm{dB}.$$

Řešený příklad 4.3

Jak se změní hladina akustického tlaku při zvětšení vzdálenosti od bodového zdroje ve volném poli na pětinásobek?

Řešení:

Využijeme rovnici (63) a vypočítáme

$$\Delta L = -20\mathrm{dB}\log\frac{r_2}{r_1} = -20\mathrm{dB}\log\frac{5r_1}{r_1} = -20.\log 5 = -14{,}0\ \mathrm{dB}.$$

Hladina akustického tlaku klesne o 14 dB.

Řešený příklad 4.4

V uzavřené místnosti klesá při dozvuku hladina akustického tlaku zcela rovnoměrně každou sekundu o 14 dB. Vypočítejte dobu dozvuku v této místnosti. Řešte nejdříve obecně. K řešení použijte rovnici časové závislosti intenzity zvuku při dozvuku a definici doby dozvuku.

Řešení:

Pokles hladiny akustického tlaku odpovídá poklesu hladiny akustické intenzity. Využijeme rovnici (86) $I(t) = I_0\,\mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}t}$ a napíšeme ji pro poměr akustických intenzit

$$\frac{I_1}{I_2} = \mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}(t_2 - t_1)} = \mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}t},$$

kde $t = t_2 - t_1$ a logaritmujeme

$$10\,\mathrm{dB}\log\frac{I_1}{I_2} = 10\,\mathrm{dB}\log\left(\mathrm{e}^{-\frac{Ac}{4V}t}\right)$$

úpravami a dosazením zadání

$$\Delta L = -\frac{10\,\mathrm{dB}\,A\,c}{4V}\,t\log e,$$

$$\frac{\Delta L}{t} = \frac{-14\ \mathrm{dB}}{1\,\mathrm{s}} = -\frac{10\,\mathrm{dB}\,\alpha\,S\,c}{4V}\log e.$$

Pro dobu dozvuku napíšeme stejnou rovnici

$$\frac{-60\ \mathrm{dB}}{T} = -\frac{10\,\mathrm{dB}\,\alpha\,S\,c}{4V}\log e\,.$$

Porovnáním

$$\frac{-60\ \mathrm{dB}}{T} = \frac{-14\ \mathrm{dB}}{1\,\mathrm{s}},$$

$$T = 4{,}29\ \mathrm{s}.$$

Řešený příklad 4.5

Určete dobu dozvuku a) podle Sabina, b) podle Eyringa, pro místnost ve tvaru polokoule o poloměru 15 m. Stěny i podlaha této místnosti mají střední činitel zvukové pohltivosti 0,2.

Řešení:

Nejdříve zjistíme objem a povrch uzavřeného prostoru

$$V = \frac{1}{2}\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{6}\pi.15^3 = 7069\ \mathrm{m}^3,$$

$$S = 2\pi r^2 + \pi r^2 = 2121\,\mathrm{m}^2$$

a dále zjistíme pohltivost prostoru

$$A = \overline{\alpha}\,S = 0{,}2.2121 = 424\ \mathrm{m}^2\,.$$

Podle Sabina

$$T_{\mathrm{S}} = 0{,}164\ \mathrm{s.m^{-1}}\frac{V}{A},$$

$$T_{\mathrm{S}} = 0{,}164\ \mathrm{s.m^{-1}}\frac{7069}{424} = 2{,}73\ \mathrm{s}.$$

Podle Eyringa

$$T_{\mathrm{E}} = 0{,}164\ \mathrm{s.m^{-1}}\ \frac{V}{-S\ln(1-\overline{\alpha})},$$

$$T_{\mathrm{E}} = 0{,}164\ \mathrm{s.m^{-1}}\ \frac{7069}{-2121.\ln(1-0{,}2)} = 2{,}45\,\mathrm{s}.$$

Řešený příklad 4.6

Stanovte plochu povrchu materiálu o činiteli zvukové pohltivosti α_2 = 0,65, kterým se musí obložit stěny místnosti o rozměrech 15 m, 10 m, 5 m tak, aby se její doba dozvuku snížila z původní hodnoty T_1 = 1,3 s na T_2 = 0,9 s.

Řešení:

Použijeme Sabinův vztah

$$T = 0{,}164\frac{V}{A}$$

pro obě doby dozvuku T_1 a T_2. Získáme

$$T_1 = 0{,}164\frac{V}{\alpha_1 S_1}, \quad T_2 = 0{,}164\frac{V}{\alpha_1(S_1 - S_2) + \alpha_2 S_2}$$

kde

$$S_1 = 2.(15\ \mathrm{m}.10\ \mathrm{m} + 15\ \mathrm{m}.5\ \mathrm{m} + 5\ .10\ ) = 550\ \mathrm{m}^2,$$

$$V = 15\ \mathrm{m}.10\ \mathrm{m}.5\ \mathrm{m} = 750\ \mathrm{m}^3$$

a odtud pro náš případ

$$S_2 = \frac{0{,}164V\left(\dfrac{1}{T_2} - \dfrac{1}{T_1}\right)}{\alpha_2 - \dfrac{0{,}164V}{T_1 S_1}} = 88\ \mathrm{m}^2$$

Řešený příklad 4.7

V místnosti o rozměrech 10 m x 8 m x 4 m je hladina intenzity hluku 30 dB. Stěna, strop i podlaha mají činitel zvukové pohltivosti 0,2. Otevřením dveří rozměrů 2 m x 1 m vniká z chodby hluk, který má na chodbě hladinu intenzity 60 dB. Jaká bude nyní hladina intenzity hluku v místnosti?

Řešení:

Nejdříve spočítáme pohltivost místnosti (index 1) podle rovnice (72).

$$A_1 = \sum_{i=1}^{n}\alpha_i S_i = 2.0{,}2.(10.8 + 8.4 + 10.4) = 60{,}8\ \mathrm{m}^2$$

a následně převedeme, s využitím definice (51), hladinu intenzity na intenzitu

$$I_1 = 10^{\frac{L_1 - 120}{10}} = 10^{\frac{30-120}{10}} = 10^{-9}\,\mathrm{W.m^{-2}}\,.$$

Intenzita na chodbě bude

$$I_2 = 10^{\frac{L_2 - 120}{10}} = 10^{\frac{60-120}{10}} = 10^{-6}\,\mathrm{W.m^{-2}}$$

Výkon P_0 dopadající a zároveň procházející otevřenými dveřmi bude

$$P_0 = \frac{1}{4} I_2 S_0 = \frac{1}{4} 10^{-6}.2.1 = 5.10^{-7}\ \mathrm{W}\,,$$

kde S_0 plocha dveří a I_2 je intenzita na chodbě (index 2). Potom další zdroj zvuku (index 0) bude mít intenzitu

$$I_0 = \frac{4P_0}{A_1} = \frac{4.5.10^{-7}}{60{,}8} = 3{,}29.10^{-8}\ \mathrm{W.m^{-2}}\,.$$

Sečteme intenzity různých zdrojů a získáme výslednou intenzitu v místnosti

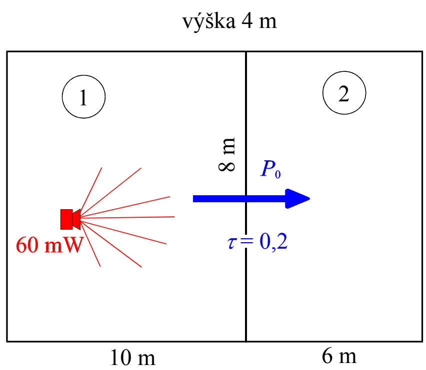
$$I = I_1 + I_0 = 1.10^{-9} + 32{,}9.10^{-9} = 3{,}39.10^{-8}\,\mathrm{W.m^{-2}}$$

a její hladinu

$$L_I = 10\mathrm{dB}\log\frac{3{,}39.10^{-8}}{10^{-12}} = 45{,}3\mathrm{dB}\,.$$

Řešený příklad 4.8

V místnosti o rozměrech 10 m x 8 m x 4 m je reproduktor o akustickém výkonu 60 mW. Tato místnost je oddělená stěnou od sousední místnosti, jejíž velikost je 8 m x 6 m x 4 m. Rozměry oddělovací stěny jsou 8 m x 4 m a její činitel průzvučnosti je 0,2. Stěny a strop obou místností mají činitel zvukové pohltivosti 0,2; podlahy obou místností mají činitel zvukové pohltivosti 0,4. Určete: a) hladinu akustické intenzity v místnosti s reproduktorem, b) hladinu akustické intenzity v sousední místnosti.



Řešení:

Místnosti s reproduktorem přiřaďme index 1, oddělené místnosti index 2. Pak jejich zvukové pohltivosti budou

$$A_1 = 0{,}2.(10.8 + 2.8.4 + 2.10.4) + 0{,}4.10.8 = 76{,}8\ \mathrm{m^2}\,,$$
$$A_2 = 0{,}2.(6.8 + 2.8.4 + 2.6.4) + 0{,}4.6.8 = 51{,}2\ \mathrm{m^2}\,.$$

Zdroj zvuku vytvoří v první místnosti, v souladu s rovnicí (81), akustickou intenzitu

$$I_1 = \frac{4P}{A_1} = 3{,}13.10^{-3}\ \mathrm{W.m^{-2}},$$

kteréodpovídá hladina

$$L_1 = 10\log\frac{3{,}13.10^{-3}\ \mathrm{W.m^{-2}}}{10^{-12}\ \mathrm{W.m^{-2}}} = 84{,}9\ \mathrm{dB}.$$

Výkon P_0, který projde do oddělené místnosti bude

$$P_0 = \frac{1}{4} I_1 \tau S_0 = 5.10^{-3}\ \mathrm{W},$$

kde S_0 je plocha oddělující stěny. Výkon P_0 se stane zdrojem zvuku v oddělené místnosti a vytvoří intenzitu I_0

$$I_0 = \frac{4P_0}{A_2} = \frac{4.5.10^{-3}\ \mathrm{W}}{51{,}2\ \mathrm{m^2}} = 3{,}91.10^{-4}\ \mathrm{W.m^{-2}},$$

takže hledaná hladina intenzity bude

$$L_0 = 10\log\frac{I_0}{I_r} = 10\log\frac{3{,}91.10^{-4}\ \mathrm{W.m^{-2}}}{10^{-12}\ \mathrm{W.m^{-2}}} = 85{,}9\ \mathrm{dB}$$

Řešený příklad 4.9

Do učebny o rozměrech 10 m x 8 m x 4 m vniká otevřeným oknem o rozměrech 2 m x 3 m hluk, jehož hladina akustické intenzity je 80 dB. Stěna, strop i podlaha učebny mají činitel zvukové pohltivosti 0,3. Vypočtěte: a) hustotu akustické energie v učebně, b) hladinu akustické intenzity v učebně.

Řešení:

Převedeme hladinu intenzity na akustickou intenzitu

$$I_2 = 10^{\frac{L_2 - 120}{10}} = 10^{\frac{80-120}{10}} = 10^{-4}\,\mathrm{W.m^{-2}}$$

a zjistím výkon, který prošel oknem do učebny

$$P_0 = \frac{1}{4} I_2 S_0 = \frac{1}{4} 10^{-4}.2.3 = 1{,}50.10^{-4}\ \mathrm{W}.$$

Pohltivost učebny bude

$$A_1 = 2.0{,}3.(10.8 + 8.4 + 10.4) - 0{,}3.2.3 = 89{,}4\ \mathrm{m^2},$$

a proto intenzita vytvořená zdrojem hluku o výkonu P_0, v souladu s rovnicí (81), bude

$$I_1 = \frac{4P_0}{A_1} = \frac{4.1{,}50.10^{-4}\ \mathrm{W}}{89{,}4\ \mathrm{m^2}} = 6{,}71.10^{-6}\ \mathrm{W.m^{-2}}$$

a jí odpovídající objemová hustota akustické energie podle (49) bude

$$w_1 = \frac{I_1}{c} = \frac{6{,}71.10^{-6}\ \mathrm{W.m^{-2}}}{340\ \mathrm{m.s^{-1}}} = 1{,}97.10^{-8}\ \mathrm{J.m^{-3}}.$$

Hladinu intenzity získáme z definiční rovnice (51),

$$L_1 = 10\text{dB}\log\frac{6{,}71.10^{-6}\ \text{W.m}^{-2}}{10^{-12}\ \text{W.m}^{-2}} = 68{,}3\ \text{dB}.$$

Řešený příklad 4.10

Uzavřená místnost má rozměry 6 m x 3,4 m x 2,7 m a její stěny, strop a podlaha mají střední činitel zvukové pohltivosti 0,26. Do místnosti prochází větracím okýnkem o ploše 0,7 m ^{2} z ulice hluk. Hladina intenzity hluku na ulici je 85 dB. a) Jaký akustický výkon prochází větracím okýnkem? b) Jaká bude hladina intenzity hluku v místnosti?

Řešení:

Převedeme hladinu intenzity na ulici na akustickou intenzitu

$$I_2 = 10^{\frac{L_2-120}{10}} = 10^{\frac{85-120}{10}} = 3{,}16.10^{-4}\,\text{W.m}^{-2}$$

a zjistíme Větracím okýnkem potom prochází akustický výkon

$$P_0 = \frac{1}{4} I_2 S_0 = \frac{1}{4}\cdot 3{,}16.10^{-4}.0{,}7 = 5{,}53.10^{-5}\ \text{W}.$$

Tento výkon je zdrojem zvuku a vytvoří akustickou intenzitu

$$I_0 = \frac{4P_0}{A_1} = \frac{4.5{,}53.10^{-5}\ \text{W}}{23{,}8} = 9{,}30.10^{-6}\ \text{W.m}^{-2},$$

kde pohltivost místnosti jsme spočetli jako

$$A_1 = 2.0{,}26.(6.3{,}4 + 6.2{,}7 + 3{,}4.2{,}7) = 23{,}8\ \text{m}^2.$$

Hladina intenzity I_1 bude

$$L_I = 10\text{dB}\log\frac{9{,}30.10^{-6}}{10^{-12}} = 69{,}7\ \text{dB}$$

Neřešený příklad 4.11

V prostředí, jehož hladina hluku pozadí je 60 dB, byl změřen hluk stroje. Byla naměřena hodnota 64 dB. Jak velký by byl hluk stroje, kdybychom měřili v tiché místnosti? [61,8 dB]

Neřešený příklad 4.12

Do jaké vzdálenosti od chráněného prostoru je třeba umístit bodový zdroj, u něhož výrobce udává hladinu hluku L_{Aeq} = 90 dB změřenou ve vzdálenosti 3m, když hygienický předpis předepisuje pro dané místo maximální přípustnou hladinu hluku L_{Amax} = 60dB? [95 m]

Neřešený příklad 4.13

Omítnuté stěny a strop v místnosti o rozměrech 10 m x 8 m x 3,6 m mají střední činitel zvukové pohltivosti 0,25, podlaha pokrytá kobercem 0,26, dveře rozměrů 2 m x 0,9 m 0,1 a okno 2,1 m x 1,5 m 0,027. V místnosti je zdroj zvuku o středním akustickém výkonu 5 mW. Určete: a) objemovou hustotu akustické energie v místnosti, b) celkovou energii zvuku v místnosti. [8,14.10^{-7} J.m^{-3}, 2,35.10^{-4} J, kontrolní údaj: A = 72,2 m^2]

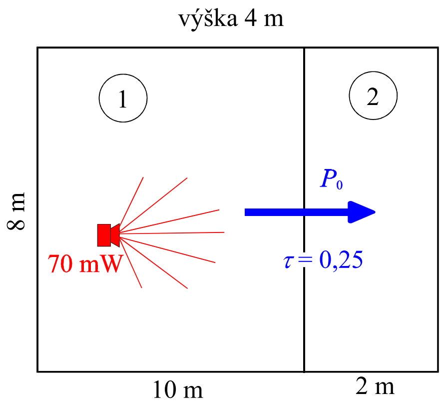
Neřešený příklad 4.14

Uzavřená místnost má rozměry 6 m x 5 m x 3 m a její stěny mají střední činitel zvukové pohltivosti 0,25. Reproduktor v místnosti vydává střední akustický výkon 100 mW. Místnost je obsazena 12 osobami, přičemž zvuková pohltivost jedné osoby je 0,4 m^2. Vypočítejte: a) hustotu akustické energie, která se ustálí v místnosti, b) akustický výkon dopadající na 1 m^2 stěny v místnosti. [3.24,10^{-5} J.m^{-3}, 2,75. mW]

Neřešený příklad 4.15

V místnosti o rozměrech 10 m x 8 m x 4 m je reproduktor o akustickém výkonu 70 mW. Tato místnost je oddělená stěnou od předsíňky jejíž velikost je 8 m x 2 m x 4 m. Rozměry oddělovací stěny jsou 8 m x 4 m a její činitel průzvučnosti je 0,25. Stěny, podlahy a stropy obou místností mají činitel zvukové pohltivosti 0,2. Určete: a) akustickou intenzitu v místnosti s reproduktorem, b) akustickou intenzitu v předsíňce. [4,61.10^{-3} W.m^{-2}, 1,64.10^{-3} W.m^{-2}]

Neřešený příklad 4.16



Uzavřená místnost má povrch včetně stropu a podlahy 91,6 m^2 a její stěny, strop a podlaha mají střední činitel zvukové pohltivosti 0,28. Do místnosti prochází otvorem o ploše 0,7 m^2 z vedlejší haly hluk. Hladina intenzity hluku v hale je 88 dB. a) Jaký akustický výkon prochází otvorem? b) Jaká bude hladina intenzity hluku v místnosti? [0,11 mW, 62,4 dB]

Neřešený příklad 4.17

Jaký je střední činitel zvukové pohltivosti místnosti, která má tvar kvádru o rozměrech 14 m, 8 m, 5 m, v níž byla naměřena doba dozvuku $T = 1,\ 1$ s? [0,19]

5 Závěr

5.1 Shrnutí

Modul AKUSTIKA pojednává o oblasti fyziky, která má pro stavebnictví mimořádný význam. Byly zde vysvětleny pojmy akustický tlak, akustická rychlost, vlnová rovnice, rovinná vlna, akustická impedance a akustický odpor, akustická energie, objemová hustota akustické energie, akustický výkon, akustická intenzita, hladina akustické intenzity, hladina akustického tlaku, hladina akustického výkonu, fyziologická akustika, vnímání zvuku, hladina hlasitosti, hlasitost, zvuková spektra, analýza zvuku, účinky zvuku na člověka, fyzikální akustika, maskování zvuku, směšování zvuku, ozvěna, šíření zvuku v otevřeném prostoru, akustika interiéru, statistická akustika, činitel zvukové pohltivosti, názvuk a dozvuk, doba dozvuku.

5.2 Studijní prameny

5.2.1 Seznam použité literatury

[1] Schauer, P. *Akustika.* CERM 2002

[2] Horák, Z., Krupka, F. *Fyzika.* SNTL/ALFA 1976, 2 svazky

[3] Binko, J., Kašpar, I. *Fyzika stavebního inženýra.* SNTL/ALFA 1983

[4] Krempaský, J. *Fyzika.* ALFA/SNTL 1982

5.2.2 Seznam doplňkové studijní literatury

[5] Holliday, D., Resnick, R, Walker, J. *Fyzika*. VUT/VUTIUM 2000

5.2.3 Odkazy na další studijní zdroje a prameny

[6] http://fyzika.fce.vutbr.cz