

1.8.3. Akustické vlnění



1. Umět vysvětlit princip vzniku akustického vlnění.
2. Znat základní rozdělení akustického vlnění podle frekvencí.
3. Znat charakteristické veličiny akustického vlnění a jejich jednotky:
 - periodu,
 - frekvenci,
 - akustickou výchylku,
 - akustickou rychlost,
 - akustický tlak,
 - akustickou impedanci,
 - akustickou intenzitu,
 - vlnovou délku,
 - fázovou rychlost
 - efektivní hodnoty akustické rychlosti a akustického tlaku.
4. Umět vysvětlit rozdíl mezi akustickou rychlostí a fázovou rychlostí akustické vlny..
5. Umět vysvětlit Weber-Fechnerův zákon.
6. Vysvětlit pojmy hladin akustického tlaku, výkonu a intenzity akustického vlnění.



Zdrojem akustického vlnění je jakýkoliv objekt, který kmitá kolem rovnovážné polohy. Svou kmitovou energii

$$E = \frac{1}{2} k A^2$$
 přenáší na částice okolního prostředí. Ty se rozkmitávají a energie se postupně šíří prostředím.

Akustické vlnění je vlnění podélné.

Šíří se hmotným prostředím tak, že částice tohoto prostředí kmitají ve směru šíření vlnění. V určitých místech nastává větší zhuštění částic (místa o **větším tlaku p**), v jiných oblastech naopak zhuštění menší (místa o **menším tlaku p**). Tyto tlakové změny se šíří daným prostředím konstantní rychlostí v . **Vzdálenost dvou sousedním míst o stejném zhuštění (zředění) je rovna vlnové délce λ .**

Podélné (akustické) vlnění vzniká například po úderu kladivem do tyče ve směru podélné osy tyče. Částice tyče v místě úderu se rozkmitají ve směru úderu. V tyči dojde v místě úderu ke zhuštění částic. Po oddálení kladiva se částice vrátí do původní rovnovážné polohy. Zhuštění částic nastane v jiném místě. Tyto změny hustoty materiálu se šíří jako **tlakové vlny**.

1.8.3.1. Zvuk

Zvuk je podélné mechanické vlnění postupující hmotným prostředím jako tlakové vlny, které je možné fyziologicky vnímat jako sluchová vjem.

Je to mechanické vlnění o frekvencích **16 Hz až 20 000 Hz.**

- a) **infrazvuk** jsou podélné akustické vlny o frekvencích menších než 16 Hz,
- b) **ultrazvuk** jsou podélné akustické vlny o frekvencích vyšších než 20 000 Hz.

Zvuk je jedním ze základních dějů, kterými člověk získává informace o okolním světě. Tento děj si můžeme představit jako přenos informací v soustavě, kterou tvoří:

- a) **zdroj zvuku**,
- b) **prostředí**, kterým se šíří zvukové vlnění,
- c) **přijímač zvuku**, jímž je v nejjednodušším případě lidské ucho.

Fyzikální akustika se zabývá fyzikálními ději při přenosu zvuku – vznik, šíření a pohlcování zvuku.

Fyziologická akustika studuje vznik zvuku v hlasovém orgánu člověka a vnímání sluchem.

Hudební akustika zkoumá zvuky z hlediska potřeb hudby.

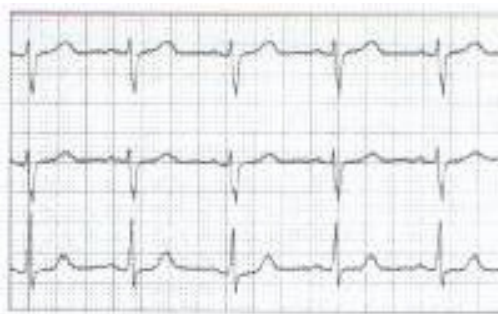
Zdrojem zvuku jsou vibrace těles, které se přenášejí na okolní prostředí. Šíří se v pevných látkách, kapalinách, plynech (nejčastěji vzduchem).

Zvukové vlny mají v různých prostředích různou rychlost a vlnovou délku. Frekvence zůstává při přestupu stejná.

Prostupem prostředí dochází k pohlcování (absorpci) zvuku – amplituda zvukových vln klesá.

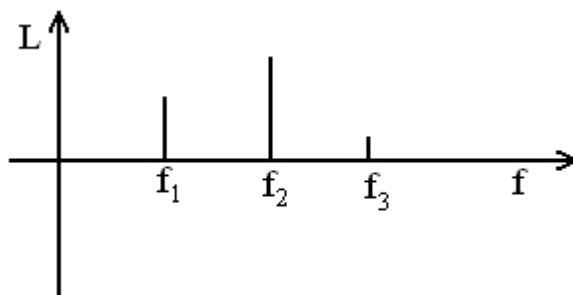
Sluchem rozlišujeme periodické a neperiodické zvuky.

- a) **tón** je periodický zvuk, jsou to zvuky hudebních nástrojů, samohlásky řeči.
 - a. jednoduchý tón – harmonický (např. zvuk ladičky), grafickým znázorněním je sinusoida.
 - b. složený tón – neharmonický, příklady neharmonických tónů jsou na Obr. 1.8.-21.



Obr. 1.8.-21

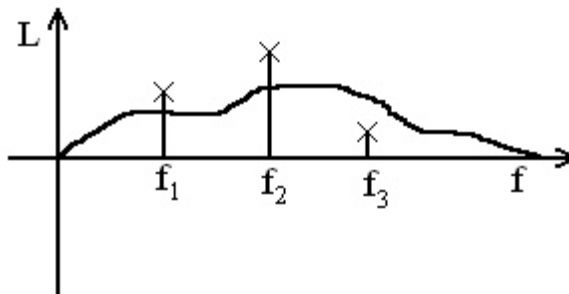
Rozborem pomocí Fourierovy analýzy můžeme stanovit charakteristické spektrum tónu, případně jakéhokoliv zvuku. Na svislé ose je na následujících obrázcích hladina akustické veličiny L (viz. odstavec 1.8.3.5.).



Obr. 1.8.-22

b) **hluk** je neperiodický zvuk patří sem praskot, šum, souhlásky řeči.

Podobně získáme pomocí frekvenčních analyzátorů spektrum šumu. Spektrum je spojité. Mohou se v něm ovšem vyskytnout určité charakteristické frekvence.



Obr. 1.8.-23

Výška zvuku je určena jeho frekvencí. U zvuků s harmonickým průběhem (jednoduchý tón) určuje frekvence **absolutní výšku** tónu.

Není-li zvuk harmonický (složený tón) obsahuje složky s různými frekvencemi (**vyšší harmonické frekvence**). Vznikl složením jednoduchých tónů. Jeho výšku určuje základní, to je nejnižší frekvence. Vyšší harmonické složky určují **barvu** tónu. Je charakteristická pro různé nástroje. Podle barvy rozlišíme také hlasy různých osob.

Absolutní výšku většinou nedokážeme určit sluchem. Obvykle používáme k porovnání výšky tzv. **relativní výšku** – je to poměr frekvence daného tónu k frekvenci základního tónu.

Jako základní tón byl v hudební akustice stanoven mezinárodní tón o frekvenci 440 Hz. V technické praxi byl jako základní stejným způsobem stanoven tón o frekvenci 1000 Hz (tzv. referenční tón).

Poznámka:

Zvukové vlny jsou zachycovány boltcem a přenášeny zvukovodem. Vlivem tlakových změn je rozkmitán bubínek na konci zevního zvukovodu. Tím se rozkmitá i kladívko, jež je svým držadlem připojeno z vnitřní strany k bubínku. Kůstky středního ucha představují vázané systémy spojené pružnou vazbou. Kladivo přeneslo kmity přes kovádlíku na třmínek do oválného okénka mezi středními vnitřním uchem. Pokud jsou tlakové změny způsobené vlněním příliš velké (příliš velká amplituda kmitu), může dojít k bolestivému vjemu, případně až k poškození bubínku.

1.8.3.2. Rychlost šíření akustického vlnění

Pro rychlost šíření akustické vlny se často používá symbol c .

Rychlost šíření c akustické vlny je v daném prostředí konstantní. Do vzdálenosti s se rozšíří za dobu t .

Pak

$$c = \frac{s}{t}.$$

1.8.-23

Protože do vzdálenosti jedné vlnové délky se vlnění rozšíří za dobu jedné periody T , pak můžeme psát

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f. \quad 1.8.-24$$



Zvuková vlna se vrací do místa rozruchu jakožto ozvěna od kolmé stěny za 1,52 s. Jaká je vzdálenost stěny od zdroje zvuku, je-li rychlost zvuku 332 m/s.

$$t = 1,52 \text{ s}, v = 332 \text{ m.s}^{-1}, s = ?$$

Zvuk se šíří v daném prostředí konstantní rychlostí.

Pak $v = \frac{s}{t}$. Doba potřebná k uražení dráhy k překážce je $t' = \frac{t}{2}$. Pak po dosazení

$$\text{úpravě a dosazení je } s = v t' = v \frac{t}{2} = 332 \frac{1,52}{2} = 252 \text{ m}.$$

Rychlost vlnění v pevné látce



Protože se jedná o pružné jevy v materiálech, je možné na základě Hookova zákona odvodit vztah pro rychlost šíření akustické vlny v pevné látce a kapalině.

Podélné vlnění (longitudinální) se šíří rychlostí

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad 1.8.-25$$

kde E (jednotka Pa) je modul pružnosti v tahu v pevné látce hustoty ρ .

Rychlost šíření příčného vlnění (transverzální) v pevné látce je dána vztahem $c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$.

Souvislost mezi podélným a příčným vlněním určuje vztah $G = \frac{mE}{2(m+1)}$, kde G je modul pružnosti v torzi (jednotka Pa) a m je Poissonovo číslo charakteristické pro každý materiál.

V pevných látkách se šíří vlny podélné i příčné.

Rychlost vlnění v kapalině

Rovněž v kapalině odvozujeme rychlost šíření pomocí Hookova zákona. Po odvození vychází

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\gamma \rho}}, \quad 1.8.-26$$

kde k (jednotka Pa) je modul pružnosti kapaliny a γ (jednotka Pa^{-1}) je modul objemové stlačitelnosti kapaliny hustoty ρ .

V kapalině se na povrchu šíří vlny příčné, uvnitř kapaliny se šíří vlny podélné.

Rychlost vlnění v plynu

Plyn se liší od pevných látek a kapalin svými vlastnostmi. Nemůžeme jej charakterizovat konstantami pružnosti.

Při šíření podélného akustického vlnění v plynu, například ve vzduchu, probíhají tlakové změny tak rychle, že nedochází k tepelné výměně mezi dvěma místy rozdílných teplot. Takový děj můžeme považovat za děj adiabatický. Pak po odvození z kinetické teorie plynů můžeme rychlost šíření podélného vlnění v plynu použít vztah

$$c = \sqrt{\frac{\chi p}{\rho}}, \quad 1.8.-27$$

kde χ je Poissonova konstanta, p je tlak plynu hustoty ρ ,

Pro rychlost šíření akustického vlnění ve vzduchu byl empiricky odvozen vztah

$$c = (331,6 + 0,607 \{t\}) \text{ m.s}^{-1},$$

kde t je teplota vzduchu ve $^{\circ}\text{C}$.

V plynech se šíří jen vlny podélné.



Lidské ucho vnímá frekvence 16 Hz – 20 000 Hz při teplotě 30 $^{\circ}\text{C}$. V jakém intervalu leží příslušné vlnové délky ?

$$f_1 = 16 \text{ Hz}, f_2 = 20\,000 \text{ Hz}, t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}, \lambda_1 = ?, \lambda_2 = ?$$

Pro rychlost šíření zvuku ve vzduchu platí vztah:

$$v = (331,6 + 0,607 t) = (331,6 + 0,607 \cdot 30) = 351,5 \text{ m.s}^{-1}$$

Pro vlnové délky zvuku při daných frekvencích platí:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{351,5}{16} = 22 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{351,5}{20\,000} = 0,018 \text{ m}$$



Lidské ucho vnímá frekvence 16 Hz – 20 000 Hz při teplotě 30 $^{\circ}\text{C}$. V jakém intervalu leží příslušné vlnové délky ?

$$f_1 = 16 \text{ Hz}, f_2 = 20\,000 \text{ Hz}, t = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}, \lambda_1 = ?, \lambda_2 = ?$$

Pro rychlost šíření zvuku ve vzduchu platí vztah:

$$v = (331,6 + 0,607 t) = (331,6 + 0,607 \cdot 30) = 351,5 \text{ m.s}^{-1}$$

Pro vlnové délky zvuku při daných frekvencích platí:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{351,5}{16} = 22 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{351,5}{20000} = 0,018 \text{ m}$$



Určete dobu, za kterou urazí zvuk v měděném vedení vzdálenost 5 km. Modul pružnosti mědi je $1,22 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$, hustota mědi je $8,9 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

Zvuk se šíří ve vzduchu konstantní rychlostí, kde $c = \frac{s}{t}$. Zároveň pro rychlost šíření zvuku v plynu platí vztah

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Srovnáním obou vztahů a úpravou dostaneme $t = s \sqrt{\frac{\rho}{E}} = 5 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{8,9 \cdot 10^3}{1,22 \cdot 10^{11}}} = 1,35 \text{ s}$.

1.8.3.3. Akustický tlak



Akustický tlak p charakterizuje okamžitou hodnotu tlaku v daném místě prostředí v daném čase.

Akustický tlak je závislý na změně hustoty prostředí, kterou působí periodické kmity částic ve směru šíření vlnění.

Akustický tlak tak závisí na poloze příslušného místa ve směru osy x a je definován jako parciální derivace okamžité výchylky podle x .

$$p = -k \frac{\partial u}{\partial x}, \quad 1.8.-28$$

kde k je konstanta charakterizující pružnost prostředí.

Při odvození vycházíme ze vztahů pro akustickou výchylku u a akustickou rychlost v .

Akustická výchylka představuje okamžitou výchylku částice prostředí z rovnovážné polohy

$$u = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad 1.8.-29$$

Akustická rychlost charakterizuje okamžitou rychlost bodu při určité výchylce (nezaměnit s rychlostí šíření vlnění c)

$$v = \omega A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right).$$

Pak

$$p = -k \frac{\partial u}{\partial x} = -k \omega A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \left(-\frac{1}{c} \right) = \frac{1}{c} k \omega A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad 1.8.-30$$

Protože pro k ze vztahu pro rychlost akustických vln v prostředí můžeme zapsat, že

$$k = c^2 \rho,$$

tak

akustický tlak zapíšeme rovnicí

$$p = c \rho \omega A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad 1.8.-31$$

Amplituda akustického tlaku bude dána vztahem

$$p_0 = c \rho \omega A. \quad 1.8.-32$$

Srovnáme-li poslední dva vztahy s rovnicí, která popisuje akustickou rychlost, pak můžeme akustický tlak vyjádřit pomocí akustické rychlosti v jako

$$p = c \rho v \quad 1.8.-33$$

a amplitudu akustického tlaku jako

$$p_0 = c \rho v_0. \quad 1.8.-34$$

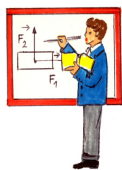
Amplituda akustického tlaku určuje maximální hodnotu tlaku prostředí v okamžiku, kdy se prostředím šíří akustická vlna, vzhledem ke klidovému stavu.

V technické praxi se často používá veličina Z . Představuje akustický odpor prostředí (akustickou impedanci).

Akustická impedance je určena vztahem

$$Z = c \rho. \quad 1.8.-35$$

Jednotkou akustické impedance je $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.



Určete akustický tlak ve vzduchu o akustické impedanci $426 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Při frekvenci $20\,000 \text{ Hz}$ je výchylka kmitu je 1μ .

Amplituda akustického tlaku je $p_0 = Z \omega A = 426 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 20000 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6} = 53 \text{ Pa}$.



Určete akustický tlak ve vodě o akustické impedanci $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Výchylka kmitu je 1μ při frekvenci $20\,000 \text{ Hz}$.

Amplituda akustického tlaku je

$$p_0 = Z \omega A = 1500 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 20000 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6} = 190 \cdot 10^3 \text{ Pa}.$$

Poznámka:

Z těchto dvou příkladů vidíme, jak velkých proměnných tlaků je možné dosáhnout v různých prostředích při určitých frekvencích. Tyto proměnné tlaky jsou pak příčinou fyzikálních a fyzikálně chemických účinků ultrazvuku (např. kavitace)

1.8.3.4. Intenzita zvuku



Energie E vlnění vyslaná zdrojem zvuku za dobu t představuje výkon zdroje

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \text{ Jednotkou akustického výkonu je W (watt).}$$

Dopadá-li energie zvukového vlnění za jednotku času t na jednotkovou plochu S , je **intenzita zvuku**

$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \Delta S} = \frac{\Delta P}{\Delta S}. \quad 1.8.-36$$

Jednotkou akustické intenzity je $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Úpravou je

$$I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 c, \quad 1.8.-37$$

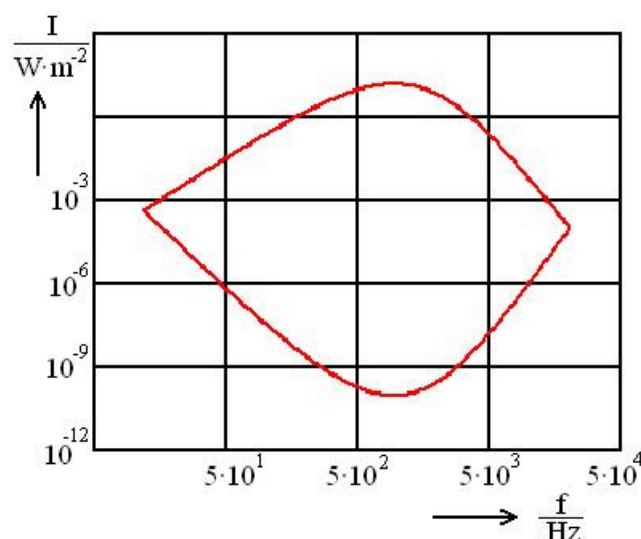
kde A (jednotka m) představuje amplitudu vlnění, p je tlak (jednotka Pa) prostředí a c je rychlost šíření vlnění ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Jestliže ze vztahu pro amplitudu akustického tlaku $p_0 = c \rho \omega A$ vyjádříme $\omega^2 A^2 = \frac{p_0^2}{\rho^2 c^2}$,

pak intenzita I bude

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_0^2}{\rho c}. \quad 1.8.-38$$

Sluchový orgán nevnímá tóny různé frekvence se stejnou intenzitou. Poměrně největší citlivost se jeví v oblasti kolem 3000 Hz. Zde tlaky nižší než prahová hodnota $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ vyvolávají sluchový vjem. Směrem k nižším i vyšším frekvencím citlivost klesá.



Obr. 1.8.-24

Referenční tón 1000 Hz jsme schopni vnímat ve velmi širokém intervalu tlakovém intervalu. Nejnižší akustický tlak na ušní bubínek, při kterém tento tón ještě slyšíme, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Je to tzv. **práh slyšení**. Tomuto tlaku odpovídá intenzita $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Nejvyšší tlak, při kterém ještě nevzniká v uchu pocit bolesti je pro tón 1000 Hz $p_m = 10^2 \text{ Pa}$. Je to tzv. **práh bolesti**.

Tomuto tlaku odpovídá intenzita
 $I_m = 10 \text{ W.m}^{-2}$.

Protože se okamžité hodnoty tlaku p a akustické rychlosti v periodicky mění podle goniometrické funkce, zavádíme jejich efektivní hodnoty p_{ef} , v_{ef} , kde

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad \text{a} \quad v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}}. \quad 1.8.-39$$

Pak po dalších úpravách můžeme vztah pro akustickou intenzitu vyjádřit podle kteréhokoli z následujících vztahů:

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} = \frac{p_{ef}^2}{Z} = \rho c v_{ef}^2 = p_{ef} v_{ef}. \quad 1.8.-40$$



Je-li amplituda kmitajících částic prostředí 1μ , jak velká bude intenzita ve vodě o akustické impedanci $1500 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ a ve vzduchu o akustické impedanci $426 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, je-li frekvence akustické vlny 20 Hz .

$$A = 1 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}, Z_{\text{voda}} = 1500 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}, Z_{\text{vzduch}} = 426 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

$$\text{a) } I = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} Z A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} 1500 \cdot (10^{-6})^2 (2\pi 20)^2 = 1,2 \text{ W.m}^{-2}$$

$$\text{b) } I = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} Z A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} 426 \cdot (10^{-6})^2 (2\pi 20)^2 = 3,4 \text{ W.m}^{-2}$$

1.8.3.5. Hladiny akustické intenzity, akustického tlaku a akustického výkonu

Weber-Fechnerův zákon



Vyjadřuje zákon pro psychofyzikální děje.

Lidské vnímání vnějšího světa a jeho fyzikálních projevů je složitý fyziologický proces. Jeho zákonitostmi se zabývali E.H. Weber a G.T. Fechner. Studovali schopnost člověka vnímat nejrůznější vnější fyzikální podněty (tlak, teplotu, vlhkost, zvuk,...).

Zjistili, že mezi vlastním vjemem V a jeho fyzikální příčinou P , která jej způsobuje není přímo úměrná závislost, ale závislost logaritmická.

Změna fyziologického vjemu dV je úměrná relativní změně jeho fyzikální příčiny dP

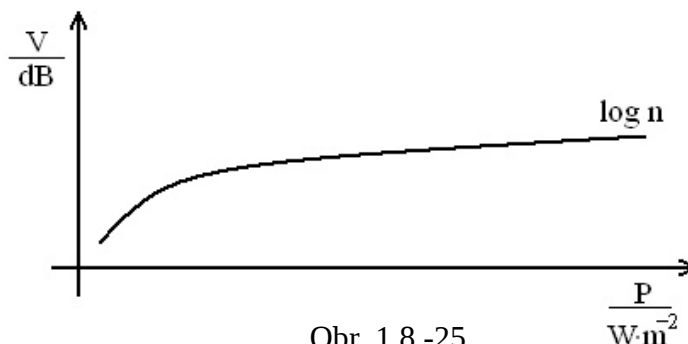
$$dV = k \frac{dP}{P}.$$

Výraz logaritmujeme a můžeme říci, že

„Míra fyziologického vjemu je úměrná logaritmu jeho fyzikální příčiny“

Poznámka:

Po provedení integrace získáme logaritmus podílu dvou stejných fyzikálních veličin. Budeme tedy logaritmovat bezrozměrné číslo a výsledkem bude tedy bezrozměrná veličina. Pro jednodušší orientaci a porovnání zavádíme jednotku **decibel (dB)**. V decibelech může být vyjádřena jakákoliv fyzikální veličina, pro kterou bychom stanovili referenční (vztažnou) hodnotu. Má podobný význam jako procento, nebo promile.



Obr. 1.8.-25

Akustické hladiny:

Akustické hladiny jsou vyjádřením Weber-Fechnerova zákona pro daný případ.

Vnímání zvuku popisují

1. hladina akustické intenzity L_I ,
2. hladina akustického tlaku L_p ,
3. hladina akustického výkonu L_P .

Fyzikální (objektivní) akustické hladiny – nezávisí na frekvenci, lze je použít i v oblasti infrazvuku a ultrazvuku.

Hladina akustické intenzity L_I je dána vztahem

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \quad 1.8.-41$$

kde $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ je referenční hodnota intenzity vnímaného zvuku při frekvenci 1000 Hz. Jednotkou hladiny intenzity je dB (decibel).

Poznámka:

Intenzita je vektor, je prostorově orientovaná. Proto tento vztah platí jen tehdy, jestliže plocha, na které zjišťujeme intenzitu, je kolmá na směr šíření zvuku.

Hladina akustického tlaku L_p je dána vztahem

$$L_p = 10 \lg \frac{p_{ef}^2}{p_{0ef}^2} = 20 \lg \frac{p_{ef}}{p_{0ef}}, \quad 1.8.-42$$

kde $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ je referenční hodnota akustického (efektivního) tlaku. Jednotkou hladiny intenzity je dB (decibel).

Poznámka:

Tlak je skalární veličina. Popisuje stav prostředí bez ohledu na to, z jakého směru zvuková vlna přichází. Sluchový orgán je schopen přijímat zvuk z jakéhokoliv směru. Vnímá tedy akustický tlak, ne intenzitu.

Hladina akustického výkonu L_P

$$L_P = 10 \lg \frac{P}{P_0}, \quad 1.8.-43$$

kde $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$ je referenční hodnota akustického výkonu.

Jednotkou hladiny intenzity je dB (decibel).

Poznámka:

Určování hladiny akustického výkonu se provádí pouze ve speciálních případech, kdy jde většinou o hluk vyzařovaný z průmyslového zdroje.



Zvuková intenzita elektrofonické kytary byla zesílená z $10^{-10} \text{ W.m}^{-2}$ na 10^{-4} W.m^{-2} . Kolik decibelů představuje zesílení?

$$I_1 = 10^{-10} \text{ W.m}^{-2}, I_2 = 10^{-4} \text{ W.m}^{-2}, \Delta L = ?$$

Hladina intenzit zvuku je dána vztahem $L_1 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0}$, $L_2 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0}$, pak rozdíl hladin je po úpravě

$$\Delta L = L_2 - L_1 = 10 \lg \frac{I_2}{I_0} - 10 \lg \frac{I_1}{I_0} = 10 (\lg I_2 - \lg I_0 - \lg I_1 + \lg I_0) = 10 \lg \frac{I_2}{I_1} = 10 \lg 10^6 = 60 \text{ dB}$$



Fyziologické(subjektivní) akustické hladiny – závisí na frekvenci

Bylo zjištěno, že subjektivní vnímání zvuku závisí na frekvenci. Lidský sluch na různé frekvence reaguje s různou citlivostí.

První měření prováděl Barkhausen. Srovnával subjektivní vjem hlasitosti tónu o frekvenci 100 Hz ze sluchátka na jednom uchu jedince z vybrané skupiny studentů s vjemem tónu jiné frekvence poslouchané druhým uchem.

Statistickým vyhodnocením získal křivky stejné hlasitosti. Na jejich základě bylo pásmo slyšitelných frekvencí rozděleno do **oktávových pásem**, z nichž každé je charakterizováno

svým středním kmitočtem. Oktáva je interval mezi dvěma kmitočty, kdy druhý je dvojnásobkem prvního.

Každému pásmu byla přiřazena určitá **korekce**. Po jejím započítání je vliv některých kmitočtů byl potlačen, jiných zesílen. Každé pásmo má tak jinou váhu.

Hladina akustického tlaku je tak měřena pomocí **váhových filtrů** A,B,C,D.

Nejčastěji se používá váhový filtr A. Hladinu akustického tlaku pak stanovíme v jednotkách dB_A nebo $\text{dB}(A)$. Měříme pomocí zvukoměru.

Takto změřené hladiny se nazývají **hladiny zvuku** nebo **hladiny hluku**.



KO 1.8.-28. Co je akustické vlnění?

KO 1.8.-29. Jak dělíme akustické vlnění?

KO 1.8.-30. Jak určíte akustickou rychlost?

KO 1.8.-31. Co je akustická impedance?

KO 1.8.-32. Jak se mění akustický tlak?

KO 1.8.-33. Vysvětlete pojmy akustického tlaku, výkonu a intenzity.

KO 1.8.-34. Vysvětlete pojmy hladin akustického tlaku, výkonu a intenzity.



U 1.8.-6. Rychlost podélného vlnění v ledu je 3300 m.s^{-1} . Vypočítejte modul pružnosti v tahu ledu, je-li jeho hustota $9 \cdot 10^2 \text{ kg.m}^{-3}$.

U 1.8.-7. Jaká je základní frekvence magnetostrikčního generátoru, ve kterém koná niklová trubička délky 10 cm podélné kmity? Hustota niklu je $8,8 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ a modul pružnosti niklu je $2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$.

U 1.8.-8. Vypočítejte koeficient stlačitelnosti alkoholu, je-li jeho hustota $8,06 \cdot 10^2 \text{ kg.m}^{-3}$ a rychlost šíření zvuku v alkoholu je 1227 m.s^{-1} .

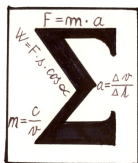
U 1.8.-9. Jaký je akustický výkon zdroje malých rozměrů, je-li ve vzdálenosti 100 m amplituda akustického tlaku ve vzduchu 0,09 Pa?

U 1.8.-10. Je-li amplituda kmitajících částic prostředí 10^{-3} m , jak velká je intenzita ve vodě při kmitočtech

- a) 20 kHz
- b) 1 MHz?

U 1.8.-11. Jaký je poměr intenzit dvou zvukových vln, jejichž hladiny akustického tlaku se liší o 5 dB?

U 1.8.-12. Jaký je rozdíl hladin akustického tlaku zvukové vlny, vzroste-li její akustický tlak na dvojnásobek?



1. Vlnění charakterizují rovnice pro

- **kmitovou energii** $E = \frac{1}{2} k A^2$,
- **fázovou rychlost** $v = \frac{x}{t}$, případně $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$, kde λ je vlnová délka (m)
- **okamžitou výchylku postupné vlny** $u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$
- **zákon odrazu** $\alpha_1 = \alpha_2$,
- **zákon lomu** $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2}$, kde α_1 je úhel dopadu, α_2 je úhel lomu v_1, v_2 jsou rychlosti v prvním a druhém prostředí.

- **stojaté vlnění.** Okamžitá výchylka je popsána rovnicí $u = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \frac{2\pi t}{T}$.

2. Zvuk je podélné vlnění postupující hmotným prostředím hustoty ρ jako tlakové vlny o frekvencích 16 Hz až 20 000 Hz. Zvuk charakterizují rovnice pro

- **rychlost vlnění:** a) v pevné látce $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, kde E (Pa) je modul pružnosti v tahu,.

b) v kapalině $v = \sqrt{\frac{k}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\gamma \rho}}$, kde k (Pa) je modul pružnosti kapaliny

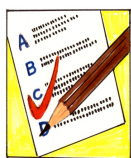
c) v plynu $v = \sqrt{\frac{\chi p}{\rho}}$, kde χ je Poissonova konstanta, p je tlak plynu hustoty ρ ,

- **výkon zdroje** $P = \frac{E}{t}$ (W),
- **intenzitu zvuku** $I = \frac{E}{t S} = \frac{P}{S}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), úpravou je $I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A v = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho v}$, kde A je amplituda vlnění, p je tlak prostředí, ρ je hustota prostředí, v je rychlost šíření vlnění,
- **hladinu intenzity** $L = 10 \lg \frac{I}{I_0}$, kde $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ je prahová intenzita vnímaného zvuku při frekvenci 1 000 Hz. Jednotkou hladiny intenzity je dB (decibel).

Klíč

Mechanické vlnění

1.8.1. Popis mechanického vlnění



- TO 1.8.-1. b)
TO 1.8.-2. a), d)
TO 1.8.-3. a)
TO 1.8.-4. b), c)
TO 1.8.-5. b), d)

- TO 1.8.-6. b)
TO 1.8.-7. d)
TO 1.8.-8. a), c)
TO 1.8.-9. b)
TO 1.8.-10. d)
TO 1.8.-11. c)
TO 1.8.-12. d)
TO 1.8.-13. b)
TO 1.8.-14. a)
TO 1.8.-15. c)
TO 1.8.-16. b), d)
TO 1.8.-17. b), c)
TO 1.8.-18. b), d)
TO 1.8.-19. b)
TO 1.8.-20. c)
TO 1.8.-21. c)
TO 1.8.-22. a), b), c), d)
TO 1.8.-23. b)
TO 1.8.-24. c)
TO 1.8.-25. b)
TO 1.8.-26. c)
TO 1.8.-27. a), c)
TO 1.8.-28. c)
TO 1.8.-29. a), b)

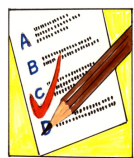


- KO 1.8.-1. Body kmitají napříč ke směru šíření vlnění.
KO 1.8.-2. Body kmitají ve směru šíření vlnění.
KO 1.8.-3. Nejkratší vzdálenost dvou bodů, které kmitají ve stejné fázi.
KO 1.8.-4. Rychlost, se kterou se šíří energie.
KO 1.8.-5. Fázový rozdíl je násobkem dráhového rozdílu.
KO 1.8.-6. $\frac{\lambda}{2}$

- KO 1.8.-7. λ
KO 1.8.-8. Vlnění se šíří ve všech směrech stejnou rychlostí.
KO 1.8.-9. Vlnění se šíří v různých směrech různou rychlostí.
KO 1.8.-10. Viz text.
KO 1.8.-11. Viz text.

KO 1.8.-12. Viz text.

1.8.2. Interference vlnění



TO 1.8.-30. b)

TO 1.8.-31. a)

TO 1.8.-32. b)

TO 1.8.-33. b)

TO 1.8.-34. b)

TO 1.8.-35. a)

TO 1.8.-36. a)

TO 1.8.-37. c)



KO 1.8.-13. Skládání koherentních vln.

KO 1.8.-14. Frekvence, perioda, vlnová délka a fázová rychlost je stejná.

KO 1.8.-15. Viz text.

KO 1.8.-16. $d = 2k \frac{\lambda}{2}$

KO 1.8.-17. $d = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$

KO 1.8.-18. V případě dvou koherentních vln stejné amplitudy, které postupují proti sobě.

KO 1.8.-19. Mění se v závislosti na poloze bodu.

KO 1.8.-20. Bod s maximálním rozkmitem a kmitovou energií.

KO 1.8.-21. Bod s nulovým rozkmitem a nulovou kmitovou energií.

KO 1.8.-22. Množina bodů, které kmitají se stejnou fází.

KO 1.8.-23. Viz text.

KO 1.8.-24. Viz text.

KO 1.8.-25. Viz text.

KO 1.8.-26. Viz text.

KO 1.8.-27. Postup vlnění za překážku.

1.8.3. Akustické vlnění



KO 1.8.-28. Podélné vlnění

KO 1.8.-29. Na infrazvuk, zvuk ultrazvuk

KO 1.8.-30. Viz text

KO 1.8.-31. Akustický odpor, viz text.

KO 1.8.-32. Podle funkce sinus, viz text.

KO 1.8.-33. Viz text.

KO 1.8.-34. Viz text.



U 1.8.-1 20 m

U 1.8.-2. 1 m

U 1.8.-3. 12,08 m

U 1.8.-4. 0,34 m

U 1.8.-5. 0,038 m

U 1.8.-6. $9,8 \cdot 10^9$ Pa

U 1.8.-7. $23,8 \cdot 10^3$ Hz

U 1.8.-8. $8,26 \cdot 10^{-10}$ Pa⁻¹

U 1.8.-9. 1,23 W

U 1.8.-10. $1,18 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $3,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

U 1.8.-11. 3,16

U 1.8.-12. $20 \lg 2 = 6,02 \text{ dB}$