

Akustika

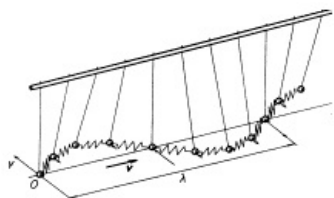
Tento článek slouží rovněž jako rozcestník vedoucí k článkům, které se zabývají tématy týkající se akustiky. Jedná se o články:

- Vlastnosti zvuku
- Šíření akustického vlnění
- Hlasitost
- Výška tónu
- Barva tónu
- Práh sluchu a sluchové pole
- Ultrazvuk v různých prostředích a tkáních

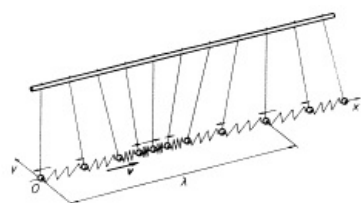
Akustika je obor fyziky, který se zabývá studiem zvuku. Zvukem rozumíme **uspořádaný kmitavý pohyb částic** prostředí, kterým se zvuk šíří – např. molekul plynu, kapaliny nebo atomů pevné látky. Zvuk můžeme také popsat jako **mechanické podélné vlnění**. Na rozdíl od elektromagnetického vlnění se mechanické vlnění nemůže šířit vakuem. Pouze v pevném skupenství se může zvuk šířit i jako vlnění příčné (molekuly prostředí mají výchylky od střední polohy kolmo ke směru šíření vlny).

Fyzikální akustika

Příčné vlnění – jednotlivé body kmitají kolmo na směr šíření dané vlny



Podélné vlnění – všechny body kmitají ve směru šíření vlny



Rozlišení zvuků o různé frekvenci

1. **Slyšitelný zvuk** – ve frekvenčním rozsahu lidského ucha 16 – 20 000 Hz
2. **Infrazvuk** – frekvence nižší než 16 Hz
3. **Ultrazvuk** – frekvence vyšší než 20 000 Hz

Vznik zvuku

Kmitání částic zdroje zvuku se přenáší na okolní částice, které se též rozkmitají. Proces přenosu kmitání se určitou rychlostí šíří dál daným prostředím a vzniká **postupná vlna**. Při kmitání prostředí dochází ke změnám vzdáleností mezi částicemi, tedy ke střídavému zhušťování a zředování. Tím dochází i k malým tlakovým změnám, které se projeví jako drobné deformace prostředí.

Základní veličiny popisu šíření zvukové vlny

- **Frekvence kmitavého pohybu f [Hz]** – udává počet kmitů za sekundu, její převrácenou hodnotou je perioda T [s] – trvání jednoho kmitu
- **Rychlost šíření c [m/s]**
- **Vlnová délka λ** – dráha, kterou proběhne vlnění za dobu jedné periody

Rychlost šíření zvukové vlny

Rychlost závisí na druhu prostředí a také na okamžitých podmínkách, jako je teplota, tlak, u vzduchu vlhkost.

Rychlost zvuku v suchém vzduchu při normálním tlaku 101,3 kPa roste se zvyšující se teplotou přibližně lineárně: $c = 331,5 + 0,61t$

Rychlost zvuku ve vzduchu nepatrně roste i se stoupající vlhkostí vzduchu. Při 100% vlhkosti vzduchu je rychlost asi o 0,2 % vyšší než u suchého vzduchu téže teploty.

Prostředí	rychlost zvuku (m/s)
vzduch 0 °C	332
vzduch 20 °C	344
vodík	1 270
voda 13 °C	1 441
voda 20 °C	1 484
beton	1 700
led 0 °C	3 200
guma	1 440
dřevo	4 000
ocel	5 000

Akustická výchylka a

Akustickou výchylkou rozumíme vychýlení objemového elementu prostředí ze střední polohy při vlnění. Např. harmonické kmitání je takové, které lze popsat sinusoidou.

$$a = a_{max} \cdot \sin(\omega t) = a_{max} \cdot \sin(2\pi f t)$$

a_{max} je amplituda kmitavého pohybu a f je frekvence, veličinu $\omega = 2\pi f$ nazýváme úhlovou frekvencí.

Akustická rychlost v - okamžitá rychlost

$$v = v_{max} \cdot \cos(\omega t) = v_{max} \cdot \cos(2\pi f t)$$

v_{max} je maximální hodnota okamžité rychlosti.

Akustická rychlost nabývá kladných i záporných hodnot v intervalu $\langle -v_{max}; v_{max} \rangle$.

Rychlost je oproti výchylce posunuta o čtvrt periody, tedy ve fázi o $\pi/2$. Při maximální výchylce má kmitající bod nulovou rychlost, při nulové výchylce při průchodu rovnovážnou polohou má naopak rychlost maximální.

Akustickou rychlost kmitavého pohybu v nesmíme zaměňovat s rychlostí šíření zvukové vlny c v daném prostředí. Akustická rychlost je rychlost kmitavého pohybu částic prostředí kolem rovnovážné polohy.

Akustický tlak p

Kmitají-li v důsledku šíření zvukové vlny molekuly daného prostředí, např. molekuly vzduchu nebo vody, pak v místě své polohy vyvolávají malé tlakové změny, které nazýváme akustickým tlakem. Celkový tlak v daném místě je dán součtem klidového a akustického tlaku. Akustický tlak je ve fázi s akustickou rychlostí.

Maximální hodnota akustické tlakové změny je dána vztahem: $p_{max} = \rho \cdot c \cdot v_{max}$

ρ je hustota prostředí. Velikost akustického tlaku tedy závisí mimo jiné na hustotě prostředí a na akustické rychlosti.

Efektivní akustická rychlost a efektivní akustický tlak

Pro některé výpočty nepotřebujeme znát okamžité hodnoty akustické rychlosti a akustického tlaku a můžeme je nahradit efektivními hodnotami, podobně jako užíváme efektivní hodnoty elektrického střídavého napětí a proudu, je-li jejich průběh harmonický.

$$v_{ef} = \frac{v_{max}}{\sqrt{2}} \doteq 0,707 \cdot v_{max}$$

$$p_{ef} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}} \doteq 0,707 \cdot p_{max}$$

Tyto hodnoty platí ovšem pouze pro harmonický (sinusový) průběh, pokud je tvar neharmonický, a to je v případě fyziologické akustiky prakticky vždy, nelze tyto vztahy použít a je třeba vycházet z definice střední hodnoty pro periodický signál s periodou T . Např. pro akustický tlak platí:

$$p_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

V případě rovinné akustické vlny jsou akustický tlak a akustická rychlost provázány následujícím vztahem:

$$p_{ef} = \rho c v_{ef}$$

Akustická impedance Z - akustický vlnový odpor

Pro každé prostředí je to charakteristická veličina a ovlivňuje velikost odrazu akustické energie při dopadu zvukové vlny na rozhraní prostředí o různých akustických impedancích. Tím je tato veličina významná pro ultrazvukové vyšetřovací metody.

Při průchodu prostředím se může část energie zvukové vlny absorbovat (např. přeměnit v teplo), což se projeví zmenšením amplitudy a okamžité akustické rychlosti. Rychlost šíření vlny však zůstává v daném prostředí stejná, stejně jako frekvence.

Při průchodu vlny přes rozhraní různých prostředí se zachovává frekvence, ale podle prostředí se mění rychlost šíření vlny c a tudíž i vlnová délka λ . Na rozhraní dvou prostředí se může část energie zvukové vlny odrazit (ozvěna), na překážkách dochází i k ohybu vlnění. Tyto jevy můžeme vysvětlit na základě Huygensova principu, který platí v akustice podobně jako v optice. Odrazy i ohyb vlnění jsou rozhodující jevy, které vytvářejí obraz při vyšetřování ultrazvukem.

Akustická impedance je pro rovinnou zvukovou vlnu určena poměrem mezi efektivním akustickým tlakem a efektivní akustickou rychlostí v daném prostředí. Můžeme mluvit o analogii s Ohmovým zákonem, považujeme-li akustický tlak za veličinu obdobnou napětí a akustickou rychlost za obdobu proudu.

$$Z = \frac{p_{ef}}{v_{ef}} = \rho c$$

Jednotkou akustické impedance je $Pa \cdot s \cdot m^{-1}$, rozměr v SI $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

Akustická impedance vzduchu je $0,44 kPa \cdot s \cdot m^{-1}$, vody $1,48 MPa \cdot s \cdot m^{-1}$. Měkké tkáně (s výjimkou plic) mají vzhledem k vysokému obsahu vody akustickou impedanci kolem $1,5 MPa \cdot s \cdot m^{-1}$.

Intenzita zvuku /

Ze zdroje zvuku o určitém akustickém výkonu P se zvuková energie šíří prostředím do okolí. Intenzita zvuku je energie zvukového vlnění, která projde za dobu 1s plochou $1m^2$ orientovanou kolmo na směr šíření zvuku.

$$I = \frac{P}{S}$$

P je výkon zvukového vlnění, S je obsah plochy, kterou vlnění prochází. Jednotkou je tedy $W \cdot m^{-2}$.

Pro rovinnou zvukovou vlnu platí vztah:

$$I = v_{ef} p_{ef}$$

Prahová (nejnižší) intenzita zvuku o frekvenci $1 kHz$ je taková intenzita, kterou zdravé lidské ucho již slyší. Její hodnota je $I_0 = 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ a nazýváme ji **referenční intenzitou zvuku** pro lidské ucho. Odpovídá jí ve vzduchu efektivní akustický tlak $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$, který pokládáme též za referenční hodnotu.

Intenzita ubývá s druhou mocninou vzdálenosti od centra šíření sférické vlny, protože vlnoplocha zvětšuje svůj povrch (koule) s druhou mocninou poloměru a akustický výkon musí být zachován. Z toho plyne, že akustická rychlost i akustický tlak u sférické vlny s rostoucí vzdáleností od centra lineárně klesají.

Vzduch X voda

Akustická impedance Z se při přechodu ze vzduchu do vody zvětší přibližně 3600x.

Při stejné intenzitě I je akustický tlak ve vodě přibližně 60x vyšší než ve vzduchu, zatímco akustická rychlost i výchylka 60x menší. Tedy i akustický tlak odpovídající prahu slyšitelnosti je ve vodě asi 60x vyšší než ve vzduchu.

Při přestupu z jednoho prostředí do druhého se mění akustická intenzita. Na rozhraní prostředí totiž zpravidla dochází např. k částečnému odrazu, takže se pouze část akustického výkonu dostane z jednoho prostředí do druhého.

Hladina intenzity zvuku L

Nejtišší zvuk, který můžeme slyšet při frekvenci $1 kHz$, má intenzitu asi $10^{-12} W \cdot m^{-2}$. Naopak nejsilnější zvuky, které již mohou způsobit bolest, mají intenzitu řádově $1 W \cdot m^{-2}$. Mezi nejsilnějším a nejsilnějším zvukem je tedy v intenzitě rozdíl dvanácti řádů – poměr intenzit je 1 bilión. Zavádí se proto hladina intenzity zvuku v relativních jednotkách, v belech (B) nebo decibelech (dB). Jsou to jakoby jednotky rozdílu, 1 B odpovídá poměru intenzit zvuku 1:10. Zvýšení hladiny intenzity zvuku o 1dB znamená zvýšení intenzity zvuku asi o 26 %, což je právě nejmenší rozdíl, který zdravé ucho ještě postřehne.

Intenzitám zvuku I registrovaným lidským sluchovým orgánem v rozmezí $10^{-12} W \cdot m^{-2}$ až $10 W \cdot m^{-2}$ přiřazujeme hladiny intenzity zvuku L v rozmezí $0-130 dB$.

Hladina intenzity v belech je určena dekadickým logaritmem poměru intenzity, jejíž hladinu určujeme, k určité intenzitě I_0 , kterou bereme za základ (nulovou hladinu).

$$L = \log \frac{I}{I_0} \quad [B]$$

resp.

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad [dB]$$

Hladinu intenzity můžeme ekvivalentně vyjádřit i pomocí akustického tlaku a jeho prahové hodnoty p_0 :

$$L = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} \quad [dB]$$

Hudební akustika

Hudební akustika se zabývá zvuky a jejich kombinacemi se zřetelem na potřeby hudby.

Tón

Za tón považujeme zvuk se stálou frekvencí. Mezi základní charakteristiky tónu patří:

- výška tónu (dána frekvencí),
- hlasitost (výška amplitudy),
- doba trvání,
- barva tónu (spektrální složení zvuku).

Dvojzvuk

Dvojzvukem v hudbě nazýváme současné znění dvou hudebních tónů. Dvojzvuky můžeme vnímat jako nepříjemné (*disonantní*) nebo příjemné, uchu lahodící (*konsonantní*). Libozvučností dvou tónů se zabýval již v 6. století před Kristem **Pythagoras** svými pokusy se strunami a okolo roku 300 před Kristem **Euklides**. Euklides tvrdil, že dva konsonantní tóny mají schopnost spojování se v jeden celek, proto je vnímáme jako libozvučné, zatímco disonantní tóny tuto vlastnost nemají.^[1]

Dva tóny považujeme za konsonantní v případě, že jejich frekvence jsou v poměru celých a malých čísel, která nejsou větší než 6. Například dva tóny, jejichž frekvence jsou v poměru 4 : 3, se změní ve vlnění, jehož perioda se rovná trojnásobku periody tónu hlubšího a současně čtyřnásobku periody tónu vyššího, což je důvodem jejich souzvučnosti.^[2]

Interval

Interval je výšková vzdálenost dvou tónů. Stejně intervaly mají vždy stejný poměr frekvencí tónů, které daný interval tvoří. Stejně jsou tak například intervaly mezi tóny o frekvencích 24 a 27 Hz a mezi tóny o frekvencích 32 a 36 Hz, protože poměr frekvencí je v obou případech 9 : 8 (secunda).^[3]

Interval	Poměr frekvencí
prima	1
secunda	9 : 8
tercie	81 : 64
kvarta	4 : 3
kvinta	3 : 2
sexta	27 : 16
septima	243 : 128
oktáva	2 : 1

Ladění

Čisté ladění využívá pouze tóny, jejichž frekvence jsou ve vzájemných poměrech vyjádřitelných celými čísly. Důsledné uplatnění čistého ladění by vedlo k nekonečně velkému počtu tónů v oktávě. Při použití omezeného počtu tónů se objevují „nečisté“, nelibozvučné intervaly. Přesné frekvence jednotlivých tónů se navíc v různých stupnicích u čistých ladění liší, (nota A v C dur nemá stejnou frekvenci jako nota A v D dur), což znemožňuje použití při modulaci nebo užití enharmonické záměny. Proto bylo zavedeno **temperované ladění**. Při tomto ladění se oktáva dělí na 12 stejných intervalů určených poměrem frekvencí $2^{1/12}$, které představují temperovaný půltón, zatím co čistý půltón je určen poměrem frekvencí 16 : 15.

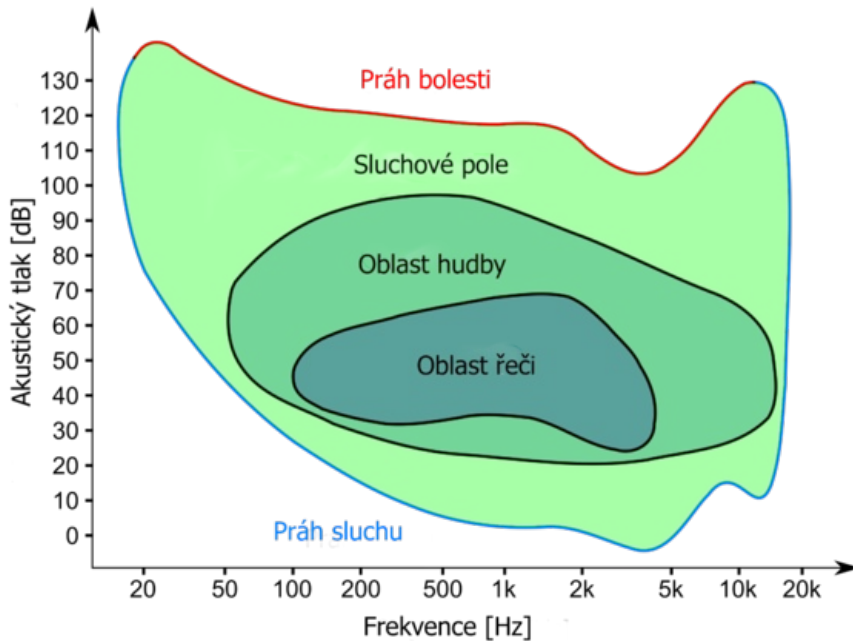
Fyziologická akustika

Fyziologická akustika se zabývá vznikem zvuku v hlasivkách člověka a jeho vnímáním v uchu.

Lidský hlas vzniká v hlasivkách. Jde o dvě pružné blány, které se při mluvě napínají a mezi nimi vzniká hlasová štěrbina. Proudem vzduchu z plic se hlasivky rozkmitají, čímž vzniká zvukové vlnění.

Výška hlasu závisí na délce hlasivek a jejich napínání, které se působením příslušného svalstva může měnit. Výškový rozsah lidského hlasu se rovná asi dvěma oktávám, jejich poloha je však individuální. Zabarvení lidského hlasu vzniká rezonancí hrtanové, ústní a nosní dutiny.

Sluchový orgán se skládá ze tří částí – zevní, střední a vnitřní ucho. Zevní ucho slouží k zachycování zvukových signálů z okolí, střední ucho k převodu do vnitřního ucha. Ve vnitřním uchu jsou drážděny sluchové buňky a vznikají akční potenciály vedené dále do mozku. Sluchové pole člověka je ohraničeno křivkami nazývanými práh bolesti (pro frekvenci 1 kHz hodnota hladiny intenzity zvuku 120 dB) a práh sluchu (při frekvenci 1 kHz hodnota 0 dB).



Podrobněji se tématem zabývá článek Biofyzika sluchu.

Mezi klinické obory využívající akustiku patří **otorhinolaryngologie** a **foniatrie**.^[4] Využitím ultrazvuku v lékařství se zabývá článek Ultrazvuk v různých prostředích a tkáních.

Odkazy

Související články

- Vlastnosti zvuku
- Šíření akustického vlnění
- Hlasitost
- Výška tónu
- Barva tónu
- Práh sluchu a sluchové pole
- Ultrazvuk v různých prostředích a tkáních

Zdroje

- Steiner, D. Akustika. Seminární práce, Gymnázium Budějovická, 1999.
- Navrátil, L., Rozina, J.; et al., Eds. Lékařská biofyzika, 1.st ed.; MANUS: Liberec, 2000.
- Návody pro praktická cvičení z biofyziky.; Univerzita Karlova v Praze, 2. lékařská fakulta, 2013; Chapter Audiometrie, p 2.
- Ladění. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lad%C4%9Bn%C3%AD> (accessed Nov 28, 2013).
- <http://akustika.ic.cz/htmls/vlneni.html>

Reference

-
-
-
- NAVRÁTIL, Leoš a JOZEF ROSINA. *Lékařská biofyzika*. 1. vydání. Praha : Manus, 2000. Kapitola 6.6

Klinické obory využívající akustiku. s. 197. ISBN 80-902318-5-3.

Doporučená literatura

