4. Akustika

4.1 Úvod

Fyzikálními ději, které probíhají při vzniku, šíření či vnímání zvuku, se zabývá akustika. Lidské ucho je schopné vnímat zvuky o frekvenčním rozsahu 16 Hz až 16 kHz. Mechanické vlnění s většími frekvencemi nazýváme **ultrazvuk** a s menšími **infrazvuk**. V předchozí kapitole jsme již mluvili o příčném i podélném mechanickém vlnění. Zvuk se může šířit vždy jako podélné vlnění a v pevných látkách i jako příčné.

4.2 Rychlost zvuku

Podobně jako v předchozí kapitole Mechanické vlnění, můžeme zvuk popsat pojmy **bodový zdroj**, **vlnoplocha** a **paprsek**. Bodovým zdrojem rozumíme zdroj zvuku o zanedbatelných rozměrech, od kterého se zvuk šíří do všech směrů rovnoměrně (má izotropní charakter). Pro vlnoplochu platí, že na ní mají všechny částice vzduchu (plynu,...) stejnou výchylku i rychlost a tedy i fázi. Paprsky jsou pak čáry kolmé na vlnoplochy a ukazují směr jejich šíření.

Rychlost zvuku v pevných látkách (pro příčné vlnění) závisí na elastických vlastnostech, hustotě:

$$v=\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad , \tag{4.1}$$

kde τ je napětí a ρ je hustota.

Jak ale bude rovnice 4.1 vypadat pro šíření zvuku v plynu (pouze podélné vlnění)? V pevných látkách se periodicky mění výchylka každého bodu, avšak v plynu si můžeme výchylku nahradit lokální změnou tlaku:

$$\Delta p=-K\frac{\Delta V}{V} \quad , \tag{4.2}$$

kde $\Delta V/V$ je relativní změna objemu způsobená změnou tlaku a K je v podstatě modul objemové pružnosti určitého plynu. Jinak řečeno, můžeme si šíření vlny představit jako periodické zhuštění a zředění plynu. Rovnice 4.1 pak může být pro plyn vyjádřena jako

$$v=\sqrt{\frac{K}{\rho}}=\sqrt{-\frac{\Delta p}{\Delta V/V}} \quad . \tag{4.3}$$

Záporné znaménko v rovnici vyjadřuje fakt, že zvětší-li se tlak, pak logicky musí dojít ke stlačení plynu a rozdíl objemů je záporný. Takže rozdíl tlaků má vždy opačné znaménko než rozdíl objemů, a proto samozřejmě nemůže být rychlost záporná.

Rychlost zvuku také závisí na teplotě prostředí. Například pro zvuk šířící se ve vzduchu platí.

$$v=(331\,m.s^{-1})\sqrt{1+T_C/273\,°C}\quad , \tag{4.4}$$

kde T_C je je teplota vzduchu ve stupních Celsia.

Uveďme si ještě hodnoty rychlosti zvuku (podélné vlny) pro některé látky: vodík (0°C) -1286 $m.s^{-1}$, helium (0°C) -972 $m.s^{-1}$, kyslík (0°C) -317 $m.s^{-1}$, glycerol (25°C) -1904 $m.s^{-1}$, mořská voda (25°C) -1533 $m.s^{-1}$, voda (25°C) -1493 $m.s^{-1}$, rtuť (25°C) -1450 $m.s^{-1}$, železo - 5950 $m.s^{-1}$, hliník - 6420 $m.s^{-1}$, měď - 5010 $m.s^{-1}$, zlato - 3240 $m.s^{-1}$.

4.3 Zázněje

O záznějích jsme již hovořili v předchozích kapitolách. Protože je zvuk mechanickým vlněním, platí pro zázněje stejná pravidla.

4.4 Hlasitost a frekvenční rozsah zvuku

Další veličinou, kterou můžeme popisovat zvuk, je jeho **intenzita** *I*. Ta je dána jako energie vlnění za jednotku času, která projde jednotkovou plochou kolmou na směr šíření zvuku. Jinak je intenzita přímoúměrná výkonu zdroje a nepřímoúměrná ploše, která má tvar kulové plochy mající střed v místě bodového zdroje, tedy:

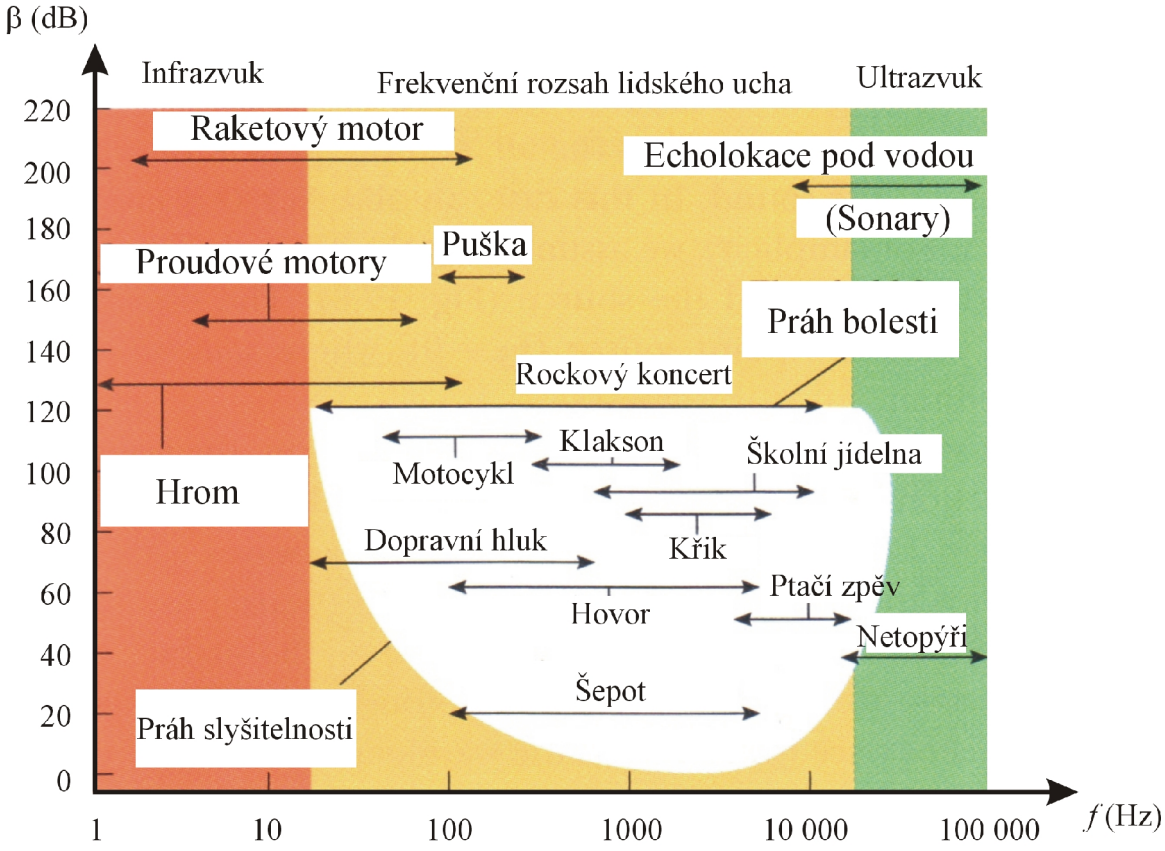
$$I=\frac{P}{S}\quad . \tag{4.5}$$

Intenzitě zvuku odpovídá pojem **hlasitost**. Vlastností lidského ucha je, že zvukový vjem vzniká pouze tehdy, dosáhne-li intenzita určité hodnoty, kde se ještě navíc projevuje i závislost na frekvenci. Minimální hodnota intenzity určuje tzv. **práh slyšitelnosti**, který úzce souvisí s pojmem **hlasitosti zvuku**. Lidé jsou schopni vnímat poměrně široký rozsah intenzit (10^{-12} $W.m^{-2}$ - 10 $W.m^{-2}$). Přenáší-li zvuková vlna větší energie než 10$W.m^{-2}$, pak člověk vnímá zvuk jako bolestivý pocit. Tato hodnota zase určuje tzv. **práh bolestivosti**. Jak vidíme, je rozsah intenzit opravdu značný proto popisujeme energetické vlastnosti zvuku pomocí logaritmické veličiny, **hladiny intenzity**:

$$\beta=10\log\frac{I}{I_0}\quad , \tag{4.6}$$

kde I je konkrétní hodnota intenzity vnímaného zvuku, I_0 je práh slyšitelnosti a hladinu hlasitosti udáváme v jednotkách **decibel** (dB). Pro názornou představu o jednotce decibel uveďme několik hodnot: šepot - 10 dB, klidná a tichá ulice - 30 dB, průměrný hluk v bytě - 40 dB, motor jedoucího automobilu - 50 dB, hlasitý hovor - 70 dB, hlučná ulice - 90 dB, rockový koncert až 110-120 dB, letadlo s proudovými motory - 130 dB. Kolem 130 dB se udává i práh bolesti.

Obrázek 4.4.1 udává pak frekvenční rozsah zvuku a zároveň závislost hladiny intenzity na frekvenci.



Obrázek 4.4.1: Rozsah hladin intenzity a frekvenční rozsahy různých zdrojů zvuku. Bílé pole zobrazuje oblast vnímání lidského ucha. (převzato a upraveno z R. A. Serway, J. W. Jewet: Physics for Scientists and Engineers, ISBN: 0-534-40843-5)

4.5 Dopplerův jev

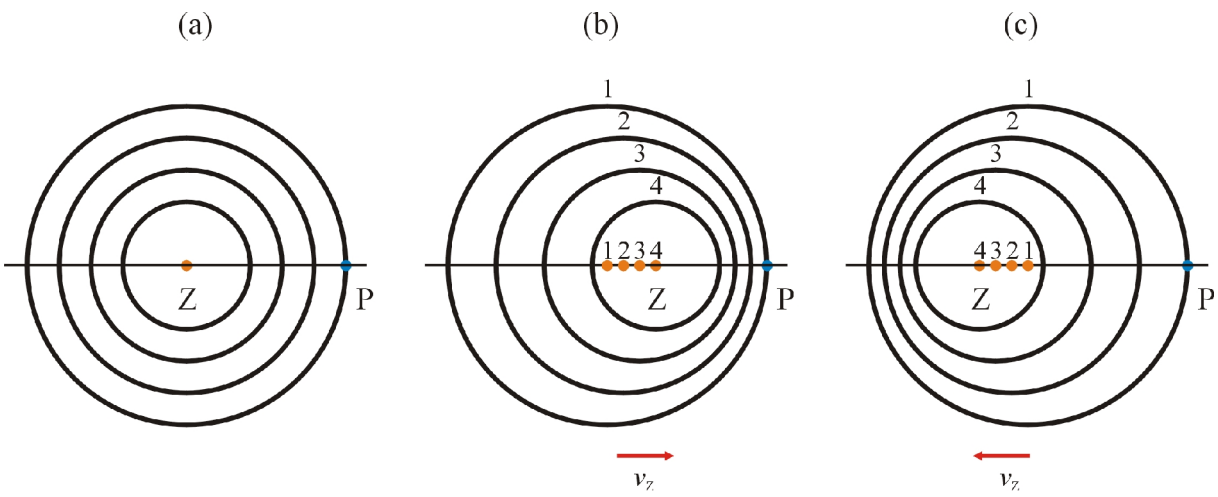
Jistě jste si někdy všimli skutečnosti, kdy při průjezdu například houkající sanitky kolem Vás klesla frekvence houkačky. Tento jev vysvětlil v roce 1843 rakouský fyzik *Christian Andreas Doppler* (1803-1853). Dopplerův jev vysvětluje a popisuje změny detekovaných frekvencí vůči pohybujícímu se zdroji zvuku. Stejný jev samozřejmě nastává i případě kdy zdroj je v

klidu a pohybuje se detektor či pozorovatel nebo v případě, kdy se pohybují oba, zdroj i detektor. Obrázek 4.5.1 názorně ilustruje Dopplerův jev, který můžeme vyjádřit obecnou rovnicí například pro posun frekvencí:

$$f' = f\frac{c \pm v_D}{c \mp v_Z} \quad , \tag{4.7}$$

kde f' je přijatá frekvence detektorem, f je původní frekvence, c je rychlost vlnění, v_D je rychlost detektoru nebo pozorovatele, v_Z je rychlost zdroje, horní znaménka + v čitateli a - ve jmenovateli, vyjadřují fakt kdy se detektor nebo zdroj k sobě přibližují a dolní znaménka vyjadřují opačnou situaci.

Počet vlnoploch, které směřují k detektoru, zůstává vždy stejný a ve chvíli, kdy se zdroj začne pohybovat směrem k detektoru, vzdálenost se zmenšuje a vlnoplochy se na menší vzdálenosti od detektoru musí "nahustit". Situace je stejná, i když se pohybuje pouze detektor ke zdroji, nebo oba navzájem směrem k sobě. Naopak to musí vypadat, jestliže se zdroj nebo detektor od sebe vzdalují.



Obrázek 4.5.1: Ukázka Dopplerova jevu: (a) zdroj je v klidu, (b) zdroj se pohybuje směrem k detektoru (počet vlnoploch musí zůstat stejný), (c) zdroj se pohybuje opačným směrem než vlnění.

Dopplerův jev, aniž by o tom věděl, používá k echolokaci i netopýr. K Dopplerovu jevu dochází i u elektromagnetického vlnění, kde se dá využít například k měření rychlostí automobilů pomocí radaru. V astronomii je využíván k měření rychlosti vesmírných objektů nebo jím lze vysvětlit rozpínání vesmíru (červený posuv).

4.6 Ultrazvuk a jeho použití

Zvuk o frekvencích větších než 20 kHz není slyšitelný lidským uchem a řadíme jej do oblasti ultrazvuku. Délky ultrazvukových vln jsou poměrně malé a při průchodu vzduchem či plynem jsou daleko více absorbovány (pohlcovány), než zvuk slyšitelných frekvencí. Čím kratší je

vlnová délka (vyšší frekvence), tím je větší pohltivost. V kapalinách a pevných látkách je pohltivost podstatně menší. Tabulka 4.1 uvádí tloušťky prostředí, ve kterých se zvuk dané frekvence zeslabí na poloviční hodnotu intenzity.

Tabulka 4.1

Prostředí	$f = 100$ kHz	$f = 500$ kHz	$f = 1000$ kHz
vzduch	$x = 2{,}6$m	$x = 0{,}1$m	$x = 0{,}026$m
voda	$x = 1400$m	$x = 56$m	$x = 14$m
hliník	$x = 58$m	$x = 2{,}3$m	$x = 0{,}58$m

Ultrazvuk má bohaté využití v praxi. Je využíván při lokalizaci překážek a jejich vzdáleností pod vodou, při měření hloubek moří, při nedestruktivním zkoušení materiálů, při hledání dutin a kazů. V kapalinách se vlivem ultrazvuku tvoří drobné dutiny, tzv. kavitace, které mohou porušit povrch kovových předmětů ponořených do kapaliny. Ultrazvukem lze téměř dokonale rozptýlit drobné částice nějaké látky v kapalině, lze jej využít při tvorbě disperzních soustav a koloidních roztoků. Naopak můžeme ultrazvuk použít i ke srážení suspendovaných částic v plynech, nebo-li k tzv. koagulaci drobných částic. Při pájení hliníku a hliníkových slitin se ultrazvuk používá k odstranění povrchové vrstvy oxidu hliníku, která samotnému pájení zabraňuje. K vrtání skla, keramiky a tvrdých kovů se také používá ultrazvuk, kdy obráběcí nástroj se podélně rozkmitá s frekvencí kolem 25 kHz, což umožní vrtat otvory libovolných tvarů. V neposlední řadě se ultrazvuk hojně používá v lékařské diagnostice. Například klasická sonografie plodu je založena na principu různé pohltivosti plodové vody a v tkáních plodu.