

Část I.

AKUSTIKA

Sekce 2.

Zvuk a jeho vnímání

A.D. Pajdarová (ZČU)
KFY/FYSV (23/24)

Základní vlastnosti zvuku

Zvuk

~ mechanické kmitání a jím buzené mechanické vlnění, které je lidský sluchový orgán schopen přijímat a mozek zpracovat ve sluchový vjem.

- Nejdůležitější je frekvenční pásmo od 0,5 do 5 kHz, protože v něm má sluchový orgán rezonanci, a tím i nejvyšší citlivost. Meze slyšitelnosti jsou nad 20 Hz a pod 16 kHz.
- Vlnění s frekvencí nižší než 20 Hz se nazývá *infrazvuk* a vlnění s frekvencí vyšší než 20 kHz je *ultrazvuk*.

Otologicky normální osoba

~ myšlená osoba, jejíž sluchový orgán má vlastnosti stanovené konvencí podle statisticky zjištěného průměru u zdravých lidí mezi 18 a 25 roky věku.

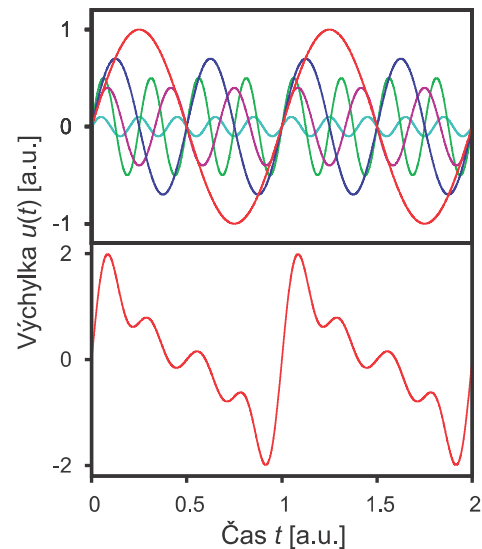
Základní vlastnosti zvuku

Tóny

~ zvuky, které mají periodický či kvaziperiodický charakter.

- Hudební nástroje, ale i lidský hlas nemají jednoduchý harmonický průběh, ale mívají vesměs mnohem složitější periodický průběh.
- Periodické zvuky lze rozvést do tvaru Fourierovy řady a získat tak tzv. **frekvenční spektrum**. Toto spektrum obsahuje **základní frekvenci** f_1 , jež mívá nejvyšší amplitudu výchylek, a řadu tzv. **vyšších harmonických** složek s amplitudami obvykle podstatně menšími, než má základní frekvence. Takové spektrum nazýváme **diskrétní frekvenční spektrum**.
- Na základě vybuzených harmonických složek určujeme **barvu tónu**. **Výška tónu** je pak základní frekvence f_1 ve spektru tónu. Lidský sluch však hodnotí výšku tónů podle poměru jejich frekvencí, nikoliv podle jejich přesné frekvence či rozdílu frekvencí. Výška tónu je proto i subjektivní charakteristikou sluchového vjemu.

Základní vlastnosti zvuku



Obrázek I.2.1: Obrázek ukazuje časový vývoj výchylky $u(x, t)$ v daném bodě x , kterým prostupuje 5 harmonických vln $1 \sin \varphi$, $0,7 \sin 2\varphi$, $0,4 \sin 3\varphi$, $0,5 \sin 4\varphi$ a $0,1 \sin 5\varphi$, kde $\varphi = \omega(t - x/c)$. Jednotlivé harmonické kmity odpovídající vlnám jsou zobrazeny na obrázku nahoře a výsledné kmitání na obrázku dole. Perioda (a tím i frekvence) výsledného kmitání odpovídá periodě kmitů vlny s nejnižší frekvencí $f_1 = \omega/2\pi$.

Základní vlastnosti zvuku



Obrázek I.2.2: Amplitudové spektrum výsledného kmitání z obr. I.2.1. Spektrum obsahuje pouze amplitudy kmitů s násobky základní kruhové frekvence (je diskrétní), tj. $\omega_k = k\omega$. Podobně se zakresluje i diskrétní spektrum fázové, ale zde pro jednotlivé fázové posuny platí $\varphi_{0k} = 0$.

Tóny v hudbě

- V hudbě k relativnímu popisu výšky tónu používáme pojem **tónový interval**, který je dán poměrem základních frekvencí tónů. Základním intervalem je **oktáva**, kterou tvoří tóny s poměrem frekvencí $2/1$.
- **Konsonantní tóny** mají poměr frekvencí (přibližně) v poměru malých celých čísel a jejich souzvuk nám přijde příjemný. Např. $3/2$ (kvinta), $4/3$ (kvarta), $5/4$ (tercie), $5/3$ (sexta) atd. Opakem jsou **disonantní tóny**, jejichž souzvuk nám přijde nepříjemný.

Základní vlastnosti zvuku

Šum

- ~ obecně neperiodické zvuky obsahující nejrůznější frekvence.
- Jelikož šumy obsahují různé frekvence, mají ve sledovaném rozsahu frekvencí **spojitá frekvenční spektra**. Vedle spojité části spektra mohou nad jeho úroveň vystupovat jisté diskrétní frekvence, které představují tóny, které v šumu vynikají nad jeho spojitou částí. Hovoříme pak o **smíšeném frekvenčním spektru**.

Hluk

- ~ všechny zvuky, ať se jedná o tóny nebo šumy, které jsou v daných podmínkách nežádoucí, rušivé nebo dokonce škodlivé.

Vnímání zvuku

Zvukový vjem

- Zvukový vjem je zprostředkován sluchovým ústrojím člověka a nelze jej kvalitativně přímo hodnotit žádnou z dosud odvozených fyzikálních veličin.
- Zkoumáním otologicky normální osoby byly zjištěny vlastnosti zvukového vjemu na některých fyzikálních veličinách, především na akustické intenzitě a frekvenci zvuku.
- Základní poznatek: člověk vnímá zvuk od *meze slyšitelnosti* až po *práh bolestivosti*.

Referenční tón

- ~ sinový tón o frekvenci 1 kHz. Zvolen za mezinárodní standard.
- Pro referenční tón je práh slyšitelnosti roven ak. intenzitě $10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ a práh bolestivosti 10 W m^{-2} , tj. rozsah 13 řádů.

Vnímání zvuku

Weber-Fechnerův zákon

- Ze zkoumání otologicky normální osoby: *Změna fyziologického vjemu je úměrná relativní změně jeho fyzikální příčiny*. Matematicky:

$$dV = k \frac{dP}{P}, \quad (\text{I.2.1})$$

kde V je míra vjemu, P je míra fyzikální příčiny a k je konstanta úměrnosti.

- Řešením je rovnice:

$$V = k' \log \frac{P}{P_0}, \quad (\text{I.2.2})$$

kde P_0 je fyzikální příčina na úrovni meze slyšitelnosti a k' je obecně jiná konstanta úměrnosti. Odsud: *Míra fyziologického vjemu je úměrná logaritmu míry jeho fyzikální příčiny*.

- Podobné zákony platí i pro jiné druhy vjemů.

Vnímání zvuku

Akustické hladiny

- Dle (I.2.2) zavádíme pro popis míry vjemu hladiny:

Hladina akustické intenzity:

$$L_I = 10 \log \frac{I_a}{I_{ar}}, \quad I_{ar} = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}, \quad [L_I] = \text{dB}(\text{decibel}) \quad (\text{I.2.3})$$

Hladina akustického tlaku:

$$L_p = 20 \log \frac{p_a}{p_{ar}}, \quad p_{ar} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}, \quad [L_p] = \text{dB}(\text{decibel}) \quad (\text{I.2.4})$$

Hladina akustického výkonu:

$$L_P = 10 \log \frac{P_a}{P_{ar}}, \quad I_{ar} = 10^{-12} \text{ W}, \quad [L_P] = \text{dB}(\text{decibel}) \quad (\text{I.2.5})$$

Hlasitost zvuku

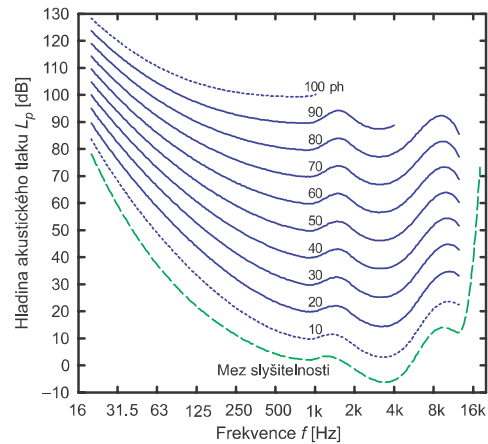
Hladina hlasitosti

- Výrazy pro L_I , L_p a L_P (I.2.3–I.2.5) platí jen pro referenční tón. Tóny jiných frekvencí jsou při stejné ak. intenzitě vnímány jako zvuky odlišných hlasitostí.
- Na základě shody míry vjemu s hladinou ak. tlaku pro referenční tón byla stanovena soustava křivek stejných hladin hlasitosti i pro sinové tóny jiných frekvencí. Tím byla zavedena veličina **hladina hlasitosti** L_N .
- Matematicky:

$$L_N = a(f) + b(f) L_p + c(f) L_p^2, \quad [L_N] = \text{ph}(\text{fn}) \quad (\text{I.2.6})$$

kde a , b a c jsou funkce frekvence f definované v normě.

Hlasitost zvuku



Obrázek I.2.3: Křivky hladin stejné hlasitosti. Adaptováno z Y. Suzuki et al: *Precise and Full-range Determination of Two-dimensional Equal Loudness Contours*, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Japan (2003).

Hlasitost zvuku

Subjektivní hlasitost

- Weber-Fechnerův zákon předpokládal, že rozpoznatelná změna ak. intenzity je ve stálém poměru k výchozí intenzitě. To však neplatí.
- Zvýšení hladiny ak. intenzity z 10 dB na 15 dB je téměř nepostřehnutelné, kdežto zvýšení z 95 dB na 100 dB znamená velký přírůstek subjektivní hlasitosti. Byla proto konvencí zavedena veličina **hlasitost zvuku**

$$N = 2^{(L_N - 40)/10}, \quad [N] = \text{son.} \quad (\text{I.2.7})$$

- **Hlasitost 1 son má referenční tón o hladině hlasitosti $L_N = 40$ ph, který dopadá rovinnými vlnami zředu, anebo zvuk, který otologicky normální osobě připadá stejně hlasitý.**
- Hlasitost dvou sonů odpovídá zvuku dvakrát hlasitějšímu atd.
- Vztah platí pro všechny zvuky, tj. jak tóny, tak i šumy.

Hlasitost zvuku

Srovnání L_N a N

$L_N[\text{ph}]$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$N[\text{son}]$	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16	32	64	128	256

Aplikace veličin charakteru hladin

- ① Hladina dvou zvuků o stejné ak. intenzitě

$$L_I = 10 \log \frac{2I_{a1}}{I_{ar}} = 10 \log \frac{I_{a1}}{I_{ar}} + 10 \log 2 \approx L_{I1} + 3 \text{ dB} \quad (\text{I.2.8})$$

- ② Hladina n zvuků o jednotlivých hladinách L_{Ii}

$$L_I = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_{Ii}/10} \right) \quad (\text{I.2.9})$$

Hlasitost zvuku

Předpokládáme současně působící zvuky o hladinách $L_1 = 70 \text{ dB}$ a $L_2 = 60 \text{ dB}$, tedy $|\Delta L| = 10 \text{ dB}$. Výsledná hladina podle (I.2.9) bude

$$L_I = 10 \log(10^{70/10} + 10^{60/10}) = 10 \log(1,1 \cdot 10^7) \doteq 70,4 \text{ dB}.$$

Slabší zvuk tedy přispívá k výsledné hladině intenzity méně než 1 dB, což je pod rozlišovací schopností sluchového vnímání. Slabší zvuk je tak silnějším zvukem potlačen.

Maskování zvuku

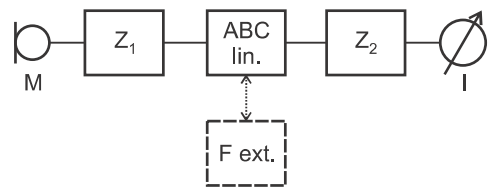
~ jev, při němž je slabší zvuk potlačen pod hranici sluchového vnímání zvukem silnějším.

Měření hladin zvuku

Zvukoměr

~ přístroj k měření hladin zvuku.

- Sestává z mikrofону M , zesilovačů Z_1 , Z_2 , váhových filtrů A , B , C , D volených přepínačem a indikátoru I (viz obr. I.2.4). Navíc je možné filtry vyřadit, tzv. lineární odezva. U některých zvukoměrů je možné zařadit externí filtry, např. filtry pro frekvenční analýzu v šířce oktávy nebo třetiny oktávy.
- Změřené hladiny označujeme dle užitého filtru L_A , L_B , L_C , L_D a k jednotce též připisujeme druh filtru, např. 80 dB(B) . Hodnotu změřenou při lineární odezvě nazýváme **hladina zvuku** a značíme ji L .



Obrázek I.2.4: Blokové schéma zvukoměru.

Měření hladin zvuku

Použití filtrů

- Jednotlivé filtry mají následující použití:
 - 1 A . . . přizpůsoben k měření nízkých hladin zvuku; nejvíce se blíží subjektivnímu vjemu lidského ucha
 - 2 B . . . určen pro měření středních hladin zvuků
 - 3 C . . . určen k měření vysokých hladin zvuků
 - 4 D . . . určen k měření velmi intenzivních zvuků; např. zvuk letadel, výbuchy atd.; nemají ho všechny přístroje
- Vlastnosti filtrů A, B, C a D jsou stanoveny konvencí.
- Frekvenční filtry se užívají k zjištění hladin zvuku v různých intervalech frekvencí.

Měření hladin zvuku

Dlouhodobý hluk

- Dlouhodobý hluk je škodlivý lidskému organismu a podle své intenzity a doby trvání může nepříznivě působit na pracovní schopnost, ale i zdraví člověka.
- Důležité je proto snižování hluku v životním prostředí.
- To je možné dvěma způsoby:
 - Snižováním ak. výkonu zdrojů hluku, či jejich odstraňováním.
 - Omezováním šíření hluku jeho tlumením v místech pobytu člověka či využíváním ochranných pomůcek.

Měření hladin zvuku

Trvalá ekvivalentní hladina hluku

- Slouží k charakterizaci dlouhodobého hluku proměnné intenzity. Je definována vztahem

$$L_{\text{eq}} = 10 \log \frac{I_{\text{as}}}{I_{\text{ar}}} = 10 \log \left[\frac{1}{I_{\text{ar}} \Delta t} \int_{t_0}^{t_1} I_a(t) dt \right], \quad (\text{I.2.10})$$

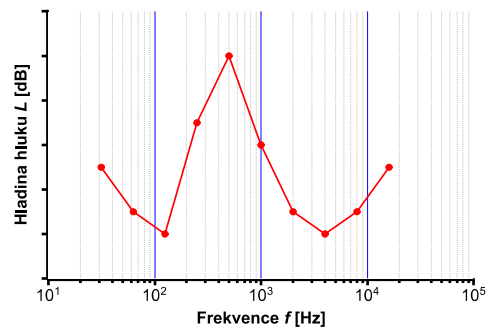
kde I_{as} je střední hodnota časově proměnné ak. intenzity $I_a(t)$, $\Delta t = t_1 - t_0$ je čas, po který byla ak. intenzita sledována, a I_{ar} je referenční hodnota ak. intenzity.

- Maximální přípustná hodnota L_{eq} je pro daný typ prostředí stanovena normou.

Měření hladin zvuku

Frekvenční analýza zvuku

- je velmi důležitá při omezování hluku s téměř konstantní hladinou zvuku v čase. Takový hluk vydávají obvykle trvale pracující stroje.
- Znalost frekvenčního spektra nám umožní identifikovat zdroje hluku (vibrující části) a změnou konstrukce stroje či tlumením šíření zvuku z těchto zdrojů omezit hluk. Provádí se zvukoměrem s frekvenčním filtrem.



Obrázek I.2.5: Příklad zjištěné frekvenční závislosti hladiny hluku. Zde je výrazné maximum okolo frekvence 500 Hz. Bude-li zdroj hluku odstraněn či utlumen jeho ak. výkon, poklesne i celková hladina hluku.

Ultrazvuk a jeho užití

Ultrazvuk

~ mechanické vlnění v rozsahu frekvencí od 20 kHz do 10 MHz.

- Současné zdroje ultrazvuku dosahují ak. intenzit v řádu 10^7 W m^{-2} , a tím i vysokých ak. tlaků (vzduch: $\sim 6 \cdot 10^4 \text{ Pa}$; voda: $\sim 4 \cdot 10^6 \text{ Pa}$). Vysoké tlaky pak působí na prostředí značnou ak. silou.

Zdroje ultrazvuku (1/2)

- **Ultrazvukové sirény** – konstrukčně shodné s klasickou sirénou, jen mají vyšší frekvenci. Používají se ve vzduchu a dosahují ak. výkonů až 10 kW. Nelze používat v místech, kde jsou lidé.
- **Ejektorové generátory** – využívají proud kapaliny dopadající na ostrou hranu kovové destičky. Vzniklé turbulence destičku rozechvívají v ultrazvukové frekvenci. Využívá se v kapalinách.

Ultrazvuk a jeho užití

Zdroje ultrazvuku (2/2)

- **Piezelektrický měnič** – využívá piezoelektrického jevu (změny rozměru anizotropního krystalu v důsledku polarizace vnějším el. polem – viz EM). Střídavé napětí v ultrazvukové frekvenci přivedené na kovové polepy krystalu způsobuje změnu jeho výšky. Umožňuje též detekci, jelikož deformace krystalu způsobuje vznik nábojů na polepech, což je detekováno elektrickým obvodem. Jsou nejuniverzálnější.
- **Magnetostrikční měnič** – využívá jevu magnetostrikce (změna délky jádra elektromagnetu v důsledku změny proudu tekoucího cívkou – změny magnetizace – viz EM). Obtížná výroba, není tak univerzální jako piezoelektrický měnič.

Ultrazvuk a jeho užití

Účinky ultrazvuku (1/2)

- **V plynu** – má koagulační účinky (malé částičky pevné či kapalné látky se spojují ve větší). Používá se k odstraňování prachu a mlhy ze vzduchu (nelze tam, kde jsou lidé).
- **V kapalině** – má disperzní účinky (větší částičky jsou rozptýlovány v menší). Používá se k vytváření emulzí a suspenzí (míchání barev apod.). Podobné účinky má ultrazvuk i v roztaveném kovu.
- **Tepelné účinky** – disipující energie vytváří v látce teplo. Vzhledem k vysoké hustotě energie v ultrazvuku je lokální zahřátí výrazné (může ničit živou tkáň). Mírné tepelné účinky se používají v lékařství k prohřívání částí těla – tzv. **ultrazvuková diatermie**.

Ultrazvuk a jeho užití

Účinky ultrazvuku (2/2)

- **Kavitace** – je-li v kapalině silné ultrazvukové pole, mohou v ní vznikat porušení její kontinuity v podobě malých bublinek. K tvorbě bublinky je však zapotřebí značné práce (v důsledku povrchového napětí), což se projeví energií, která se uvolní při prasknutí bublinky. Tato energie může způsobovat na povrchu pevných těles lokální ohřev a odbourání částiček materiálu (pozoruje se u lopatek turbín a lodních šroubů jako naleptávání povrchů). Používá se k odstraňování laků a nečistot v lázni rozpouštědla.

Ultrazvuk a jeho užití

Využití odrazu ultrazvuku

- **Ultrazvukový lokátor** – odražený ultrazvukový impulz je možné znovu přijmout a ze zpoždění mezi jeho vysláním a detekcí je možné stanovit vzdálenost překážky (známe-li jeho rychlost v prostředí). Používá se v kapalinách a v pevných látkách (ve vzduchu je ultrazvuk silně pohlcován). Lokátorem se určuje hloubka dna, jeho tvar i výskyt hejna ryb.
- **Ultrazvuková defektoskopie** – slouží k zjišťování vad materiálu. Na dutinách či nehomogenitách v materiálu (vadný svár, nečistota apod.) dochází k odrazu ultrazvuku. Z výrazného poklesu ak. intenzity ultrazvuku, kterým je materiál prozařován, lze vadu detekovat.
- **Impulzový odrazový defektoskop** – využívá piezoelektrický měnič jako zdroj i přijímač ultrazvuku. Nejprve je vyslán ultrazvukový pulz a na základě doby mezi přijetím signálu od nehomogenity a signálu z konce materiálu lze stanovit hloubku, v níž se nehomogenita nachází.