

AKUSTICKÉ VELIČINY

TEORETICKÝ ÚVOD

Akustika se zabývá studiem a měřením mechanického vlnění, jak v oboru slyšitelných frekvencí (16 Hz až 20 kHz), tak mimo něj v oboru ultrazvukových frekvencí (20 kHz až 10^{11} Hz). Podélné akustické vlny se mohou šířit v látkách všech skupenství: v plynech, kapalinách, pevných látkách i v plazmatu. Akustika ve velmi široké míře využívá poznatky a postupy nauky o vlnění. Základními oblastmi akustiky jsou: teoretická akustika, fyzikální akustika, fyziologická akustika, prostorová akustika, akustika ultrazvuku, akustika hudebních nástrojů, molekulová akustika atd. Zvláštní disciplínu akustiky dnes tvoří zpracování akustických signálů.

Ultrazvukové vlny emitované zdrojem se šíří prostředím a vytvářejí ultrazvukové pole. Tvar ultrazvukového pole ovlivňují interferenční jevy, které souvisí v reálném případě jednak s rozměry vyzařovací plochy zářiče, dále s vlastnostmi prostředí, v kterém se ultrazvukové vlny šíří, jednak s vlnovou délkou vlny λ .

Při průchodu ultrazvukových vln prostředím dochází k jejich **interferenci**. Interferenci rozumíme superpozici dvou a více ultrazvukových vln se stejnou frekvencí. Výsledný efekt závisí na fázovém posuvu těchto vln.

Při různých aplikacích ultrazvuku v praxi téměř vždy dochází ke vzniku interferenčních jevů v důsledku zvoleného geometrického uspořádání, a to například v důsledku odrazu vln od stěn zařízení nebo od hladiny v případě šíření vln v kapalině. V takovém ultrazvukovém poli vznikají místa nebo body s minimální až nulovou intenzitou, jestliže se vlny sejdou v opačné fázi. Naopak, mohou se vyskytnout i oblasti s maximální intenzitou ultrazvukového pole.

Ultrazvuk má široké uplatnění ve strojírenství, např. při hledání skrytých vad materiálu. Nezanedbatelnou roli také hraje jak při diagnostice tak v léčebných metodách v medicíně.

Šíření akustické podélné vlny je provázeno periodickým zhušťováním a zředováním prostředí. Pro okamžitou výchylku u částice prostředí, kterým se šíří rovinná vlna ve směru osy x můžeme psát rovnici

$$u = u_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (1)$$

kde u_0 je amplituda výchylky, ω je úhlová rychlost, t je čas a c je fázová rychlost vlnění v daném prostředí. Délka vlny λ souvisí s kmitočtem f a fázovou rychlostí c šíření vlny v prostředí vztahem

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (2)$$

Dále se zavádí akustická rychlost v , což je okamžitá rychlost, se kterou kmitá bod prostředí kolem své rovnovážné polohy. Tuto veličinu nesmíme zaměňovat s fázovou rychlostí šíření zvuku c , která je charakteristickou veličinou prostředí, v němž se vlna šíří. Důležitou veličinou používanou při popisu akustických polí je **akustický tlak** p . Je to časově proměnná veličina, která označuje okamžitou velikost tlaku v určitém čase a v určitém místě prostředí vznikající v důsledku šíření vlnění. Mezi akustickou rychlostí a akustickým tlakem platí vztah

$$p = \rho v c, \quad (3)$$

kde ρ je hustota prostředí. V případě šíření harmonických kmitů by stačilo vlnění charakterizovat amplitudami akustických veličin, tj. akustické výchylky, akustické rychlosti, akustického tlaku. V technické praxi obvykle měříme **efektivní hodnotu**, což je taková hodnota stálé veličiny, která by měla v daném časovém intervalu stejné energetické účinky jako měřená veličina. Efektivní hodnota akustického tlaku p_{ef} souvisí s amplitudou p_0 vztahem

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} . \quad (4)$$

Šíření vlnění prostředím provází přenos energie, který charakterizujeme veličinou **intenzita vlnění**. Je definována jako hustota výkonu na jednotku plochy kolmé ke směru šíření. Lze ji vyjádřit v závislosti na efektivní hodnotě akustického tlaku vztahem

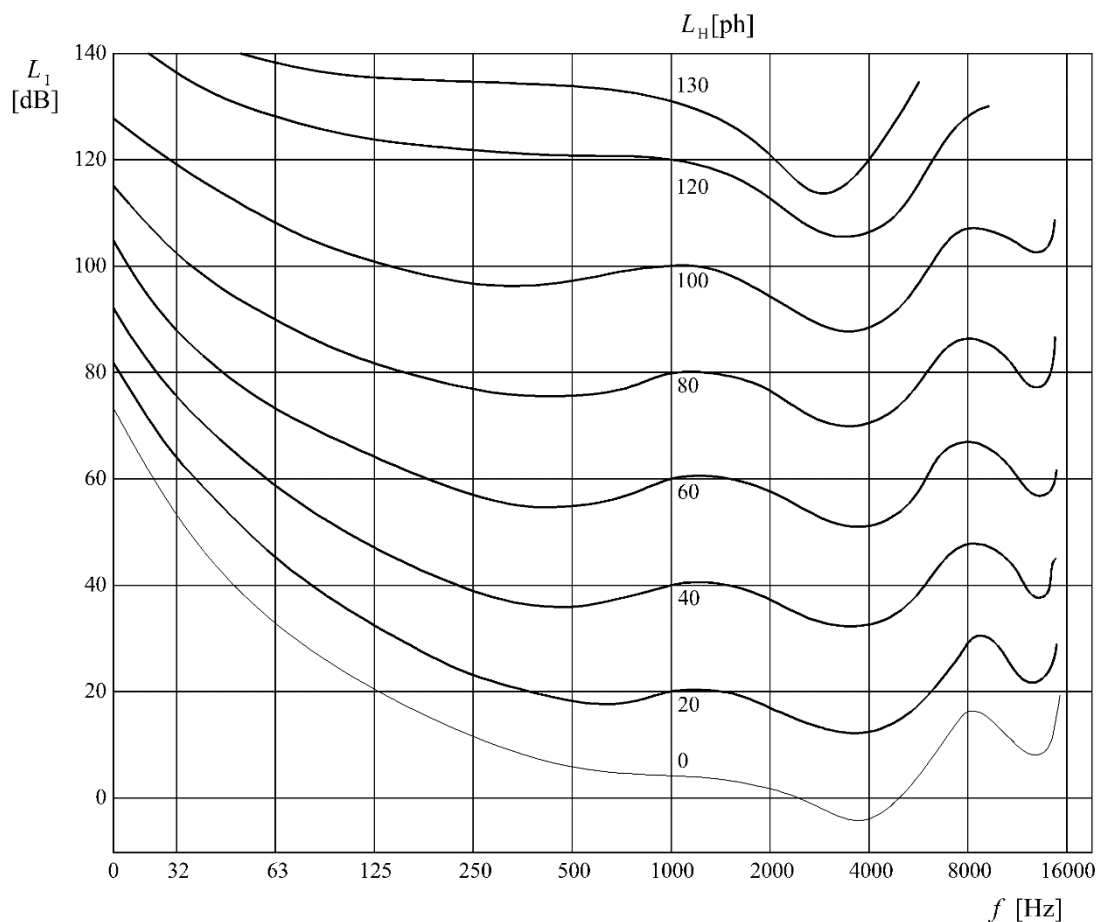
$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} , [I] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} . \quad (5)$$

V technické praxi měříme intenzitu zvuku ve velmi velkém rozsahu, 12 i více řádů. Vzhledem k této skutečnosti a s ohledem na fyziologické vnímání zvuku, je často vhodné vyjadřovat intenzitu zvuku v logaritmické stupnici. Zavádíme proto **hladinu intenzity zvuku** L_I , která se měří v decibelech a je definována vztahem

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} , [L_I] = \text{dB} , \quad (6)$$

kde I_0 je práh slyšitelnosti referenčního tónu, tj. mezinárodní dohodou stanovená hodnota intenzity, $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Veličina hladina intenzity zvuku je mírou intenzity zvukového vjemu pouze pro referenční tón o kmitočtu 1 kHz. Tóny jiných kmitočtů jsou však při stejné intenzitě zvuku vnímány člověkem jako zvuky odlišných hlasitostí. Při stanovení intenzivnosti lidského fyziologického vjemu zvuku byla změřena soustava křivek stejných hladin hlasitosti (obr 1), která umožňuje přiřadit při daném kmitočtu k známé hodnotě hladiny intenzity L_I **hladinu hlasitosti zvuku** L_H , $[L_H] = \text{fón}$.



Obr. 1

Hodnota hladiny hlasitosti se číselně rovná hodnotě hladiny akustického tlaku pro rovinnou postupnou vlnu o kmitočtu 1 kHz šířící se k posluchači čelně v takovém případě, jestliže v řadě měření určily různé osoby, že tato hladina má v průměru stejnou hlasitost, jako porovnávací zvuk. Z uvedených akustických veličin se měřením nejčastěji určuje efektivní akustický tlak. Akustická pole v plynech nejčastěji proměřujeme tlakovými mikrofony, které dávají výstupní napětí úměrné efektivní hodnotě tlaku. Akustické poměry v pevné fázi nejčastěji proměřujeme piezoelektrickými měniči. V tomto případě je výstupní napětí funkcí akustické výchylky. Vztah mezi tlakem a rychlostí postupující akustické vlny závisí na akustických vlastnostech materiálu (např. anizotropie, pohltivost, nehomogenita), druhu šířící se vlny (např. objemová, povrchová) a jejím tvaru (např. rovinná, kulová, válcová atd.).

Přímé měření intenzity zvuku je experimentálně poměrně obtížné a pro praktická měření se užívají kalibrované mikrofony. Akustické kmity se převádějí na snadněji měřitelné a zesilovatelné elektrické signály. Obecnou nevýhodou mikrofونů ovšem je, že velikost elektrického signálu nebývá jednoduchou funkcí intenzity zvuku a pro vyhodnocení měření je třeba znát frekvenční závislost citlivosti mikrofону. K absolutnímu měření intenzity zvuku lze použít Rayleighovu destičku, ovšem přesnost dosažených výsledků není příliš velká. Metoda je vysvětlena v návodu k úloze č. 25.

Určení rychlosti zvuku je možno provádět přímo změřením doby, za kterou zvukový pulz urazí určitou známou vzdálenost. Běžnější a experimentálně jednodušší je určení rychlosti zvuku podle vztahu (2) změřením jeho vlnové délky a frekvence. Rychlost zvukové vlny závisí na materiálových konstantách prostředí podle vztahů

$$c_T = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad , \quad c_P = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad ,$$

kde první vztah platí v tekutinách, K je koeficient objemové stlačitelnosti a druhý vztah platí v pevných látkách při zachování určitých podmínek, E je Youngův modul pružnosti v tahu. Druhý vztah můžeme rovněž použít k určení konstanty E , známe-li rychlost c šíření podélných akustických vln.

Měření rychlosti zvuku Kundtovou trubicí je založeno na určení vlnové délky stojatých vln vzniklých ve skleněné trubici naplněné zkoumaným plynem. Stojaté vlnění v trubici lze budít různými způsoby – mechanickými nebo elektrickými prostředky. Podrobněji je tato metoda popsána v úloze č. 26.

Pro rychlost zvuku ve vzduchu v závislosti na teplotě t platí empiricky zjištěný vztah

$$c = [344,3 + 0,62(t - 20)] \quad , \quad (7)$$

kde teplotu dosazujeme ve $^{\circ}\text{C}$ a hodnota vypočtené rychlosti je v jednotkách $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

STANOVENÍ INTENZITY ZVUKU RAYLEIGHOVOU DESTIČKOU

ÚLOHA č. 25

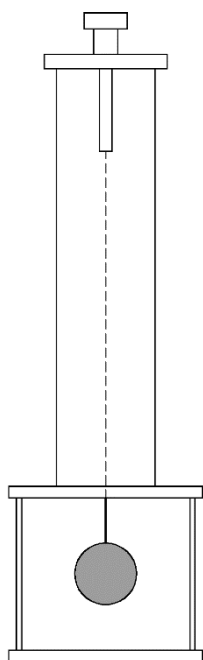
Způsob měření:

Absolutní měření intenzity zvuku zavedené vztahem (5) lze provést pomocí Rayleighovy destičky. Je to tenká kruhová destička se zrcátkem, zavěšená na tenkém drátku (obr. 2). Zvukové vlnění působí na destičku tlakem, který se projeví vznikem silové dvojice. Moment této silové dvojice je maximální, je-li destička umístěna pod úhlem $\varphi = 45^\circ$ vzhledem ke směru proudění (obr. 3). Destička zavěšená na vlákně, které se při jejím otáčení zkroutí, začne konat torzní kmity a ustálí se v poloze, v níž je torzní moment v rovnováze s výsledným momentem této dvojice sil. Velikost momentu lze určit měřením úhlu pootočení destičky, který obvykle převádíme zrcátkovou metodou na měření výchylky na stupnici. Pro intenzitu I v tomto uspořádání platí

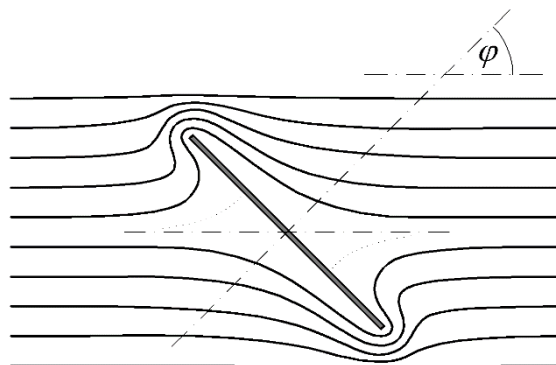
$$I = \frac{3}{4} \frac{c}{r^3} J \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2 \frac{\Delta n}{2R}, \quad (8)$$

kde r je poloměr destičky, J je moment setrvačnosti celého otáčivého systému vzhledem k vertikální ose, R je vzdálenost zrcátka od stupnice, c je fázová rychlost vlnění, τ je doba kyvu netlumených torzních kmitů, kterou lze určit z naměřené doby kyvu tlumených kmitů τ_t podle vztahu

$$\tau = \frac{\tau_t}{\sqrt{1 + \frac{\mathcal{G}}{2\pi}}}. \quad (9)$$



Obr. 2



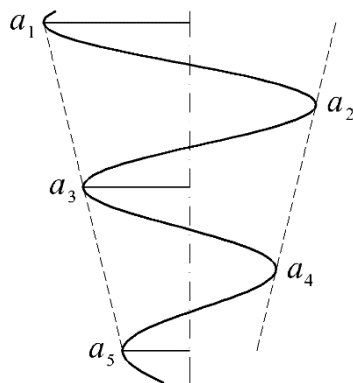
Obr. 3

$\Delta n = n - n_0$, přičemž n_0 , (n) je poloha světelné značky při vypnutém (zapnutém) zdroji. Rovnovážnou polohu světelné značky určíme ze tří po sobě následujících krajních poloh.

Logaritmický dekrement $\mathcal{G}$ ve vztahu (9), charakterizující tlumení torzních kmitů, je definován výrazem

$$\mathcal{G} = \ln \frac{a_1 - n_0}{a_3 - n_0} , \quad (10)$$

kde a_1, a_3 jsou po sobě jdoucí krajní polohy světelné značky na téže straně, pomocí nichž se určuje rovnovážná poloha, jak je znázorněno na obrázku 4.



Obr. 4

Připomínky k měření a vyhodnocení:

Před měřením zkontrolujte destičku, zda je nastavena tak, aby s osou reproduktoru svírala úhel 45° . Rovnovážné polohy světelné značky n_0 , (n) při vypnutém (zapnutém) zdroji zvuku určete ze tří krajních poloh ($n_0 = \frac{1}{2} \left[a_2 + \frac{1}{2}(a_1 + a_3) \right]$). Doba tlumených kmitů τ_t určete metodou opakovaných nebo následných měření. Ostatní údaje potřebné k výpočtu intenzity naleznete na kartě.

Nejistotu intenzity I stanovte pomocí obecného zákona šíření nejistot aplikací na vztah (8). Doba kyvu torzních kmitů je měřena opakovaně, a proto její nejistota přispívá k nejistotě typu A. Další přímo měřené veličiny ve vztahu (8) jsou zdroji nejistoty B. Pro nepřímou měřenou veličinu I po úpravě platí

$$u_{rIB} = \sqrt{9u_{rrB}^2 + u_{rRB}^2 + u_{rJB}^2 + \frac{u_{nB}^2 + u_{n_0B}^2}{(n - n_0)^2}} , \quad (11)$$

kde jsme zanedbali chyby veličin c a $\mathcal{G}$.

Relativní nejistotu typu B efektivního akustického tlaku stanoveného pomocí vztahu (5) určete opět pomocí vztahu, který platí pro relativní nejistotu součinu a podílu. Protože chyby c , ρ je možno zanedbat, zjednoduší se vztah pro nejistotu efektivního tlaku na výraz

$$u_{rp_{ef}B} = \frac{1}{2} u_{rIB} . \quad (12)$$

Hladinu hlasitosti L_H stanovte pomocí nomogramu na obr. 1, na kterém soustava křivek stejné hladiny hlasitosti dovoluje při daném kmitočtu k známé hodnotě hladiny intenzity L_I

hladinu hlasitosti zvuku L_H . Při zápisu hodnot L_I a L_H si uvědomte, jaký počet cifer výsledku je zaručen, protože relativní nejistoty těchto veličin budou přinejmenším stejně velké jako relativní nejistota intenzity zvuku.