

Úloha 25: Stanovení intenzity zvuku Rayleighovou destičkou

Pomůcky

Aparatura s Rayleighovou destičkou a zrcátkem, zdroj zvuku (generátor a reproduktor), laser, stupnice, digitální stopky, pásové měřítko

Úkoly

Pomocí Rayleighovy destičky určete intenzitu zvuku I , efektivní hodnotu akustického tlaku p_{ef} , hladinu intenzity zvuku L_I a hladinu hlasitosti L_H .

Dílčí úkoly

1. Změřte vzdálenost zrcátka od stupnice R .
2. Určete rovnovážnou polohu Rayleighovy destičky bez zvuku n_0 a se zapnutým reproduktorem n_1 ze tří následných výchylek a_i pro $i = 1, 2, 3$.
3. Následným měřením stanovte dobu kyvu τ_t tlumených kmitů bez zvuku a vypočtete logaritmický dekrement ϑ .
4. Určete rychlost šíření zvuku ve vzduchu c .
5. Seznamte se s nomogramem a stanovte z něj hladinu hlasitosti.

Poznámky k měření

- Výrobce aparatury uvádí moment setrvačnosti torzní soustavy $J = (1,325 \pm 0,013) \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ a poloměr destičky $r = (22,00 \pm 0,20) \text{ mm}$.
- Rayleighova destička je velmi citlivá na pohyb vzduchu v jejím okolí, a proto během měření zavřete okno a omezte pohyb v okolí aparatury na minimum.
- Na stupnici je třeba zavést znaménkovou konvenci.
- Rovnovážnou polohu bez zvuku n_0 změřte tak, že na okamžik pustíte zdroj a odečtete první tři následné výchylky, které bude možné odečíst na stupnici.
- Pro určení rovnovážné polohy n platí obecný vztah

$$n = \frac{1}{2} \left[a_2 + \frac{1}{2} (a_1 + a_3) \right], \quad (1)$$

kde a_i jsou tři následné výchylky. Logaritmický dekrement se pak určí ze vztahu

$$\vartheta = \ln \frac{a_1 - n}{a_3 - n}. \quad (2)$$

- Před měřením doby kyvu τ_t tlumeného kmitání je třeba určit odpovídající rovnovážnou polohu. Pak na okamžik pustíte zdroj, čímž destičku rozkmitáte. Následně zaznamenáte časy průchodu rovnovážnou polohou.
- Intenzita zvuku se vyjadřuje z doby kyvu netlumených torzních kmitů τ , a proto je třeba provést korekci dle vztahu

$$\tau = \frac{\tau_t}{\sqrt{1 + \frac{\vartheta}{2\pi}}}, \quad (3)$$

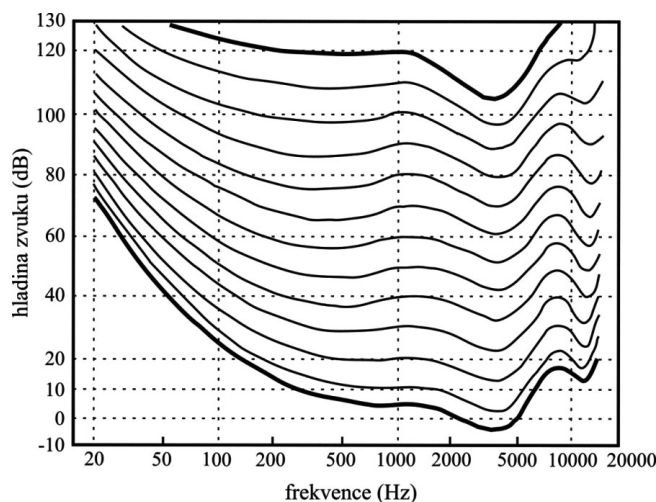
kde τ_t je přímo měřená doba kyvu tlumených torzních kmitů a ϑ je logaritmický dekrement.

- Fázová rychlost zvuku ve vzduchu c je dána empirickým vzorcem

$$c = 344,3 + 0,62 (t - 20), \quad (4)$$

kde t je teplota vzduchu měřená ve °C.

- Hladina slyšitelnosti se určuje z nomogramu (viz obrázek), který zobrazuje vlastnosti sluchového pole. Každá křivka odpovídá určité hladině hlasitosti L_H , přičemž frekvence 1000 Hz je referenční. Pro tuto frekvenci platí $L_H = L_I$.



Matematické modely pro výpočet nepřímo měřených veličin

Intenzita zvuku I :

$$I = \frac{3}{8} \left(\frac{\pi}{\tau} \right)^2 \frac{J c \Delta n}{r^3 R} \quad (5)$$

τ ... doba kyvu netlumeného kmitání stanovená podle (3)

J ... moment setrvačnosti torzní soustavy (dáno výrobcem)

c ... fázová rychlost zvuku ve vzduchu stanovená dle empirického vztahu (4)

r ... poloměr Rayleighovy destičky (dáno výrobcem)

R ... vzdálenost zracátka od stupnice

$\Delta n = |n_1 - n_0|$... absolutní hodnota rozdílu rovnovážných poloh pro výchylku Rayleighovy destičky při vypnutém n_0 a zapnutém zvuku n_1 , které se určují ze vztahu (1)

Efektivní hodnota akustického tlaku p_{ef} :

$$p_{ef} = \sqrt{I \rho c} \quad (6)$$

I ... intenzita zvuku z (5)

ρ ... hustota vzduchu (tabulková hodnota)

c ... fázová rychlost zvuku ve vzduchu stanovená dle empirického vztahu (4)

Hladina intenzity zvuku L_I :

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (7)$$

I ... intenzita zvuku z (5)

I_0 ... práh slyšitelnosti (hodnota stanovená mezinárodní dohodou)

Poznámky a návod k výpočtu nejistot

Intenzita zvuku I :

- Nejistoty se určují na základě vztahu (5). Dle tohoto vztahu lze nejistoty vyjádřit pomocí relativních nejistot.
- Nejistota typu A se určuje pouze z doby kyvu. Doba kyvu je určena nepřímo ze vztahu (3) a lze vyjádřit pomocí relativní nejistoty.
- Na nejistotě typu B se podílejí všechny veličiny $\tau, J, r, c, R, \Delta n$.
- Doba kyvu je určena nepřímo ze vztahu (3). Při zanedbání nejistoty z logaritmického dekrementu ϑ lze vyjádřit pomocí relativní nejistoty.
- Rychlost zvuku je určena nepřímo z empirického vztahu (4). Nejistotu lze určit z přímo měřené teploty, přičemž pro její vyjádření je třeba využít jednoduché parciální derivace:

$$u_{cB} = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)^2 u_{tB}^2} = \left|\frac{\partial c}{\partial t}\right| u_{tB} = 0,62 u_{tB}$$

- Maximální chyba vzdálenosti R musí reflektovat okolnosti měření (vzdálenost, překážky v prostoru měření, odhad kolmosti).
- Nejistotu rovnovážné polohy lze určit jako nejistotu lineární kombinace. Vztah (1) lze přepsat do tvaru:

$$n = \frac{1}{4}a_1 + \frac{1}{2}a_2 + \frac{1}{4}a_3$$

Přímo měřenými veličinami jsou výchylky a_i . U všech výchylek lze předpokládat stejnou maximální chybu m_a , a tedy stejnou absolutní nejistotu u_{aB} . Pak platí:

$$u_{nB} = \sqrt{\frac{1}{16}u_{aB}^2 + \frac{1}{4}u_{aB}^2 + \frac{1}{16}u_{aB}^2} = \sqrt{\frac{6}{16}}u_{aB} = \frac{\sqrt{6}}{4}u_{aB} = \frac{\sqrt{6}}{4} \cdot \frac{m_a}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{4}m_a$$

Nejistotu $\Delta n = |n_1 - n_0|$ lze pak určit jako nejistotu rozdílu (jednoduché lineární kombinace).

Efektivní hodnota akustického tlaku p_{ef} :

- Nejistoty se určují na základě vztahu (6). Dle tohoto vztahu lze nejistoty vyjádřit pomocí relativních nejistot (mocniny všech vstupních veličin jsou $\frac{1}{2}$).
- Na nejistotě typu A se podílí pouze intenzita I .
- Na nejistotě typu B se podílí intenzita I a rychlost zvuku c .

Poznámka: Intenzita zvuku I je závislá na rychlosti zvuku c . V tomto případě lze ukázat, že při výpočtu nejistot nemá tato závislost vliv (nedojde ke zkrácení veličiny c).

- Nejistotu tabulkové hodnoty (ρ) lze v kontextu laboratorního měření zanedbat a při výpočtu nejistoty je považována za konstantu.

Hladina intenzity zvuku L_I :

- Nejistoty se určují na základě vztahu (7). Dle tohoto vztahu je nutné vyjádřit nejistoty pomocí parciální derivace:

$$u_{L_I} = \sqrt{\left(\frac{\partial L_I}{\partial I}\right)^2 u_I^2} = \left|\frac{\partial L_I}{\partial I}\right| u_I = \frac{10}{I \cdot \ln 10} u_I$$

- Nejistota hodnoty I_0 se neurčuje.

Podněty k diskusi

- Diskutujte vliv pohybu v okolí aparatury na přesnost měření.
- Zamyslete se nad tabulkovou hodnotou hustoty vzduchu. Jaké parametry mohou tuto hodnotu ovlivnit?