

Část I.

AKUSTIKA

Sekce 3.

Šíření zvuku v exteriéru a interiéru

A.D. Pajdarová (ZČU)
KFY/FYSV (19/20)

Zvuk v otevřeném prostoru

Šíření zvuku z bodového zdroje

- Pro hladinu ak. intenzity zvuku ve vzdálenosti r od bodového zdroje platí

$$L_I(r) = L_P - 20 \log\{r\}[\text{m}] - 10 \log 4\pi, \quad (\text{I.3.1})$$

kde L_P je hladina ak. výkonu bodového zdroje a $10 \log 4\pi \approx 11$ dB.

- Jelikož hodnotu L_P nelze přímo měřit, vyloučíme ji z (I.3.1). Změříme hladinu ak. intenzity zvuku $L_I(r_0)$ ve vzdálenosti r_0 od zdroje a na jejím základě vyjádříme L_P . Zpětným dosazením do (I.3.1) L_P vyloučíme, čímž získáme

$$L_I(r) = L_I(r_0) - 20 \log \frac{r}{r_0} \quad (\text{I.3.2})$$

(r a r_0 musejí být ve stejných jednotkách).

Zvuk v otevřeném prostoru

Index směrovosti G_{ϑ}

- Slouží k hodnocení rozdílu hladiny buzené zkoumaným zdrojem od hladiny, kterou by ve stejném směru měl ideální bodový zdroj. Je tak definován vztahem

$$G_{\vartheta} = L_{\vartheta} - L, \quad (\text{I.3.3})$$

kde L_{ϑ} je hladina zvuku zkoumaného zdroje ve směru ϑ a L je hladina zvuku, kterou by měl bodový zdroj.

- **Př.** Bodový zdroj u rovinné plochy

Takovýto systém vyzařuje pouze do poloprostoru (přímo a odrazem od desky). Ak. intenzita tak před deskou vzroste na dvojnásobek, čemuž odpovídá nárůst hladiny ak. intenzity oproti bodovému zdroji o 3 dB. Index směrovosti systému je tak $G_{\vartheta} = 3$ dB.

Útlum zvuku v otevřeném prostoru

Celkový útlum

- Pro hladinu zvuku ve vzdálenosti r od zdroje platí

$$L(r) = L(r_0) - A(r, r_0, \dots), \quad (\text{I.3.4})$$

kde $L(r_0)$ je hladina zvuku v referenční vzdálenosti r_0 . Veličina $A(r, r_0, \dots)$ se nazývá **celkový útlum** a je dána součtem

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4,$$

kde A_1 je základní útlum (důsledek divergence vlnoploch), A_2 je útlum absorpcí ve vzduchu, A_3 je útlum vegetací a A_4 je útlum překážkami.

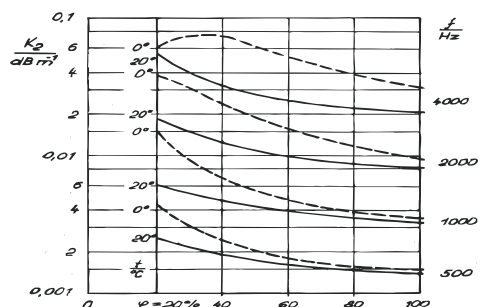
- Pro bodový zdroj je základní útlum dán vztahem (viz (I.3.2))

$$A_1(r, r_0) = 20 \log(r/r_0).$$

Útlum zvuku v otevřeném prostoru

Útlum absorpcí ve vzduchu A_2

- Lze zapsat ve tvaru: $A_2 = K_2 \cdot (r - r_0)$,
kde K_2 je koeficient závislý na frekvenci zvuku, jeho teplotě a vlhkosti. K_2 ovlivňují i klimatické podmínky (vítr, teplotní gradient atd.).
- Pro frekvenci 1 kHz, teplotu 20 °C a rel. vlhkost 60 % je $K_2 = 0,004 \text{ dB m}^{-1}$.
Na malé vzdálenosti je proto tento útlum nevýznamný, ale musí být započten na vzdálenostech velkých (řádově kilometry).

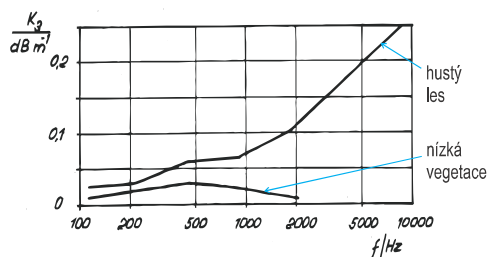


Obrázek I.3.1: Závislost koeficientu útlumu K_2 na frekvenci zvuku f , jeho teplotě t a vlhkosti φ . Převzato z Binko a kol.

Útlum zvuku v otevřeném prostoru

Útlum účinkem vysoké a nízké vegetace A_3

- Dán vztahem: $A_3 = K_3 \cdot (r - r_0)$,
kde K_3 závisí na druhu porostu a na frekvenci zvuku.
- Vegetace je velmi užitečný prostředek snižování hluku v exteriérech. Nejúčinnější je vysoký smíšený les s podrostem.

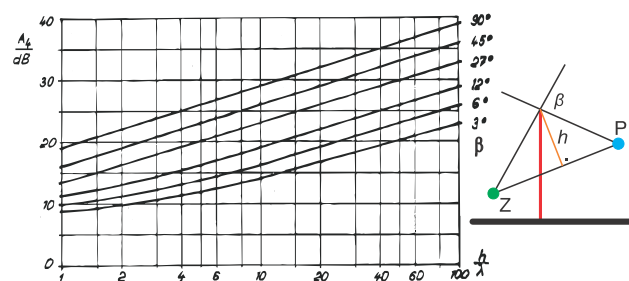


Obrázek I.3.2: Průběh koeficientu K_3 v závislosti na frekvenci zvuku f a typu porostu. Převzato z Binko a kol.

Útlum zvuku v otevřeném prostředí

Útlum překážkami přímého šíření zvuku A_4

- Analytické vyjádření je složité, proto zde píšeme jen: $A_4 = A_4(\beta, h/\lambda)$, kde β je úhel ohybu a h je účinná výška (viz obr. I.3.3).
- Mohou to být terénní nerovnosti, budovy stojící zvuku v cestě či záměrně budované protihlukové stěny. Jsou nejúčinnějším prostředkem snižování hluku v malých vzdálenostech.

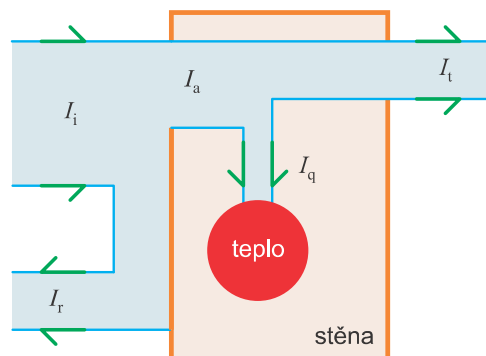


Obrázek I.3.3: Závislost útlumu A_4 na úhlu ohybu zvuku β okolo překážky a poměru efektivní výšky překážky h k vlnové délce vlnění λ . Z je zdroj zvuku a P je přijímač. Převzato z Binko a kol.

Zvuková pohltivost a průzvučnost

Chování zvuku na překážce

- Ak. intenzita zvuku dopadajícího na překážku (I_i) se částečně odráží zpět (I_r) a zbytek je překážkou pohlcen (I_a). Pohlcená intenzita se z části mění v teplo (I_q) a z části prochází překážkou (I_t).



Obrázek I.3.4: Schématické vyobrazení přerozdělení ak. intenzity zvuku při jeho dopadu na překážku. Šířka „toků“ znázorňuje velikost ak. intenzity.

Zvuková pohltivost a průzvučnost

Činitel odrazivosti, pohltivosti a průzvučnosti

- K popisu chování zvuku na stěně zavádíme **činitel (koeficient) odrazivosti**

$$\rho = \frac{I_r}{I_i}, \quad (\text{I.3.5})$$

činitel (koeficient) pohltivosti

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i} \quad (\text{I.3.6})$$

a **činitel (koeficient) průzvučnosti**

$$\tau = \frac{I_t}{I_i}. \quad (\text{I.3.7})$$

Zvuková pohltivost a průzvučnost

Pohltivost a průzvučnost stěny

- Účinky stěny závisejí i na její ploše S , proto se zavádějí veličiny **pohltivost stěny**

$$A = \alpha S, \quad [A] = \text{m}^2 \quad (\text{I.3.8})$$

a **průzvučnost stěny**

$$B = \tau S, \quad [B] = \text{m}^2. \quad (\text{I.3.9})$$

- Pohltivost stěny A udává velikost plochy otevřeného okna, které by mělo stejnou pohltivost jako uvažovaná stěna.**
- Průzvučnost stěny B udává velikost plochy otevřených dveří, které by měly stejnou průzvučnost jako uvažovaná stěna.**

Zvuková pohltivost a průzvučnost

Celková pohltivost a průzvučnost

- Stěny místností mohou být tvořeny z mnoha materiálů o různých vlastnostech. V tomto případě se zavádějí veličiny **celková pohltivost**

$$A_n = \sum_{k=1}^n A_k = \sum_{k=1}^n \alpha_k S_k \quad (\text{I.3.10})$$

a **celková průzvučnost**

$$B_n = \sum_{k=1}^n B_k = \sum_{k=1}^n \tau_k S_k, \quad (\text{I.3.11})$$

kde A_k (B_k) je pohltivost (průzvučnost) k -té plochy o obsahu S_k a α_k (τ_k) je koeficient pohltivosti (průzvučnosti) příslušné plochy.

Zvuková pohltivost a průzvučnost

Zvuková pohltivost

- Dána hlavně vlastnostmi povrchové vrstvy předmětu. Je též závislá na frekvenci zvuku, tj. $\alpha = \alpha(f)$.
- Činitelé pohltivosti jsou tabelovány v normalizovaných frekvenčních pásmech. Činitelé pohltivosti se měří v dozvukové komoře na základě rozdílu dob dozvuku (viz dále) v prázdné komoře a v komoře se zkoumaným předmětem.

Zvuková průzvučnost

- Závisí na materiálu stěny a její tloušťce, plošné hmotnosti stěny i její konstrukci a též na frekvenci zvuku. Hodnota činitele průzvučnosti se určuje ze stupně zvukové neprůzvučnosti (viz dále).

Zvuk v uzavřeném prostoru

- Při stálém působení zdroje zvuku konstantního ak. výkonu dojde v místnosti v důsledku mnohočetných odrazů od stěn k vytvoření tzv. difúzního akustického pole o konstantní ak. intenzitě I_{ad} .

Difúzní akustické pole

~ je takové zvukové pole, pro které platí následující postuláty statistické akustiky:

- 1 *V uzavřeném prostoru s difúzním akustickým polem jsou objemová hustota akustické energie a akustická intenzita zvuku všude stejné.*
- 2 *V kterémkoli místě takového prostoru je akustická intenzita zvuku rovna součtu akustických intenzit všech zvuků, které do něj přímo nebo odrazem dospívají.*
- 3 *Všechny úhly dopadu zvuku do kteréhokoli místa jsou stejně pravděpodobné.*

Zvuk v uzavřeném prostoru

Intenzita zvuku difúzního ak. pole I_{ad}

- Pro intenzitu difúzního ak. pole v místnosti se stěnami o celkové pohltivosti A_{n} , ve které působí konstantní ak. zdroj o výkonu P_{as} platí

$$I_{\text{ad}} = \frac{4 P_{\text{as}}}{A_{\text{n}}}. \quad (\text{I.3.12})$$

Hladina zvuku difúzního ak. pole L_{d}

- Z (I.3.12) lze odvodit, že

$$L_{\text{d}} = L_{\text{d0}} - 10 \log \frac{A_{\text{n}}}{A_{\text{n0}}}, \quad (\text{I.3.13})$$

kde L_{d0} je hladina difúzního ak. pole v místnosti o celkové pohltivosti A_{n0} .

Zvuk v uzavřeném prostoru

Regulace ak. intenzity v místnosti

- Hladina difúzního ak. pole závisí na pohltivosti stěn. Tudíž změnou jejich pohltivosti můžeme regulovat i hladinu (intenzitu) ak. pole v místnosti.
- Snížení pohltivosti – umožňuje dosáhnout žádoucí hladiny zvuku v koncertních sálech, posluchárnách apod.
- Zvýšení pohltivosti – umožňuje snížit nežádoucí hluk v chráněných místnostech, halách, pracovištích, průmyslových objektech, tunelech apod.
- **Pozn.** Prostory v exteriéru ohraničené vysokými budovami (dvory, ulice atd.) mají podobné chování jako uzavřené prostory.

Dozvuk a jeho význam

Názevuk a dozvuk

- **Názevuk** – jev nárůstu ak. intenzity zvuku v místnosti při zapnutí akustického zdroje.
- **Dozvuk** – jev poklesu ak. intenzity zvuku v místnosti po vypnutí akustického zdroje.
- Z hlediska produkce a poslechu zvuku v místnosti je mnohem důležitější dozvuk nežli názevuk.

Doba dozvuku T_D

- Používá se k hodnocení dozvuku v místnosti. Byla zavedena Sabinem.
- **Doba dozvuku T_D je čas po vypnutí akustického zdroje, za který hladina zvuku v místnosti klesne ze své původní hodnoty o 60 dB.**

Dozvuk a jeho význam

Sabinův vztah

- Na základě představy spojitého pohlcování zvuku stěnami odvodil Sabin pro dobu dozvuku vztah (viz P5)

$$T_D = 24 \ln(10) \frac{V}{c \alpha S}, \quad (\text{I.3.14})$$

kde V je objem místnosti, c je rychlost zvuku, α je koeficient pohltivosti stěn o celkové ploše S .

- Součin $A_n = \alpha S$ je celková pohltivost stěn.
- Doba dozvuku je úměrná objemu místnosti a nepřímo úměrná celkové pohltivosti stěn.***
- Tento vztah platí jen pro malé místnosti, kde je malá doba mezi odrazy zvuku od stěn a pokles ak. intenzity lze pokládat za spojitý.

Dozvuk a jeho význam

Eyringův vztah

- K pohlcování dochází pouze při odrazu od stěny, tudíž pokles ak. intenzity není spojitý. Za tohoto předpokladu odvodil Eyring pro dobu dozvuku výraz (viz P6)

$$T_D = 24 \ln(10) \frac{V}{c [-\ln(1 - \alpha)] S}. \quad (\text{I.3.15})$$

- V tomto případě je celková pohltivost stěn nahrazena tzv. efektivní pohltivostí

$$A_{nE}^{\text{ef}} = \alpha_E^{\text{ef}} S = [-\ln(1 - \alpha)] S,$$

kde $\alpha_E^{\text{ef}} = [-\ln(1 - \alpha)]$ je tzv. efektivní činitel pohltivosti stěn.

- Vztah platí i pro velké místnosti.

Dozvuk a jeho význam

Millingtonův vztah

- Millington využil odvození Eyringa, ale započítal různost materiálů stěn, čímž obdržel výraz pro dobu dozvuku

$$T_D = 24 \ln(10) \frac{V}{c [-\sum (S_i/S) \ln(1 - \alpha_i)] S}, \quad (\text{I.3.16})$$

kde α_i je činitel pohltivosti stěny o ploše S_i , přičemž platí, že $S = \sum S_i$.

- Celková efektivní pohltivost a efektivní činitel pohltivosti jsou

$$A_{nM}^{\text{ef}} = \alpha_M^{\text{ef}} S = [-\sum (S_i/S) \ln(1 - \alpha_i)] S, \quad \alpha_M^{\text{ef}} = [-\sum (S_i/S) \ln(1 - \alpha_i)].$$

- Tento vztah je nejpřesnější a využívá se v místnostech s velmi odlišnými pohltivostmi stěn. Lze jej aplikovat i na polouzavřené venkovní prostory (ulice, dvory apod.).

Dozvuk a jeho význam

Započtení absorpce ve vzduchu

- Ve velmi velkých místnostech (sportovní haly, velké koncertní sály apod.) je při výpočtu doby dozvuku nutné vzít v úvahu i absorpci energie zvuku ve vzduchu. Eyringův vzorec pak bude mít tvar

$$T_D = 24 \ln(10) \frac{V}{c [-\ln(1 - \alpha) + 4mV/S] S}, \quad (\text{I.3.17})$$

kde m je konstanta útlumu. Podobně Millingtonův vzorec bude

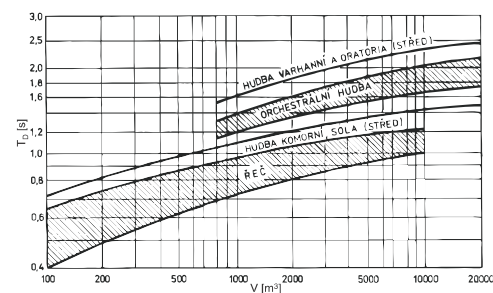
$$T_D = 24 \ln(10) \frac{V}{c [-\sum (S_i/S) \ln(1 - \alpha_i) + 4mV/S] S}. \quad (\text{I.3.18})$$

- Konstanta útlumu m udává převrácenou hodnotu vzdálenosti, na níž klesne ak. intenzita zvuku e -krát.

Dozvuk a jeho význam

Význam doby dozvuku (1/2)

- Mírou kvality poslechu je u řeči srozumitelnost a u hudby věrnost přenosu díla. Obojí závisí na hladině zvuku v místě poslechu a délce dozvuku, přičemž tyto veličiny ovlivňuje pohltivost stěn. Úpravou pohltivosti tudíž můžeme upravit obě tyto veličiny.
- Menší pohltivost vede k vyšší ak. intenzitě, ale delší době dozvuku. Větší pohltivost naopak zkrátí dobu dozvuku, ale sníží i ak. intenzitu. Prvořadým kritériem akustičnosti místnosti je však doba dozvuku (dáno normami).



Obrázek I.3.5: Doba dozvuku T_D dle norem v závislosti na objemu místnosti V a druhu použití. Převzato z Binko a kol.

Dozvuk a jeho význam

Význam doby dozvuku (2/2)

- Doba dozvuku závisí na pohltivosti, která se mění s frekvencí zvuku (viz závislost činitele $\alpha = \alpha(f)$). Pohltivé materiály je proto nutné volit tak, aby měly přibližně stejnou pohltivost v rozhodujícím rozsahu frekvencí.
- Na akustičnost místnosti má vliv i průběh poklesu hladiny dozívajícího zvuku. Měl by být pokud možno lineární.
- Pokles ak. intenzity je stupňovitý. Pokud jsou stupně od sebe vzdáleny o méně než 0,1 s, jeví se nám pokles jako spojitý. Je-li tento čas větší, vnímáme tyto odrazy od stěn jako ozvěnu.
- Doba dozvuku se měří z poklesu hladiny v její lineární části o 20 dB, což odpovídá třetině doby dozvuku T_D .

Zvuková izolace

Přenos zvuku

- Na přenosu zvuku mezi místnostmi a z exteriéru se podílejí různé konstrukční prvky budov:
 - svislé dělicí prvky — stěny, dveře, okna atd.
 - vodorovné dělicí prvky — stropy, podlahy, nosné konstrukční prvky atd.
 - vnitřní instalace budov — rozvody vody, tepla, vzduchotechnika atd.
- Vedení zvuku v pevné látce (nosné konstrukční prvky, instalace) rozvádí zvuk po celé budově téměř nezávisle na dělicích prvcích.
- U vodorovných dělicích prvků je nutné bránit i šíření tzv. kročejového hluku (vzniká při chůzi na podlaze a přenáší se stropem do chráněné místnosti).

Zvuková izolace

Vzduchová neprůzvučnost

~ míra zábrany přenosu zvuku ze vzduchu v okolních prostorech do vzduchu chráněné místnosti.

- Jednotlivé dělicí prvky se hodnotí tzv. **stupněm vzduchové neprůzvučnosti**

$$R = L_i - L_t = 10 \log \frac{I_{ai}}{I_{at}} = 10 \log \frac{1}{\tau}, \quad [R] = \text{dB}, \quad (\text{I.3.19})$$

kde L_i je hladina zvuku dopadajícího na dělicí prvek, L_t je hladina zvuku prvkem pronikající a τ je činitel průzvučnosti.

- **Stupeň vzduchové neprůzvučnosti udává schopnost dělicího prvku bránit průchodu zvuku.**

Zvuková izolace

Zvuková izolace místnosti

- O zvukové izolaci místnosti spolurozhoduje i její celková pohltivost. Výsledný tlumicí účinek uzavřeného prostoru proti vnějšímu zvuku udává **stupeň zvukové izolace místnosti** daný vztahem

$$D = L_i - L_m = R - 10 \log \frac{S_d}{A_n}, \quad [D] = \text{dB}, \quad (\text{I.3.20})$$

kde L_i je hladina zvuku dopadajícího na místnost, L_m je hladina zvuku proniklého do místnosti, S_d je plocha dělicí stěny a A_n je celková pohltivost stěn místnosti.

- Stupeň zvukové izolace můžeme zvětšit bez změny dělicích prvků zvýšením celkové pohltivosti stěn místnosti.