

Úloha 6

Měření doby dozvuku

6.1 Zadání

Změřte dobu dozvuku v třetinooktávových frekvenčních pásmech. **Výsledky zpracujte graficky.**

6.2 Obecná část

Základní veličinou charakterizující prostor je doba dozvuku. Podle definice je doba dozvuku doba, za kterou hustota zvukové energie po vypnutí zdroje klesne na 10^{-6} původní hodnoty (viz dále). Lze odvodit vztah pro dobu dozvuku

$$T = 0,161 \frac{V}{\alpha S}, \quad (6.1)$$

kde V je objem místnosti, S plocha stěn a α činitel zvukové pohltivosti. Tato závislost platí poměrně dobře pro malé činitele pohltivosti, jen experimentálně zjištěná konstanta úměrnosti je 0,164, proto budeme dále předpokládat tuto hodnotu¹. V literatuře ji nalezneme jako dobu dozvuku podle Sabina

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha S}. \quad (6.2)$$

Činitel zvukové pohltivosti α zde charakterizuje průměrnou pohltivost všech ohraničujících ploch. Mají-li jednotlivé plochy S_i činitele pohltivosti α_i , pak průměrná hodnota je dána vztahem

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S}, \quad (6.3)$$

kde S je celkový povrch stěn daný součtem všech S_i .

Vztah (6.2) pro dobu dozvuku podle Sabina má zjevně omezenou platnost. Bude-li pohltivost stěn nulová ($\alpha = 0$) a všechna energie se odrazí, měla by doba dozvuku být nekonečná. Tento rozpor se zkušeností vyžaduje zahrnutí útlumu zvuku při jeho šíření (viz dále). Větší komplikace nastává pro dokonale pohltivé stěny ($\alpha = 1$), kdy doba dozvuku podle vztahu (6.2) je zjevně nenulová, i když by se měla rovnat nule. V předcházejícím odvození jsme předpokládali spojitý (exponenciální) pokles hustoty zvukové energie, který však pro velké pohltivosti již není dobrou aproximací dějů v akustickém poli. Zvukový paprsek s intenzitou I , který dopadne na povrch s činitelem zvukové pohltivosti α bude skokově zeslaben o αI . Tuto skutečnost do svých výpočtů zahrnul Eyring a odvodil pro dobu dozvuku vztah

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} = 0,164 \frac{V}{\alpha_E S}, \quad (6.4)$$

kde substituce $\alpha_E = -\ln(1 - \alpha)$ je někdy označována jako Eyringuv činitel zvukové pohltivosti a doba dozvuku vyjádřena tímto vztahem se nazývá doba dozvuku podle

¹Přesnost výpočtů a měření na tři platné cifry je s výjimkou laboratoří obvykle nedosažitelná.

Eyringa. Vidíme, že pro $\alpha = 1$ vychází $T_E = 0$ a Eyringův vzorec vyhovuje i pro velké pohltivosti.

Pro prostory se středním činitelem pohltivosti $\alpha < 0,2$ a ne příliš velkými rozdíly mezi jednotlivými stěnami je i Sabinův vzorec dostatečně přesný, při běžných měřeních se pak nejčastěji používá vzorec Eyringův.

Jak již bylo zmíněno výše, všechny vzorce pro dobu dozvuku (6.2) a (6.4) nevyhovují pro $\alpha \rightarrow 0$. K tomu je třeba uvažovat útlum zvuku při šíření (způsobený disipací energie ve vzduchu), který se projeví exponenciálním úbytkem intenzity se vzdáleností

$$I = I_0 e^{-ml} , \quad (6.5)$$

kde I_0 je intenzita na počátku a m je činitel útlumu zvuku. Zahrneme-li útlum zvuku ve vzduchu např. do Sabinova vztahu, obdržíme

$$T_S = 0,164 \frac{V}{\alpha S + 4mV} , \quad (6.6)$$

kde činitel útlumu m nabývá hodnot od $0,001 \text{ m}^{-1}$ do $0,06 \text{ m}^{-1}$ v závislosti na frekvenci a relativní vlhkosti vzduchu. Obdobně se o člen $4mV$ doplní i vztah Eyringův.

Doba dozvuku souvisí s odrazy v uzavřeném prostoru, a proto lze předpokládat, že bude souviset i s odezvou na Diracův impuls. Tuto myšlenku rozvinul Schröder v šedesátých letech. Výsledkem je nejen „nová“ doba dozvuku vypočtená na základě impulsové odezvy, ale také další objektivní míry, které korelují s některými dalšími parametry uzavřených prostorů. Předpokládejme, že prostor je vybuzen akustickým Diracovým impulsem², potom z časového průběhu akustického tlaku $p(t)$ (impulsové odezvy) v daném bodě určíme dozvukový pokles akustické energie $E(t)$ podle vztahu

$$E(t) = \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau = \int_0^\infty p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau . \quad (6.7)$$

Zavedeme-li značení

$$E_t = \int_0^t p^2(\tau) d\tau , \quad (6.8)$$

můžeme pro pokles hladiny akustického tlaku odpovídající dozvukovému poklesu odvodit vztah

$$D(t) = 10 \log \left(1 - \frac{E_t}{E_\infty} \right) , \quad (6.9)$$

kde předpokládáme, že vybuzenému stavu odpovídá hladina 0 dB.

6.2.1 Měření doby dozvuku

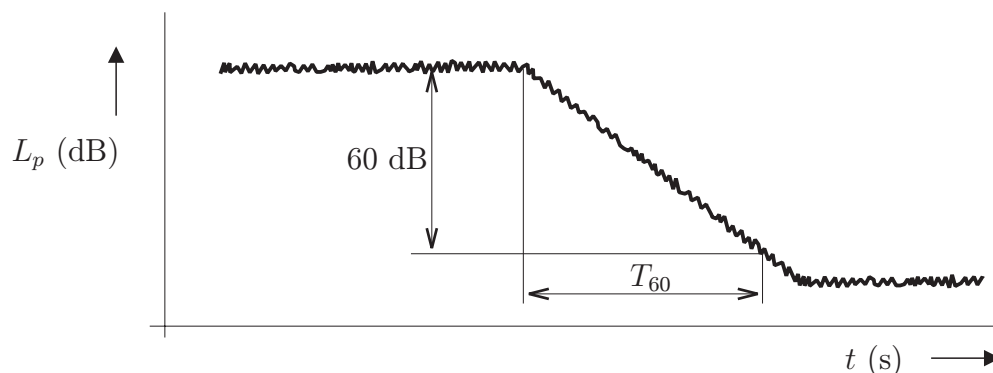
Nejdůležitější a nejdéle užívanou mírou charakterizující uzavřený prostor je doba dozvuku, která vychází ze Sabineovy teorie statistické akustiky. Doba dozvuku je definována jako

²Je třeba si uvědomit, že realizace Diracova impulsu je v akustice ještě komplikovanější než v elektrotechnice. Proto se v reálných měřeních využívá známých přechodů od jednotkového impulsu k jednotkovému skoku a dále k MLS signálům.

doba, za kterou poklesne hustota akustické energie po vypnutí zdroje zvuku v daném bodě 10^6 krát. Tomu odpovídá pokles hladiny akustického tlaku o 60 dB. Pro měření takového poklesu by bylo třeba, aby hladina akustického tlaku před vypnutím zdroje byla o více než 60 dB vyšší než hladina hluku pozadí, což není vždy reálné. Proto norma předpokládá, že se vyhodnocuje doba poklesu o 30 dB a bere se její dvojnásobek.

Uspořádání měření bude přibližně následující: Ve zkoušené místnosti umístíme zdroj zvuku (pokud možno všesměrový), který je schopen zajistit ustálenou hladinu akustického tlaku ve všech bodech prostoru nejméně o 40 dB vyšší než je hladina hluku pozadí. Polohy tohoto zdroje se volí tak, aby odpovídaly obvyklým polohám zdrojů zvuku, pro které je prostor určen (např. na jevišti divadla). Do prostoru umístíme snímací všesměrový mikrofon, jehož poloha se nejčastěji volí podle předpokládaného místa posluchače. Mikrofon však nesmí být v poli přímých vln zdroje zvuku, neboť předpokládáme existenci difúzního pole. Tato vzdálenost může být např. ve velkých divadlech i více než 15 m.

Metoda měření vycházející z definice doby dozvuku se v normě nazývá metoda přerušovaného šumu. Provádí se tak, že prostor je vybuzen šumem a po dosažení ustáleného stavu se vypne zdroj zvuku a naměří se poklesová křivka, která může mít tvar podobný, jako je znázorněn na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Průběh poklesové křivky při měření doby dozvuku

Abychom mohli postihnout frekvenční závislost doby dozvuku, používají se jako budicí signály třetinooktávové šумы v rozsahu 100 Hz až 5 kHz nebo oktávovové šумы v pásmech 125 Hz až 4 kHz.³ Pro zlepšení odstupu signálu se mikrofonní signál filtruje odpovídajícími třetinooktávovými, resp. oktávovými filtry. Po vypnutí zdroje se pokles hladiny akustického tlaku vyhodnocuje v úseku -5 dB až -35 dB vůči hladině před vypnutím.

Druhá metoda se nazývá metoda integrované impulsové odezvy a vychází ze vztahů (6.7) až (6.9). Měření impulsové odezvy může být založeno na vybuzení prostoru akustickým impulsem, avšak realizace dostatečně úzkého a zároveň vysokého impulsu je velmi obtížná⁴ (jako aproximace Diracova impulsu se používají výstřely z pistole, elektrické výboje apod.). Úspěšně však lze využít MLS (Maximum Length Sequence) signály, které jsou deterministické, ale mají dostatečně ploché spektrum podobně jako bílý šum. Odezvu

³Také je možné použít buzení různým šumem pokrývajícím zmíněná třetinooktávová pásma a následná třetinooktávová nebo oktávová analýza výsledku. Dostatečné vybuzení místnosti, aby byl dodržen požadovaný odstup signálu od hluku pozadí, je však náročnější.

⁴Spektrum Diracova impulsu je stejně ploché, jako spektrum bílého šumu. Reálné mechanické impulsy mají tím širší a plošší spektrum, čím užší je impuls.

na tyto signály lze převést na impulsovou odezvu a pomocí vztahu (6.9) a digitální filtrace získat potřebné poklesové křivky pro jednotlivá třetinooktávová pásma.

Kdyby existovalo ideální difúzní zvukové pole, stačilo by měření pro jedinou polohu zdroje zvuku a jedinou polohu mikrofonu. V reálných prostorech však mohou naměřené doby dozvuku kolísat v závislosti jak na poloze zdroje, tak na poloze mikrofonu. Polohy zdroje se volí tak, aby byly co nejlépe pokryty možné polohy budoucích zdrojů zvuku (hudebních nástrojů, herců, přednášejících a podobně). Při určování poloh mikrofonů se postupuje obdobně s tím, že je snaha postihnout hlavní rozdíly v době dozvuku v daném prostoru. Polohy mikrofonů mají být od sebe vzdáleny alespoň polovinu maximální vlnové délky (cca 2 m). Vzdálenost mikrofonu od nejbližší odrazivé plochy (včetně podlahy) nesmí být menší než čtvrtina vlnové délky (cca 1 m). Výsledky naměřené pro různé polohy mikrofonů se pro jednotlivá pásma průměrují (hovoříme o prostorovém průměrování) buď pro místnost jako celek nebo pro význačné oblasti, které jsou od sebe např. funkčně oddělené. K měření se pak přistupuje jako k opakování jednoho měření a určuje se nejen střední hodnota, ale také rozptyl, který určuje rovnoměrnost doby dozvuku ve zvukovém poli.

6.3 Postup měření

1. Pro měření se využije systém B&K PULSE. Měření se provede pro dvě polohy mikrofonů (současně). Zdrojem signálu bude širokopásmový růžový šum, zahrnující celé měřené pásmo.
2. Pro impulsní měření bude stejná konfigurace jako v minulém bodě. Jako zdroj bude použit výstřel z poplašné pistole.
3. Výsledky zpracujte graficky a porovnejte.

6.4 Seznam přístrojů a pomůcek

- B&K PULSE, typ 2825
- mikrofony B&K, typ 4190
- zesilovač DENON, PMA-655R
- reprosoustavy B&W