



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU

MEASUREMENT OF THE REVERBERATION TIME

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Hořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

BRNO 2016

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o problematice měření doby dozvuku uzavřených prostorů. V práci jsou popsány dvě metody vyhodnocení — metoda integrované impulsní odezvy a metoda přerušovaného šumu. Data byla nahrána pomocí zvukového modulu Photon+ a softwaru RT Pro 7.1. Praktickou část práce tvoří mimo jiné realizace vyhodnocovacího programu v prostředí Matlab. Hlavním výstupem práce je výpočet dozvukových křivek a doby dozvuku. Na základě zjištěných hodnot jsou metody porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

doba dozvuku, přerušovaný šum, integrovaná impulsová odezva, prostorová akustika

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with issues concerning measuring of reverberation time in closed rooms. Two evaluation methods are described in this thesis; integrated impulse response method and interrupted noise method. Data were recorded with the aid of acoustic module Photon+ and RT Pro 7.1. software. Practical part comprises implementation of evaluation programme in Matlab environment. Computation of reverberation curves is a major output of the thesis. Individual methods are compared on the basis of discovered figures.

KEYWORDS

reverberation time, interrupted noise, integrated impulse response, room acoustics

HOŘÁK, P. *Měření doby dozvuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního a inženýrství, Energetický ústav, 2016. 67 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

OBSAH

Úvod	17
1 VLASTNOSTI AKUSTICKÝCH PROSTORŮ	19
1.1 Hustota akustické energie	19
1.2 Typy zvukových polí	21
1.3 Akustická pohltivost	22
1.4 Doba dozvuku	22
1.5 Optimální doba dozvuku	23
1.6 Odstup dozvuku a poloměr doznívání	24
1.7 Difuzita zvukového pole	26
2 METODY MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	27
2.1 Metoda přerušovaného šumu	27
2.2 Metoda integrované impulsové odezvy	27
3 PODMÍNKY MĚŘENÍ	29
3.1 Přístrojové vybavení	29
3.2 Prostorové podmínky	29
3.3 Kmitočtový rozsah měření	30
3.4 Počet měření	31
4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	33
4.1 Dozvukové křivky	33
4.1.1 Výpočet zpětnou integrací	33
4.1.2 Výpočet integrací časových úseků	34
4.2 Lineární regrese	34
4.3 Průměrné hodnoty měření	35
4.4 Nejistoty měření	35
4.4.1 Metoda přerušovaného šumu	36
4.4.2 Metoda impulsní odezvy	36
4.5 Shrnutí metod vyhodnocování	36
5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	37
5.1 Schematické znázornění algoritmu měření	37
5.2 Měření pomocí Photon+	37
5.3 Nastavení spouštěcích podmínek	39
5.4 Popis místnosti	39

6	ALGORITMUS VYHODNOCENÍ	41
6.1	Filtrace naměřeného signálu	41
6.2	Určení počátku a průběhu dozvukové křivky	41
6.2.1	Metoda impulsové odezvy	41
6.2.2	Metoda přerušovaného šumu	42
6.3	Realizace výpočetního programu v Matlabu	43
6.3.1	Metoda zpětné integrace	43
6.3.2	Metoda integrace časových úseků	44
6.3.3	Regresní analýza integrované impulsové odezvy	45
6.3.4	Regresní analýza metody přerušovaného šumu	46
7	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	47
7.1	Porovnání vyhodnocení pomocí RT_{20} a RT_{30}	47
7.2	Porovnání absolutních časů obou metod	48
7.2.1	Odchylky metod	49
7.2.2	Stupeň křivosti C	50
7.3	Shrnutí základních poznatků experimentů	52
8	Závěr	53
	Literatura	55
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	57
	Seznam příloh	59
	A Půdorys místnosti učebny	61
	B Nejistoty měření	63
	C Dozvukové křivky v kmitočtových pásmech	65
	D Obsah přiloženého CD	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Průběh názvuku a dozvuku. [3]	20
1.2	Typy akustických polí v uzavřeném prostoru. [5]	21
1.3	Doba dozvuku.[5]	23
1.4	Optimální doba dozvuku.[4]	24
5.1	Blokové schéma algoritmu měření	37
5.2	Prostředí programu RT Pro 7.1. Na obrázku je znázorněno okno, kde se nastavují spouštěcí podmínky (trigger). V pozadí je zobrazení naměřeného signálu. Spodní polovina je adresář, kde se ukládají naměřené data.	38
6.1	Vyhodnocené průběhy pomocí Schröderovy integrace.	42
6.2	Vyhodnocené průběhy pomocí integrace časových průběhů.	43
6.3	Demonstrace regresní analýzy (RT_{20}) - Schröderova metoda.	45
6.4	Demonstrace regresní analýzy (RT_{20}) - metoda přerušovaného šumu.	46
7.1	RT_{20} a RT_{30} – metoda přerušovaného šumu.	47
7.2	RT_{20} a RT_{30} – impulsní metoda.	47
7.3	Porovnání RT_{20} a RT_{30} obou metod (laboratoř).	48
7.4	Porovnání RT_{20} a RT_{30} obou metod (studio Indies).	49
7.5	Procentuální chyba u dat ze školní laboratoře. Modrá křivka je rozdíl RT_{20} vyhodnocené šumovou a impulsní odezvou. Tentýž rozdíl je i pro červenou křivku zaznamenávající rozdíl RT_{30} .	49
7.6	Procentuální chyba u dat z nahrávacího studia Indies. Modrá křivka je rozdíl RT_{20} vyhodnocené šumovou a impulsní odezvou. Tentýž rozdíl je i pro červenou křivku zaznamenávající rozdíl RT_{30} .	50
7.7	Stupně křivosti šumové metody.	51
7.8	Stupně křivosti impulsové metody.	51
A.1	Půdorys místnosti učebny	61
B.1	Velikost nejistot měření v laboratoři podle normy [7].	63
B.2	Velikost nejistot měření ve studiu Indies podle normy [7].	63
C.1	Demonstrace regresní analýzy pro pásmo 4000 Hz (RT_{20}).	65
C.2	Demonstrace regresní analýzy pro pásmo 500 Hz (RT_{20}).	65
C.3	Demonstrace regresní analýzy pro pásmo 4000 Hz (RT_{20}).	66
C.4	Demonstrace regresní analýzy pro pásmo 4000 Hz (RT_{20}).	66

SEZNAM TABULEK

4.1	Shrnutí vyhodnocovacích postupů	36
5.1	Základní údaje prostoru	40
5.2	Minimální vzdálenosti míst mikrofonů	40
5.3	Počet poklesů a míst mikrofonů	40

ÚVOD

Jednou ze základních akustických charakteristik uzavřeného prostoru je doba dozvuku. Její hodnota je ovlivňována mnoha faktory — např. materiálem stěn, objemem prostoru, geometrií stěn, vzájemným poměrem délek stěn a celkovou koncepcí architektonického řešení prostoru. Neméně významným faktorem jsou překážky, které jsou v místnosti obsaženy a v běžných obytných prostorech zaujímají významnou část prostoru. Pokud se zaměříme na prostory určené k reprodukci hudby či řeči, zde je navíc důležitým činitelem v prostoru člověk — posluchač.

Každý prostor je ve své podstatě jiný — samozřejmě za předpokladu neunifikovaných staveb. Diverzita je tak významná, že ke každému akustickému řešení místnosti musíme přistupovat konkrétně, pokud chceme docílit obstojných, normativně správných výsledků. Prostorová akustika je speciálním případem šíření fyzikálního vlnění v prostoru, kdy se k fyzikálnímu charakteru zvukového vlnění přidává ještě subjektivní vnímání člověka, jehož vjemy toto fyzikální šíření vln vyhodnocují a mají z něj pocit. Vlastně pocit je jediným měřítkem prostoru, který by měl každého akustika zajímat — tato disciplína vznikla totiž hlavně v zájmu o zkvalitnění ať už životních a pracovních prostor, či zvukových podmínek pro poslech hudby. K dosažení správného „pocitu“ jsou zapotřebí znalosti prostorových zákonitostí, kterými lze změnit prostorovou akustiku vyhovující svým účelům a splňující vhodné prostorové podmínky pro člověka. Jelikož byl na správnou dobu dozvuku vytvořen určitý konsenzus, všechny předpoklady správně řešeného prostoru jsou v příslušných normách.

Naším hlavním předmětem zkoumání bude měření doby dozvuku, což je jednou z důležitých činností v řetězci návrhu a úpravy akustiky prostoru. Vhodně zvolené měřicí metody nám řeknou, co slyšíme a napomůžou nám zkontrolovat navrženou akustiku prostoru. Ač v dnešní době existuje nepřeborná řada simulačních programů, které lze při návrhu použít, měření je doposud jediným způsobem, jak zjistit reálné podmínky.

Tato práce pojednává o použití dvou klasických metod při určování doby dozvuku. V první části jsou teoreticky zpracovány informace, které jsou podstatnými činiteli při ovlivňování doby dozvuku. Je zde dán prostor i subjektivnímu vnímání doby dozvuku a jejím doporučeným hodnotám pro různé typy reprodukce. Navazující části popisují podmínky měření, postup měření a vyhodnocení. Práce je zaměřena na samotný proces měření. Jde hlavně o osvojení metody měření pomocí zvukového modulu a příslušných doplňkových přístrojů. Jelikož software, který je přiložen ke zvukovému modulu nám neumožňuje dosáhnout požadovaného typu vyhodnocení, rozhodli jsme se pro vytvoření vlastního programu v prostředí Matlab. Volba je zdůvodněna v části, která se věnuje praktickému měření. Závěr práce patří analýze

výsledků dvou metod, kterými se zabýváme — tedy metody integrované impulsové odezvy a metody přerušovaného šumu. Jelikož každá metoda má svá specifika — tedy specifické podmínky měření i vyhodnocování — bude porovnání metod relevantní k celkové správnosti obou typů měření.

1 VLASTNOSTI AKUSTICKÝCH PROSTORŮ

Pro popis šíření akustické energie v prostoru existují 3 základní pojetí akustiky. Vlnová akustika - ta využívá základní vztahy vlnové teorie šíření zvuku v uzavřeném prostoru. Dalším pojetím je z hlediska geometrie, tedy geometrická akustika. Využívá základních pravidel o šíření vln a paprsků a aplikuje je na uzavřený prostor. [1]

Pro tuto práci bude nejpodstatnější poslední pojetí akustiky – statistická akustika. Základem této teorie je předpoklad stejné intenzity zvuku ve všech bodech prostoru. Využívá statických metod k popsání akustických jevů.

1.1 Hustota akustické energie

Akustická pole z hlediska statistické akustiky jsou popsána především pomocí energie. Nutné předpoklady z hlediska energetického jsou následující (převzato a zkráceno podle Kolmera [2]):

1. Velikost zvukové energie v libovolném bodě v uzavřeném prostoru je dána součtem středních hodnot energie, která do uvažovaného bodu dospěla vlivem odrazů od stěn.
2. Hustota zvukové energie je ve všech bodech prostoru stejně veliká.
3. Úhly, pod kterými dopadá zvuková energie do daného bodu jsou zastoupeny se stejnou pravděpodobností.

Pro vyjádření hustoty zvukového pole využijeme zákon zachování zvukové energie

$$P = V \frac{d\omega}{dt} + P_S, \quad (1.1)$$

kde P je výkon zdroje, V je objem prostoru, $d\omega/dt$ je změna hustoty akustické energie v prostoru za čas a P_S je výkon, který je pohlcován stěnami.

Pro vyjádření P_S použijeme již odvozených vztahů z [2], které byly odvozeny na základě geometrických zákonitostí šíření zvukové energie z objemového elementu dV do prostoru

$$P_S = \alpha S \frac{\omega c_0}{4}, \quad (1.2)$$

kde α je průměrný činitel zvukové pohltivosti, S je celková plocha ohraničujících stěn, c_0 rychlost zvuku a ω je námi hledaná hustota.

Zpětným dosazením do (1.1) dostaneme vztah

$$P = V \frac{d\omega}{dt} + \alpha S \frac{\omega c_0}{4}, \quad (1.3)$$

který dále separací proměnných a následnou integrací upravíme na tvar

$$\alpha S \frac{c_0}{4V} t = \ln \left(1 - \alpha S \frac{c_0 \omega}{4P} \right). \quad (1.4)$$

Po odlogaritmování a následné úpravě vyjádříme rovnici pro časovou závislost hustoty akustické energie v místnosti v názvukové oblasti

$$\omega = \frac{4P}{\alpha S c_0} \left[1 - \exp\left(-\alpha S \frac{c_0}{4V} t\right) \right]. \quad (1.5)$$

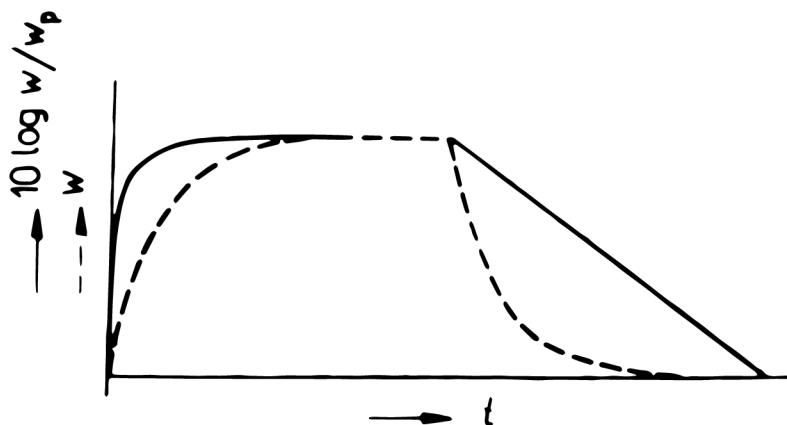
Pokud tedy hledáme hustotu energie v ustáleném stavu, je to okamžik kdy bude $t \rightarrow \infty$. Hodnota pro ustálený stav se blíží asymptotě této funkce, tedy hodnotě

$$\omega = \frac{4P}{\alpha S c_0}. \quad (1.6)$$

Tato hodnota hustoty zvukové energie trvá pouze po dobu zapnutého zdroje zvuku. Po vypnutí zdroje dojde k dozvuku. Dozvukové chování energie je opět exponenciální, oproti názvuku ale bude klesat

$$\omega = \frac{4P}{\alpha S c_0} - \exp\left(-\alpha S \frac{c_0}{4V} t\right). \quad (1.7)$$

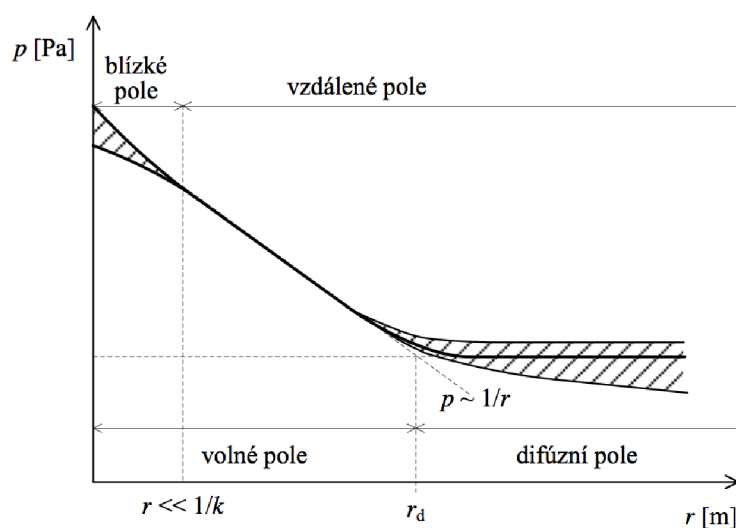
Grafické znázornění lze vidět na obr. 1.1, na němž je patrné, že pro posouzení akustických vlastností prostoru je důležitější dozvukový pokles, nežli názvukový. Plná čára značí průběhy názvuku a dozvuku vztaženy k maximální hladině energie ω_p vyjádřené v logaritmické míře. Čárkovaná značí reálný exponenciální pokles energie. [3]



Obr. 1.1: Průběh názvuku a dozvuku. [3]

1.2 Typy zvukových polí

Vlastnosti zvukového pole se mění v souvislosti se vzdáleností zdroje akustického signálu. V jeho blízkosti vzniká tzv. blízké pole (Fresnelův prostor), vyznačující se nehomogeností — dochází k podstatným změnám akustického tlaku při změnách polohy v poli. Opačným případem je difúzní pole, které je složeno z odražených i přímých vln. V této oblasti je průměrná hladina akustického tlaku téměř neměnná, tedy závislost na vzdálenosti tady neplatí (viz obr. 1.2).



Obr. 1.2: Typy akustických polí v uzavřeném prostoru. [5]

Mezi těmito poli je průběh poklesu akustického tlaku lineární a hodnota akustického tlaku klesá o 6 dB při každém dvojnásobení vzdálenosti. Tyto vlastnosti odpovídají vzdálenému volnému poli. Místo přechodu mezi volným a difúzním polem je charakteristické rovností hustot akustické energie dopadajících a odražených vln. Tato vzdálenost úzce souvisí s poloměrem doznívání (viz kapitola 1.6). [2, 5]

Pokud chceme popsat změny hodnot akustického tlaku matematicky, dostaneme funkční závislost

$$L = L_P + 10 \log \left(\frac{Q_z}{\pi r^2} + \frac{4}{R} \right), \quad (1.8)$$

kde $L_P = 20 \log(p) + 94$ je hodnota hladiny akustického tlaku vzhledem k referenční hodnotě $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, $L_P = 10 \log P + 120$ je hladina vyzařovaného akustického výkonu vzhledem k referenční 10^{-12} W, Q_z je činitel směrovosti zdroje (viz. kapitola 1.6), $R = S\alpha/(1 - \alpha)$ je konstanta uzavřeného prostoru a r je proměnná vzdálenost od zdroje. [2]

1.3 Akustická pohltivost

Schopnost prostoru absorbovat určitou část akustického výkonu zvukových vln se nazývá akustická pohltivost. Veličina, která vyjadřuje míru absorpce je činitel akustické pohltivosti. [1]

Přítomnost pohltivosti, jako přirozené vlastnosti materiálů v akustickém prostoru, ovlivňuje dobu dozvuku.

Činitel zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti vyjadřuje poměr mezi akustickou energií W_{absorb} , která je absorbována plochami prostoru, a akustickou energií W_{dop} , která na tyto plochy dopadá. Pro činitel zvukové pohltivosti tedy můžeme zapsat

$$\alpha = \frac{W_{absorb}}{W_{dop}}. \quad (1.9)$$

Hodnoty činitele se pohybují od 0 do 1. Materiály ideálně odrazivé mají tuto hodnotu $\alpha = 0$, zatímco ideálně pohltivé materiály mají hodnotu činitele $\alpha = 1$. [3]

Mechanismus pohlcování

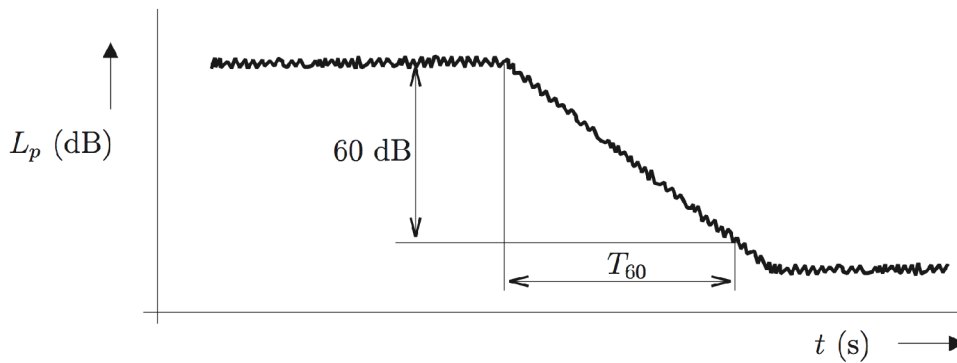
Pohlcování zvuku pokládáme za přeměnu zvukové energie v jinou formu, přičemž tento proces je nevratný. Transformace zvukové energie vzniká buďto třením (pohyb částic kolem plochy), poklesem akustického tlaku nebo nepružnou deformací těles, konkrétně tedy rozkmitáním plochy. [2]

Kmitočtová závislost

Pohltivost je frekvenčně závislá veličina. Každý materiál má svoji míru pohltivosti, respektive odrazivosti, různou na jednotlivých frekvencích v daném kmitočtovém rozsahu.

1.4 Doba dozvuku

Při buzení prostoru zvukovým zdrojem dochází k absorpci zvukové energie stěnami místnosti, avšak tento úbytek hustoty je nepřetržitě doplňován do stavu původního — dochází k ustálení hustoty zvukové energie na určité hodnotě. Po vypnutí zdroje zvuku nastává pokles této hustoty až do stavu, kdy její hodnota klesne na minimum — tento pokles nazýváme dozvuk. Dozvuk je časově závislý, přičemž doba za kterou jeho hodnota poklesne na 10^{-6} původní hodnoty je označována jako dobu dozvuku. V decibelové stupnici se jedná o pokles 60 dB — viz obr. 1.3. [2]



Obr. 1.3: Doba dozvuku.[5]

Příčinou dozvuku, jakožto nezbytné vlastnosti každého uzavřeného prostoru, je odraz zvukových vln od stěn a jejich následný útlum. Velikost útlumu je závislá na činiteli pohltivosti. Dobu dozvuku tedy můžeme ovlivnit pomocí více parametrů — volbou vhodných rozměrů místnosti, vhodných materiálů, geometrií, tvarem prostoru a dalších.

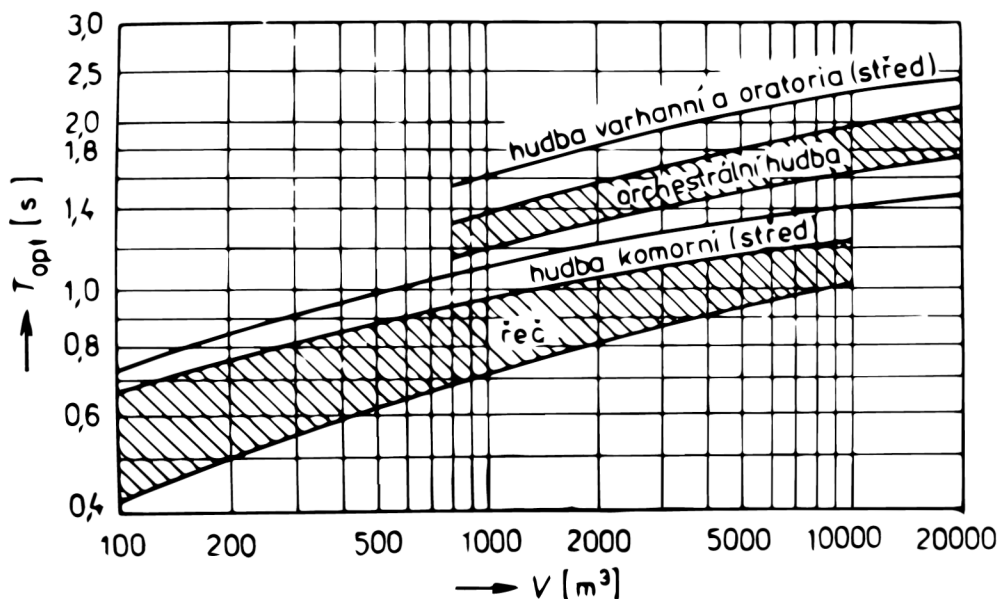
Doba dozvuku je závislá na frekvenci — závislost se odvíjí podle typu místnosti. Tato nehomogenita je způsobena jednak vlastními kmity prostoru ale hlavně materiálem stěn a dalších prvků v prostoru (viz kap.1.3). Frekvenční závislost je při měření vyhodnocována v oktávních pásmech a jejich zlomcích. Podrobněji roze-psáno v kapitole 4.

1.5 Optimální doba dozvuku

Doba dozvuku je faktorem, který významně ovlivňuje subjektivní vnímání akustických signálů. Dlouhá doba dozívání (nad 3 s) negativně působí na posluchače a akustický hudební signál zní „rozmazané“. Příliš krátká doba dozvuku působí na posluchače naopak „suše“. Reprodukce hudby a reprodukce mluveného slova mají svá specifika, které nelze sjednotit.

Zavádí se proto tzv. optimální doba dozvuku, která pro každý typ reprodukce má jiné rozmezí doporučených hodnot. Tyto hodnoty jsou také závislé na velikosti místnosti, kdy se zvětšujícím objemem hodnota doby dozvuku lehce roste — viz obr. 1.4.

Kmitočtový charakter doby dozvuku by měl být stálý, tedy všechny spektrální složky signálu budou dozívát podobně. Tento předpoklad není však nutno dodržet, prakticky je ve většině případů nedodržitelný. Ve velkých sálech je z praxe známé zvýšení doby dozvuku až o 50 % oproti pásmům vyšších frekvencí. Takové zvýšení však díky menší citlivosti a rozlišovací schopnosti lidského sluchu na nízkých frekvencích nepůsobí nijak rušivě a je možno proto odchylku na nízkých pásmech



Obr. 1.4: Optimální doba dozvuku.[4]

připustit. U velkých prostorů stejně tak dochází ke značné absorpci zvukové energie na vysokých kmitočtech a doba dozvuku se tímto zkracuje. Na tento pokles je lidský sluch navyklý a kratší doba dozvuku na vysokých kmitočtech se jeví dokonce jako žádoucí.

1.6 Odstup dozvuku a poloměr doznívání

Pokud vyjádříme podíl přímé hustoty akustické energie a hustoty akustické energie v dozvukovém poli dostaneme

$$R = \frac{\omega_p}{\omega_d} = \frac{\frac{P}{4\pi r^2 c_0}}{\frac{4P}{Ac_0}}. \quad (1.10)$$

Rovnici upravíme a za celkovou pohltivost prostoru dosadíme $A = 0,161V/T$ dostaneme vztah

$$R = 3,203 \frac{V}{r^2 T}, \quad (1.11)$$

jehož vyjádřením v logaritmické míře dostaneme odstup dozvuku

$$D = 10 \log R = 10 \log \left(3,203 \frac{V}{r^2 T} \right). \quad (1.12)$$

Další veličinou, která souvisí s dobou dozvuku je poloměr doznívání, který plyne z rovnosti $\omega_p = \omega_d$

$$\frac{P}{4\pi r_d^2 c_0} = \frac{4P}{Ac_0}. \quad (1.13)$$

Po úpravě dospějeme ke vztahu $r_d^2 = A/16\pi$. Po dosazení $A = 0,161V/T$ a následném odmocnění získáváme poloměr doznívání v závislosti na době dozvuku a objemu

$$r_d = 0,0566\sqrt{\frac{V}{T}}. \quad (1.14)$$

Poloměr doznívání je kritická hodnota vzdálenosti od zdroje, kdy se hustota akustické energie vyzařované přímo ze zdroje rovná hustotě energie odraženého zvuku. Tato hodnota je velmi důležitá při umístění posluchače či mikrofону v prostoru.

Veličina *odstup dozvuku* (1.12) udává pokles hladiny, respektive zesílení v decibelové stupnici, kdy pro $r = r_d$ je $D = 0$.

Tyto vztahy platí jen při všesměrovém šíření. Jelikož v praxi téměř nikdy není zdroj všesměrový, zavádí se tzv. činitel směrovosti Q_z , jehož hodnota odpovídá převrácené hodnotě zlomku pomyslné koule, jakožto obálky bodového zdroje. Například pokud je všesměrový zdroj umístěn uprostřed rovinné plochy, jeho směr vyzařování má tvar polokoule a hodnota činitele směrovosti je převrácená hodnota 1/2, tedy $Q_z = 2$. Pro styk dvou stěn je to 1/4 koule, tedy $Q_z = 4$ a pro roh, tedy styk tří stěn $Q_z = 8$. Pokud tedy uvažujeme směrové šíření zvuku, vyjádření poloměru bude pozměněno konstantou Q_z následovně

$$r_d = 0,0566\sqrt{\frac{VQ_z}{T}} \quad (1.15)$$

a pro odstup dozvuku

$$D = 10\log\left(3,203\frac{VQ_z}{r^2T}\right). \quad (1.16)$$

V praktických situacích je znalost těchto dvou veličin důležitou součástí poznatků o difuzním poli. Hodnoty poloměru doznívání se například používají při snímání hudebních nástrojů, kdy umístění mikrofónu v prostoru hraje důležitou roli ve výsledném zvuku. Při kontaktním snímání nástrojů se využívá vzdálenost $r < r_d$, zatímco při ambientním snímání naopak vzdálenosti $r > r_d$. [3]

1.7 Difuzita zvukového pole

Difuzita zvukového pole nám popisuje aktuální rozložení intenzity zvukového pole. Rozložení je v ideálním modelu rovnoměrné, nicméně v reálném prostředí dochází ke vzniku stojatých vln, které tuto homogenitu narušují. Nestejnoměrnost zapříčiňuje nelinearitu dozvukových křivek v logaritmickém měřítku.

Kolmer tvrdí: *„Dosažení dostatečné difuzity je vázáno na vhodnou volbu tvaru ohraničujících stěn navrhovaného prostoru a na jejich poměru rozměrů místnosti.“* [4]

Potřebné rozložení hustoty pole se tedy může upravit volbou nerovnoběžných stěn, členitostí stěn a eliminací dalších prvků, které mohou přispívat k soustředování zvukových vln.

2 METODY MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU

Pro měření doby dozvuku existují různé metody, z nichž každá má svá specifika. Jedná se například o měření metodou přerušovaného šumu a metodou integrované impulsové odezvy — s těmito způsoby získávání a vyhodnocování dat pracuje norma EN ISO 3382-2, která bude při našem měření použita.

2.1 Metoda přerušovaného šumu

Tato metoda je založena na generování pseudonáhodného šumu, který je vybuzen u měření RT_{20} ¹ na hladinu nejméně 35 dB nad hladinou hluku pozadí. U měření RT_{30} ² je tato hodnota 45 dB. [7]

Měření doby dozvuku probíhá v oktávových pásmech nebo v jejich zlomcích. V naší práci používáme konkrétně třetinooktávové pásma — podle normy se jedná o inženýrskou metodu. Při použití tohoto typu pásem je požadavek růžového šumu. Tento typ šumu má rovnoměrně rozloženou energii v jednotlivých pásmech. Spektrální hustota tedy klesá s rostoucí frekvencí přímou měrou a to o 3 dB na oktávu. Přímá úměrnost je vyjádřena v závislosti na frekvenci jako $1/f$.

Bavíme-li se o době buzení prostoru, doporučuje se minimálně $RT_{60}/2$ sekund — platí pouze pro menší prostory. U větších prostorů je to alespoň v řádech sekund.

2.2 Metoda integrované impulsové odezvy

U měření metodou integrované impulsové odezvy jako zdroj signálu volíme určitý typ ruchového signálu — výstřel z pistole, prasknutí balonu, přeladovaný harmonický signál a jiné. Podobně poslouží jakýkoliv zdroj hluku, který sám nedoznívá a jeho vyzařované spektrum je dostatečně široké na to, aby splnilo podmínky měření. [7] Podmínkami měření se podrobněji zabýváme v kapitole 3 .

V některých případech může nastat situace, že budou vybuzeny neuspokojivé hodnoty hladin akustických tlaků v jednotlivých oktávových pásmech. Zdroj impulsu vyzařuje sice v celé šíři měřeného spektra, avšak v určitých pásmech jsou hodnoty malé a poklesové křivky nelze vyhodnotit — dokonce ani v malých místnostech. Hodnoty vyzařované energie jsou kritické hlavně na spodních kmitočtech, kdy se obtížně budí hlavně větší prostory. Může nastat situace, že prostor nebude dostatečně vybuzen a dozvuková křivka nepůjde vyhodnotit. Za dostatečné vybuzení

¹ RT_{20} je časový úsek, který vyjadřuje pokles hladiny akustického tlaku o 20 dB, přičemž platí, že vyhodnocovaná doba dozvuku $RT_{60} = 3RT_{20}$.

² RT_{30} souvisí s poklesem hladiny akustického tlaku o 20 dB, přičemž platí, že vyhodnocovaná doba dozvuku $RT_{60} = 2RT_{30}$.

prostoru považujeme, stejně jako u metody přerušovaného šumu, dosažení hodnoty 45 dB nad hodnotou hluku pozadí (RT_{30}) a 35 dB u vyhodnocování RT_{20} .

3 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Samotný proces měření má své specifika, které je nutno dodržet. Mezi ně se řadí například hodnota hladiny akustického tlaku, kmitočtový rozsah, místa měření a počet měření. Přístroje použity k tomuto účelů musí také splňovat určitá kritéria — charakteristiky mikrofonu, směrové charakteristiky reproduktorů a podobně. Všechny informace jsou k nalezení v příslušných normách, konkrétně v [7, 8].

3.1 Přístrojové vybavení

Jako **zdroj zvuku** je při metodě přerušovaného šumu doporučen zdroj všesměrového charakteru. Hladina akustického tlaku generovaná tímto reproduktorem by měla být ustálená ve všech bodech místnosti na stejné úrovni. V našem případě jsme použili 2 směrové zdroje¹. V našem případě se nejedná o přesné určení doby dozvuku, ale o demonstraci měření — v tomto ohledu je zdroj dostačující.

Mikrofon umístěný v prostoru by měl mít taktéž všesměrový charakter. Maximální průměr membrány je 14mm. V našem měření jsme použili 1/2"mikrofon² od Brüel&Kjaer.

Signály jsou zpracovávány **zvukovým modulem**³, kterým je záznam nahráván na harddisk počítače.

Programové prostředí, stejně jako mikrofon a zvuková karta, je od firmy Brüel&Kjaer. K zvukovému modulu byl dodán software RT Pro, kterým jsme provedli záznam dat a následný export do formátu WAV.

Při měření pomocí metody integrované impulsní odezvy nepoužíváme jako zdroj akustického signálu reproduktor, ale mechanický ráz. Při našem měření jsme se rozhodli použít prasknutí nafouknutého balonu. Podmínkou je opět, aby i tento typ zdroje produkoval takovou hladinu akustického tlaku, která ve všech oktávových pásmech dosáhne hodnoty alespoň 45 dB, respektive 35 dB nad hlukem pozadí. Ostatní přístrojové vybavení — tedy mikrofon a zvuková karta — zůstávají i na tento typ experimentu stejné.

3.2 Prostorové podmínky

Zvukový zdroj se umístí 1,2 metru nad podlahu. Při umístění mikrofonů dbáme na minimální vzdálenost od zdroje zvuku, která je vyjádřena pomocí rychlosti zvuku

¹Behringer Truth B2031A

²Mikrofon se zabudovaným předzesilovačem od Brüel&Kjaer. Typ mikrofonu: 4189-A-021

³Zvukový modul Photon+

c_0 , objemu místnosti V a předpokládané doby dozvuku T

$$d_{min} = 2\sqrt{\frac{V}{c_0 T}}. \quad (3.1)$$

Dobu dozvu T můžeme odhadnout pomocí Millingtonova vztahu

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)}, \quad (3.2)$$

kde S_i je plocha i -té stěny a α_i je koeficient pohltivosti dané stěny.

Vzdálenost mikrofonu od zdroje je určována kvůli možnému přebuzení měřící aparatury přímými vlnami, které mají při blízké vzdálenosti intenzitu vyšší, nežli zbytek zvukového pole. Místa zdroje by měly být alespoň 2.

Vzdálenost mikrofonu k nejbližší stěně by neměla být menší než je čtvrtina nejdelší vlny vybuzené v prostoru, což při našem kmitočtovém rozsahu znamená přibližně 1 metr. Jelikož jsou určeny podle normy alespoň 2 místa měření, musíme při umístění mikrofonů dbát na výše uvedené podmínky. Vzdálenost mezi místy jednotlivých měření by neměla být menší než polovina největší vlnové délky – při našem kmitočtovém rozsahu (viz 3.3) jsou to cca 2 metry. Při umístění mikrofonu v prostoru musíme dodržet i určitý počet míst měření – inženýrská metoda vyžaduje 6 kombinací zdroj–mikrofon. Je tedy třeba provést minimálně 12 měření. My jsme volili 4 místa po 2 měřeních na každou pozici zdroj–to je 16 měření.

Při symetrickém půdorysu místnosti bychom se měli vyvarovat symetrickému umístění mikrofonů. Pokud se jedná o místnost, kde je předem známý zdroj zvuku, umístíme reproduktor přibližně do stejného místa [7, 8]. Na znázornění půdorysu místnost (viz.A.1) je patrné, že jsme se při našem měření snažili vyhnout symetrickému umístění mikrofonů.

3.3 Kmitočtový rozsah měření

Jako budící signály jsou při našem měření použity růžový šum a prasknutí balonu. Vyhodnocování dozvukových křivek bude probíhat v třetinooktávových pásmech. Pro tento typ analýzy norma udává požadovaný kmitočtový rozsah 100 Hz až 5 kHz. Požadovaného vyhodnocovacího rozsahu dosáhneme použitím třetinooktávových filtrů ve výpočetním prostředí Matlab. Krajní frekvence třetinooktávové analýzy budou mít hodnoty 88 Hz a 5657 Hz.

Růžový šum tyto hodnoty splní vždy, jelikož jeho rozsah je počítačově generovaný. U „balónové“ metody je tato podmínka hůře splnitelná. Prasknutí má za následek vyzáření frekvencí v celé šíři kmitočtového rozsahu, nicméně v každém

třetinooktávovém pásmu je vybuzena různá hladina akustického tlaku. Proto si musíme při této metodě pohlídat, abychom v každém pásmu dostali špičkovou hodnotu akustického tlaku, která bude 45dB nad změřeným hlukem pozadí.

3.4 Počet měření

Kvůli náhodnosti, která je obsažena v obou typech našeho signálu nedostaneme pokaždé stejné podmínky měření. Proto volíme v každém místě více měření, čímž eliminujeme tyto náhodnosti. Podle 4.3 tyto měření zprůměrujeme a dostaneme průběh pro dané místo.

4 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

K vyhodnocování dat bylo použito základních matematických operací, které se běžně používají pro vyhodnocování akustických signálů. Zásadní kroky vysvětlíme v následujících částech práce.

4.1 Dozvukové křivky

Dozvuková křivka je definována jako časová závislost hodnot akustického tlaku poté co byl vypnut zdroj zvuku. Doba dozvuku, jako teoretický čas který je vztažen k poklesu o 60 dB, se v praxi nahrazuje měřením doby dozvuku RT_{30} , která souvisí s poklesem o 30 dB. Při špatných podmínkách (např. vysoká hladina hluku pozadí) a i kvůli jiným důvodům je často používána i RT_{20} , související s poklesem o 20dB. Poté je doba dozvuku vypočítána jako dvakrát, respektive třikrát delší doba, než kterou jsme naměřili. [10]

Takové vztažení doby dozvuku ke kratším úsekům vzešlo především z praktických zkušeností, které hovoří o tzv. počáteční době dozvuku. Ta je důležitá z hlediska lidského vnímání dozvuku — tento počátek má totiž rozhodující vliv na celkové vnímání zvukového signálu, nehledě na to, jaký průběh má křivka posléze. Z teoretických předpokladů sice vyplývá ryze lineární pokles, v reálných prostorech je ale tohle chování ovlivněno mnohými faktory, které zapříčiňují odchylky od lineárního charakteru.

4.1.1 Výpočet zpětnou integrací

K výpočtu se používá tzv. zpětná Schröderova integrace. Ta patří mezi základní matematické operace, které používáme k vyhodnocování dozvukových křivek naměřených metodou impulsní odezvy. Schröder teoreticky odvodil postup integrace z Diracova impulsu $\delta(t_2 - t_1)$ a po úpravách, kdy uvažoval stav po vymizení Diracova impulsu, dostal vztah

$$D(t) = N \int_t^T h^2(\tau) d\tau, \quad (4.1)$$

kde N je výkon vybuzeného signálu, $h(\tau)$ je impulsová odezva prostoru. [11]

Pokud tedy uvažujeme vzorek dlouhý T s počátkem integrace v 0 a hladinu hluku pozadí, kdy už dobu dozvuku nechceme vyhodnocovat, uvažujeme od t do T , poté dostaneme

$$D(t) = N \int_0^T h^2(\tau) d\tau - N \int_t^T h^2(\tau) d\tau, \quad (4.2)$$

což platí pro oblast, kterou vyšetřujeme. Tento výraz se následně převede do logaritmického měřítka, a získáme tak pokles v decibelech. Abychom získali hodnoty poklesu v záporných číslech, tedy pokles o hodnotu v dB od teoretické nuly, při které je hodnota akustického tlaku maximální, je nutno výraz vynásobit mínus jedna

$$L(t) = 10 \log \left(\frac{\int_t^T h^2(\tau) d\tau}{\int_0^T h^2(\tau) d\tau} \right) \text{ [dB]}. \quad (4.3)$$

Metoda má své výhody v její možnosti aplikování na okamžité hodnoty impulsové odezvy, respektive na okamžité hodnoty napětí.

4.1.2 Výpočet integrací časových úseků

U metody přerušovaného šumu využíváme časovou integraci ve zvoleném časovém rozmezí. U této metody je tento způsob získávání dozvukových křivek upřednostňován. Hodnoty integrujeme po částech dlouhých od

$$p(t) = \int_t^{t+\Delta t} u(\tau)^2 d\tau, \quad (4.4)$$

kde t je časový počátek integrovaného úseku, Δt je délka integrovaného úseku a $u(\tau)$ je průběh napětí naměřeného mikrofonom.

pro vyjádření v logaritmické stupnici je vztah následovný

$$L(t) = 10 \log \left(\frac{p(t)}{p_{max}} \right) \text{ [dB]}, \quad (4.5)$$

kde $p(t)$ je průběhu tlaků získaný pomocí 4.4 a p_{max} je maximální tlak vypočítaného průběhu 4.4.

Tento výsledný signál je obvykle přímo vytvářen v paměti akustického analyzátoru. U Photon+ měříme průběh okamžitého napětí a tento postup musíme naprogramovat ve vyhodnocovacím programu.

4.2 Lineární regrese

Lineární regresi používáme k vyhodnocení sklonu dozvukové křivky, kterou jsme získali Schröderovou metodou nebo integrací časových úseků. Regresi rozumíme přímkou, která je vyjádřena pomocí

$$L_i = a + bt_i, \quad (4.6)$$

kde a je maximální hodnota přímky v čase 0, b je sklon regresní přímky a t_i je i -tý časový vzorek v sekundách.

4.3 Průměrné hodnoty měření

Průměrování měření

Průměrné hodnoty doby dozvuku lze vypočítat dvěma způsoby. Prvním způsobem je zprůměrování hodnot určených pomocí křivek poklesů a vytvoření střední hodnoty doby dozvuku. Tento typ průměrování budeme používat při výpočtu doby dozvuku naměřené pomocí metody přerušovaného šumu.

$$T = \sum_{i=1}^n T_i, \quad (4.7)$$

kde T_i jsou hodnoty dob dozvuku vyhodnocených v n třetiooktávových pásmech.

Druhým způsobem je vytvoření skupinového průměru poklesu kvadrátů akustického tlaku. Při této metodě jsou sčítány hodnoty kvadrátů akustického tlaku v určitých časových intervalech a z těchto součtů kvadrátů je následně vyhodnocena poklesová křivka a doba dozvuku.

$$L(t) = \frac{\sum_{i=1}^n L_i(t)}{n}, \quad (4.8)$$

kde $L_i(t)$ jsou časové průběhy hladin akustického tlaku vyhodnocených v n provedených měřeních. Tohle vyhodnocení probíhá pro každé třetiooktávové pásmo zvlášť.

Tato metoda je v normě upřednostňována a je vhodná pro metodu impulsové odezvy, kdy máme sjednocený počátek impulsu. Tuto metodu nelze použít u metody přerušovaného šumu, jelikož tam je podmínka sjednocení počátku, v tomhle případě daného vypnutím zdroje, neproveditelná. Zdroj totiž nevypínáme ve stejném časovém okamžiku při jednotlivých měřeních.

4.4 Nejistoty měření

Pro každou metodu norma udává výpočet absolutních velikostí nejistot. Výsledné nejistoty měření jsou uvedeny v příloze B.

4.4.1 Metoda přerušovaného šumu

Při této metodě je nejistota závislá především na náhodném generování šumu, kdy přerušování šumového signálu v různém časovém okamžiku má za následek nepatrnou změnu v průbězích dozvukových křivek.

Proto se zavádí směrodatná odchylka měření, v našem případě pro vyhodnocování T_{30} z poklesu o 30 dB

$$\sigma(T_{20}) = 0,88T_{20}\sqrt{\frac{1 + (1,90/n)}{NBT_{20}}} \quad (4.9)$$

$$\sigma(T_{30}) = 0,55T_{30}\sqrt{\frac{1 + (1,52/n)}{NBT_{30}}}, \quad (4.10)$$

kde B je šířka pásma v Hz, n je počet poklesových křivek změřených v daném místě a N je počet míst ve kterých jsme provedli měření. [6]

4.4.2 Metoda impulsní odezvy

Integrací impulsové odezvy dostáváme hladký průběh dozvuku, který odpovídá skupinovému průměru nekonečného počtu křivek získaných metodou přerušovaného šumu. V praxi se tato povaha promítne už při skupinovém průměru $n = 10$ měření a vyjádření nejistot budou modifikované rovnice 4.9 a 4.10.

4.5 Shrnutí metod vyhodnocování

Následující tabulka shrnuje nejdůležitější informace pro vyhodnocení měření

Typ vyhodnocení	Impulsová odezva	Přerušovaný šum
Dozvukové křivky	Schröderova integrace	Integrace časových úseků
Doba dozvuku	Regresní analýza	Regresní analýza
Průměrování	Skupinový průměr $L(t)$	Aritmetický průměr T_i

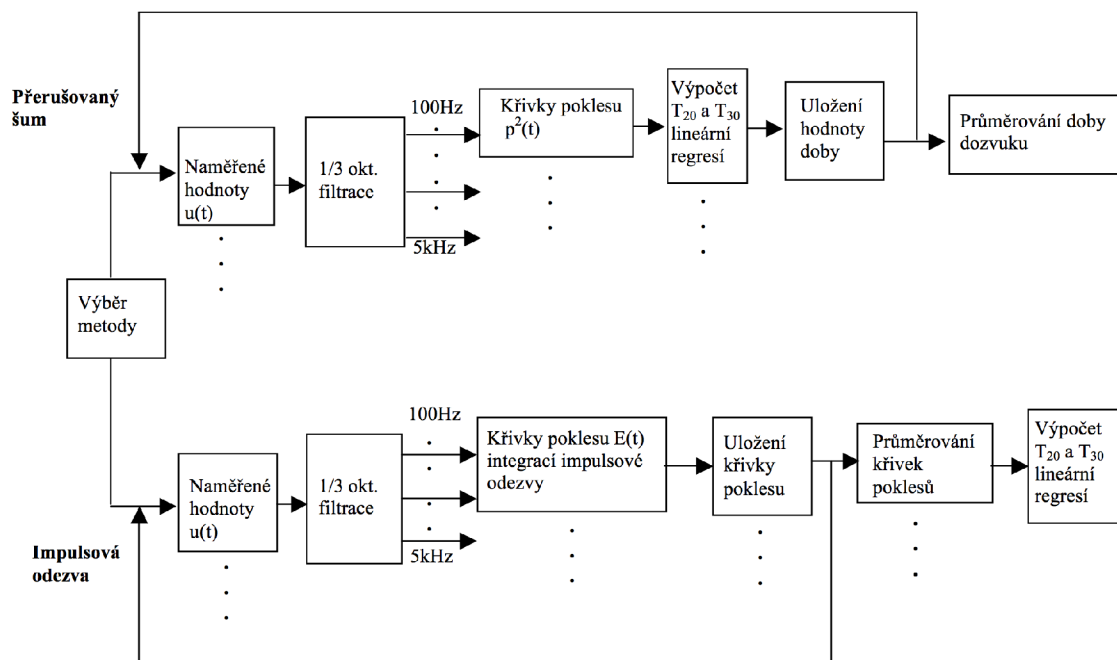
Tab. 4.1: Shrnutí vyhodnocovacích postupů

5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

Na základě teoretických poznatků vyplývajících z první části přistoupíme k praktickému měření. V této kapitole nastíníme postup a princip měření a jaké zařízení a možnosti měření máme.

5.1 Schematické znázornění algoritmu měření

Navržený algoritmus řešení jsme zakreslili pro lepší názornost do blokového schématu, kdy na počátku je výběr metody měření a následně navazuje její vyhodnocení.



Obr. 5.1: Blokové schéma algoritmu měření

5.2 Měření pomocí Photon+

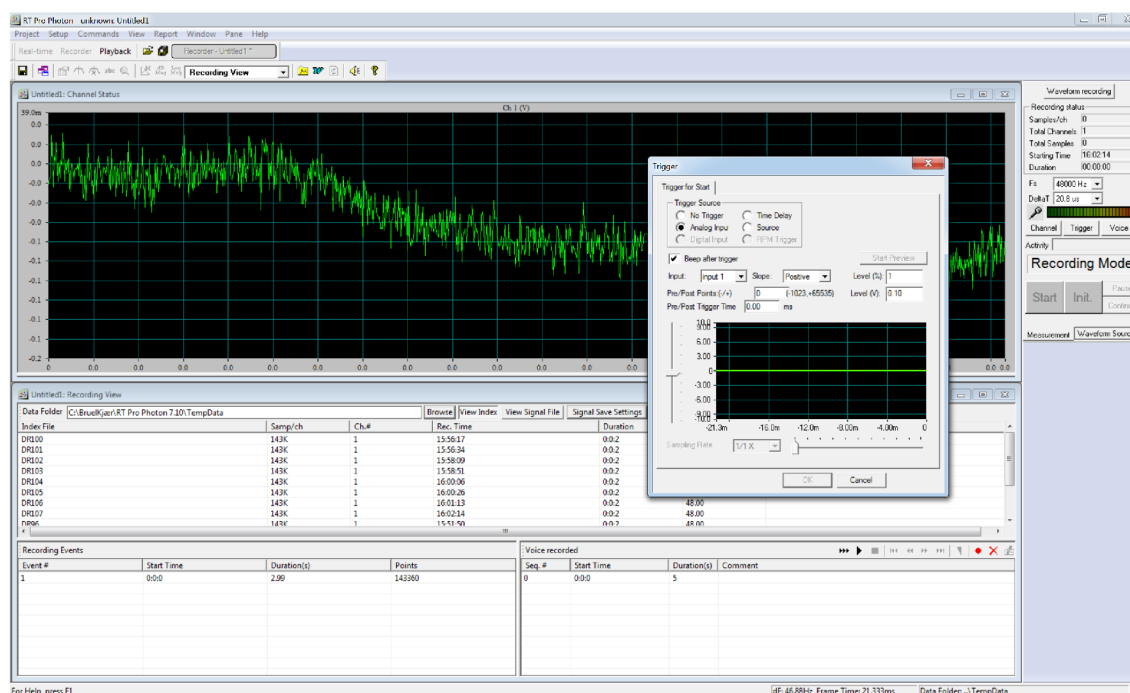
Jedna z podstatných výstupů této práce je naměření dat pomocí zvukového modulu Photon+, ke kterému je od výrobce dodáván software pro vyhodnocování měření RT Pro 7.1. Zvukový modul má 4 vstupy a 1 výstup. V programu je možné nastavit měřicí rozsah vstupu a jeho citlivost. Vzhledem k malým rozměrům prostoru nemáme problém vybudit prostor na vysokou hladinu akustického tlaku. Měřicí rozsah z tohoto důvodu volíme 10 V při citlivosti 10 mV.

Pokud měříme metodou impulsové odezvy, musíme si ověřit, zda náš zdroj zvuku disponuje schopností vybudit ve všech třetinooktávných pásmech dostatečnou hladinu akustického tlaku – uvádí se 45 dB nad hlukem pozadí. To jsme ověřili experimentálně pomocí vlastního programu v Matlab. Zjistili jsme, že ve všech kmitočtových pásmech má hladina akustického tlaku dostatečně vysokou hodnotu – nic nám tedy nebrání k vyhodnocení RT_{20} a RT_{30} .

U generování šumu pomocí reproduktoru musíme zajistit hladinu akustického tlaku, kterou generuje reproduktor opět za stejného pravidla – tedy minimálně 45 dB nad hladinu rušivého zvuku. Dále bychom měli dbát na to, že bychom u inženýrské metody měli použít alespoň 2 místa zdroje. My jsme zvolili dva stejné reproduktory, které jsme u měření v jednom měřicím bodě střídali. Zaznamenali jsme tedy 4 průběhy – 2 pro každý reproduktor.

Ke generování šumu jsme měli možnost použití generátoru, který je součástí programu RT Pro. Generátor měl ale omezenou nabídku funkcí a proto jsme zvolili generování šumu prostřednictvím Matlab. Zde jsme měli totiž možnost nastavit přesnou délku šumu.

Následující obrázek znázorňuje prostředí softwaru RT Pro 7.1.



Obr. 5.2: Prostředí programu RT Pro 7.1. Na obrázku je znázorněno okno, kde se nastavují spouštěcí podmínky (trigger). V pozadí je zobrazení naměřeného signálu. Spodní polovina je adresář, kde se ukládají naměřené data.

5.3 Nastavení spouštěcích podmínek

Měření jsme museli zautomatizovat a vytvořit synchronizování počátků měření. Při tvorbě pulsů dochází k vybuzení prostoru, kdy hodnota akustického tlaku po dosažení svého maxima klesá. Než hodnota dosáhne maxima, má určitý náběh. Pokud převedeme analogicky průběh akustického tlaku $p(t)$ na průběh napětí na mikrofonu, dochází k náběhu napětí $u(t)$. Tohle napětí se dá prostřednictvím RT Pro sledovat a můžeme nastavit tzv. trigger. Ten umožňuje při překročení určité hodnoty napětí v náběhu spustit automaticky měření. Triggerovací podmínka je tedy závislá na hodnotě napětí a nastavuje se v % maximálního rozsahu či absolutně pomocí hodnoty napětí. Tímto nastavením docílíme toho, že budeme mít synchronizované počátky impulsních odezev. Jelikož prasknutí balonu tvoří náhodný ruch, který je při každém prasknutí jiného charakteru, nemůžeme úplně přesně určit, že ke špičkové hodnotě dochází vždy ve stejný okamžik. Tyto časové rozdíly však budou při takto krátkých pulsech natolik malé, že nedojde k výraznému ovlivnění při průměrování integrovaných impulsních odezev $h(t)$ a počátek se může považovat za shodný.

Metodou přerušovaného šumu této lokální maximální hodnoty dosáhnout nelze, jelikož budíme prostor signálem o konstantním akustickém tlaku. Zde jsme použili nastavení doby buzení daného časového intervalu, po kterém bylo buzení přerušeno. Jelikož se jedná o náhodnou generaci šumu, byla splněna i podmínka, kdy nesmí být opakován vždy stejný úsek – jedná se tedy o pseudonáhodný šum, i když je buzen ve stejném časovém intervalu. Trigger byl u tohoto měření nastaven tak, aby se při zapnutí generátoru šumu, stejně jako u tvorby pulsu, aktivovalo měření už v náběhu. U triggeru jsme nastavili časovou diferenci, kterou jsme znali z předem známé doby generování šumu. Tím jsme docílili toho, že nám záznam signálu započal při vypnutí zdroje.

Takový způsob synchronizování nemusí být plně ideální - aktivování triggeru má totiž určitou časovou prodlevu. Jelikož se trigger aktivuje při stejné hodnotě, můžeme považovat tuto hodnotu za konstantní pro všechna měření. Tato prodleva by měla být řádově maximálně několik jednotek ms, což při předpokládaném poklesu 0,09 dB/ms (viz 5.4) může zpozdít počátek měření do okamžiku, kdy bude hodnota $L(t)$ maximálně 1 dB pod její maximální hodnotou L_{max} . Rozdíl mezi vypnutím šumu a prvním naměřenou hodnotou bude tedy zmiňovaná časová prodleva.

5.4 Popis místnosti

Sledovanou místnost jsme zvolili pracovnu na ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT. Půdorys místnosti, vyznačené pozice mikrofونů a umístění zdroje jsou uvedeny v příloze (viz příloha A.1). Volili jsme 4 měřicí místa a 2 místa zdroje. Původně

bylo zamýšleno 6 míst, ale rozměry místnosti nám nedovolily rozestavení mikrofonů, při kterých by byl rozstup alespoň 2 metry, viz kapitola 3.2. Při odhadu doby dozvuku podle Millingtonova vzorce 3.2 jsme zvolili činitel pohltivosti 0,15.

	Rozměr	Jednotky
Objem místnosti	78,60	$[m^3]$
Plochy stěn	118,30	$[m^2]$
Činitel pohltivosti	0,15	$[-]$
Předpokládaná doba dozvuku	0,67	$[s]$
Předpokládaný pokles b	-89,5	$[dB/s]$

Tab. 5.1: Základní údaje prostoru

Minimální vzdálenosti pro umístění mikrofonů v prostoru jsou uvedeny v tabulce XX. Hodnoty byly vyhodnoceny na základě závislostí uvedených v kapitole 3.1

	Minimální vzdálenost	Jednotky
Mikrofon - zdroj	1,18	$[m]$
Mikrofon - stěna	0,86	$[m]$
Místa mikrofonů	1,72	$[m]$

Tab. 5.2: Minimální vzdálenosti míst mikrofonů

Minimální vzdálenosti uvedeny v tabulce nás poměrně limitovaly při rozvržení mikrofonů v místnosti vzhledem k jejím malým rozměrům. Navíc fakt, že tato místa by neměla být symetrická nás limitoval ještě více. Z původně zamýšlených 6 pozic míst mikrofonů jsme se rozhodli zvolit 4 místa. Další hodnoty jsou uvedeny v tabulce

Počet mikrofonních míst	4
Počet poklesů v místě od zdroje 1	2
Počet poklesů v místě od zdroje 2	2
Počet zdrojů	2
Celkem nahraných signálů	16

Tab. 5.3: Počet poklesů a míst mikrofonů

6 ALGORITMUS VYHODNOCENÍ

6.1 Filtrace naměřeného signálu

Fáze filtrování naměřeného průběhu $u(t)$ je prováděna pomocí filtrů, které jsou použity v souladu s BSD licencí v rámci file exchange společnosti Mathworks. Cílem této práce nebylo navržení filtru, proto jsme využili již vytvořených filtrů. Autor je uveden ve zdrojovém kódu našeho výpočetního programu.

Filtrování probíhá v 18 třetinooktákových pásmech. Použit je Butterworthův typ filtru. Každý signál je vyfiltrován v rámci všech pásem a to se opakuje u všech průběhů $u(t)$. Vyfiltrované signály jsou rozděleny do matic podle třetinooktákových pásem a dále zpracovávány v závislosti na zvolené metodě vyhodnocení.

Důležitou podmínkou pro správnou filtraci je dodržení vzorkovacích kmitočtů. Autor filtrů doporučuje mít vzorkovací kmitočet v závislosti na vyhodnocovací frekvenci zvolen následovně:

$$f_s/200 < f_c < f_s/5, \quad (6.1)$$

což pro námi měřenou frekvenci 48 kHz platí pro pásma

$$240 < f_c < 9600. \quad (6.2)$$

Pokud tedy potřebujeme vyhodnocovat pod kmitočtem 240 Hz (podle normy [7] musíme splnit), musíme podvzorkovat původní signál. My jsme podvzorkovali na frekvenci 4,8 kHz, kterou můžeme použít pro pásma 24 až 960 Hz. My jsme na kmitočtu 4,8 kHz vyhodnocovali třetinooktákové pásma o středních frekvencích 100 Hz – 400 Hz a na kmitočtu 48 kHz pásma 500 Hz – 5000 Hz.

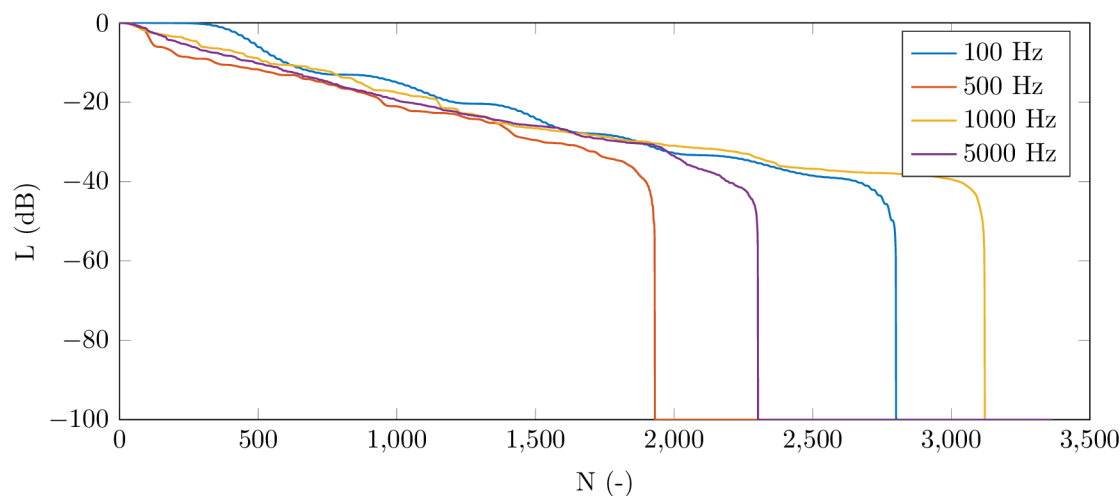
6.2 Určení počátku a průběhu dozvukové křivky

Podstatná věc, kterou je při analýze dozvukových křivek třeba zohledit, je počátek dozvukové křivky. Literatura uvádí, že počátek volíme při poklesu o 5dB z maximální hodnoty akustického tlaku L_{max} — tedy z průměrné hodnoty, kterou generuje zdroj.

6.2.1 Metoda impulsové odezvy

Jelikož je tato metoda vyhodnocována pomocí Schröderovy integrace, zde platí, že počátek je dán maximální hodnotou, která je v prostoru vybuzena. V matlabu pro výpočet zpětnou integrací využíváme funkci *cumsum*. Hodnota průběhu v čase $t = 0$ je po aplikování této funkce vždy 1. Pokud hodnoty průběhu vyjádříme logaritmicky,

poté nám bude v čase $t = 0$ začínat poklesová křivka v hodnotě 0 dB a dále budou hodnoty nabývat pouze záporných hodnot dB - viz graf 6.1.

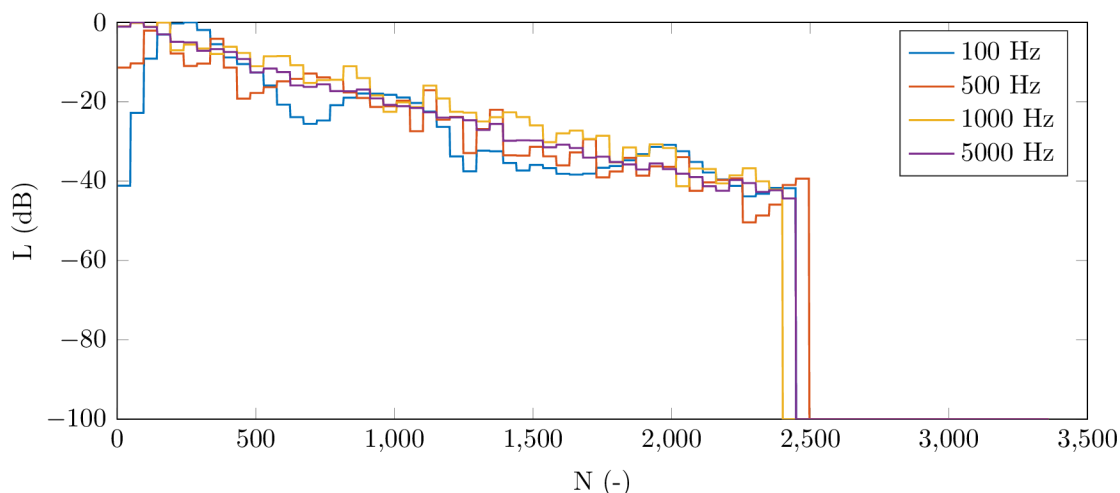


Obr. 6.1: Vyhodnocené průběhy pomocí Schröderovy integrace.

6.2.2 Metoda přerušovaného šumu

K vyhodnocení je použito integrování průběhu napětí v určitých časových rozmezích, přičemž takto vyhodnocené hodnoty nám v závislosti na čase tvoří průběh $p(t)$. Velikost rozmezí se určuje zpravidla podle typu vyhodnocovaného signálu — je většinou závislé na rychlosti změny a obecně platí, čím rychlejší změny, tím kratší je tento úsek. V literatuře se příliš o tomto tématu dohledat nedalo. Z praktických zkušeností je ale známo, že například akustické analyzéry Brüel&Kjaer používají hodnotu 24 ms, což nás přivedlo k tomu, použít podobnou hodnotu. Z vlastního experimentování s naměřenými daty jsme nakonec zvolili 10 ms, jelikož nám tato hodnota vyhovovala pro všechna frekvenční pásma.

Photon+ v nahrávacím režimu nenabízí možnost zápisu dat v takové formě, takže jsme museli vyhodnocení naměřeného signálu provést pomocí Matlabu — viz. graf 6.2. U vyhodnocené křivky pomocí integrování časových úseků je obtížné dosáhnout hodnoty -5 dB jako počáteční hodnoty, jelikož skokové změny jsou značné a liší se v řádech decibel. V programu máme ošetřen počátek jako okamžik, kdy poklesne hodnota pod -5 dB — tedy na následující nižší hladinu.



Obr. 6.2: Vyhodnocené průběhy pomocí integrace časových průběhů.

6.3 Realizace výpočetního programu v Matlabu

Ve fázi přípravy výpočtového skriptu v Matlabu je klíčovým procesem určení vyhodnocovacího rozmezí. Program v Matlabu není programátorsky nijak vospělý, obsahuje jen čisté matematické algoritmy. Z tohoto důvodu je velmi časově náročný, jelikož nepoužíváme žádnou urychlovací metodu. Při velkém množství dat je časová náročnost výpočtu i několik desítek minut.

Vyfiltrované průběhy se dále zpracovávají pomocí Schröderovy integrace nebo pomocí integrace časových úseků. Dalším článkem řetězce je vyhodnocení doby dozvuku pomocí lineární regrese a výpočet doby dozvuku.

6.3.1 Metoda zpětné integrace

V matlabu jsme zpětnou integraci realizovali pomocí interní funkce *cumsum*.

```

1 function [ obalka, hranice_45dB ] = genobalky( prubeh )
2
3 %vobalkatvoreni obalkobalka poklesu
4 pokles=( (prubeh.^2) .^(1/2) )
5 pokles=10*log(pokles/max(abs(pokles)))
6 hodnotyvetsi=find(pokles > -45)
7 hranice_45dB=max(abs(hodnotyvetsi))
8 obalka(hranice_45dB:-1:1) = cumsum(prubeh(hranice_45dB:-1:1).^2);
9
10 %prevod poklesu do logaritmickeho meritka
11 obalka = 10 * log10(obalka/max(abs(obalka)))
12 end

```

Tato funkce jednoduše kumuluje hodnoty závislé na předchozích vzorcích – tedy pokud bychom měli po sobě jdoucí vzorky s hodnotami 1, 2, 3, 4, 5, použitím funkce *cumsum* bychom dostali hodnoty vzorků 1, 2, 6, 10, 15. Důležité je načítat tyto hodnoty zpětně, což vychází z podstaty zpětné integrace. Jelikož nás v logaritmickém měřítku nelimituje absolutní hodnota vzorků, ale pouze poměrná hodnota mezi vzorky, převodem do logaritmické škály rovnou získáváme průběh dozvukové křivky.

6.3.2 Metoda integrace časových úseků

Tato metoda je náročnější na výpočet, jelikož zde používáme integrování vzorků v určitém časovém intervalu *Tfast*. Tento interval se většinou volí v závislosti na frekvenčním pásmu, které je vyhodnocováno. My jsme volili konstantní interval 10 ms pro všechny frekvence.

```

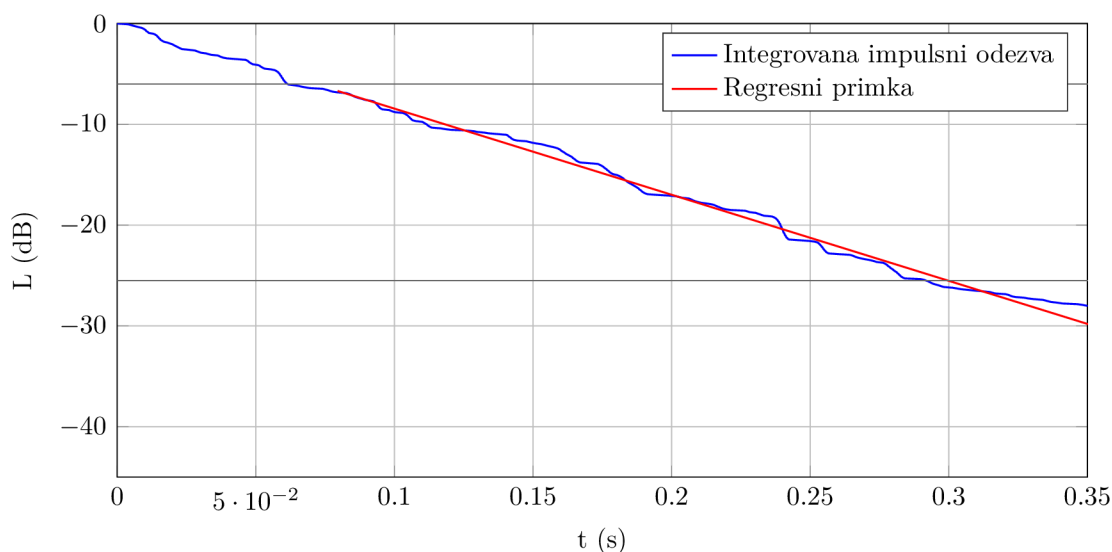
13 function [ obalka ] = genobalky( prubeh, T, fs )
14
15 pokles=(prubeh.^2).^ (1/2)
16 pokles=10*log(pokles/max(abs(pokles)))
17 hodnotyvetsi=find(pokles > -50)
18 hranice_45dB=max(abs(hodnotyvetsi))
19
20 Tfast=0.01 %[s]=10ms
21 Nfast=Tfast*fs %[pocet vzorku]
22
23 for i=1:1:floor(length(prubeh(1,1:hranice_45dB))/Nfast)
24 tlak_Nfast=(prubeh(1,(i-1)*Nfast+1:Nfast*i)).^2
25
26 hladina_tlaku=sum(tlak_Nfast)/Nfast
27 L(1,(i-1)*Nfast+1:Nfast*i)=hladina_tlaku
28 end
29
30 %prevod do logaritmickeho meritka
31 obalka = 10 * log10(L/max(abs(L)));
32 hodnotyvetsi=find(obalka > -45)
33 hranice_45dB=max(abs(hodnotyvetsi))
34 obalka=obalka(1,1:hranice_45dB)
35
36 end

```

6.3.3 Regresní analýza integrované impulsové odezvy

Z průběhu $p(t)$ dostaneme aplikací zpětné integrace a převedením do logaritmické stupnice průběh hodnot $L(t)$ v dB. Proložení křivkou probíhá v souladu s regresní analýzou uvedenou v normách (viz. [7]). Výstupem regresní analýzy jsou konstanty a a b a doba dozvuku T , která je určena pomocí vztahu

$$T = -60/b. \quad (6.3)$$



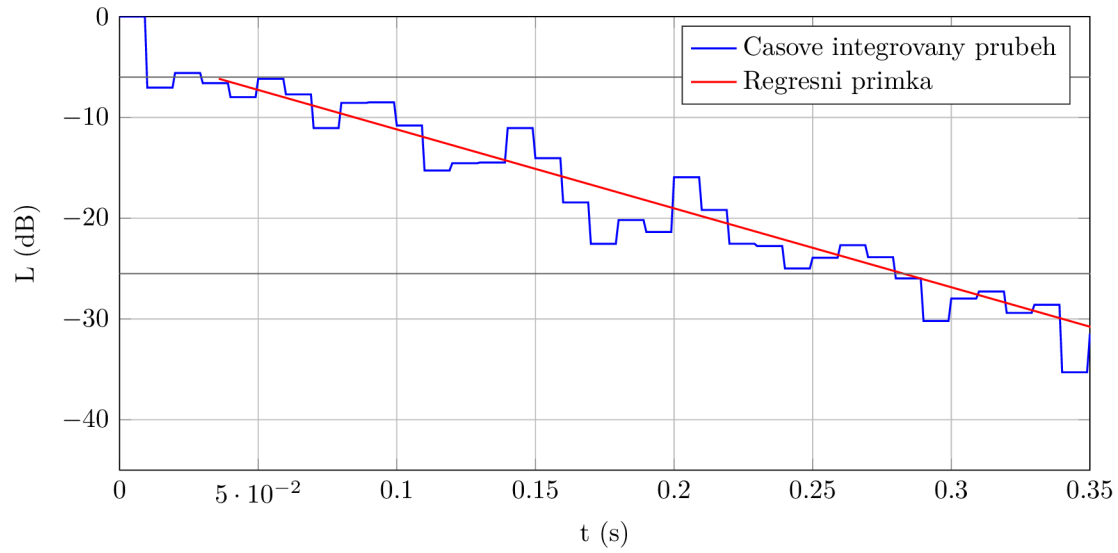
Obr. 6.3: Demonstrace regresní analýzy (RT_{20}) - Schröderova metoda.

Regresní přímka (obr. 6.3) sleduje průběh naměřeného signálu od okamžiku, kdy hodnota poklesne o 5 dB až do okamžiku poklesu pod -25 dB. Křivka byla vykreslena na základě získaných konstant a a b .

Při vyhodnocení poklesu o 30 dB, tedy RT_{30} , se hodnota vyhodnocené RT mění, jelikož při vyhodnocování kratšího časového úseku byly vyhodnoceny zákonitě rozdílné konstanty regresní přímky.

6.3.4 Regresní analýza metody přerušovaného šumu

Výsledkem integrace průběhu $p(t)$ na časových úsecích T_{fast} je následující graf 6.4. Vyhodnocujeme pokles -5 až -25 dB pro RT_{20} .



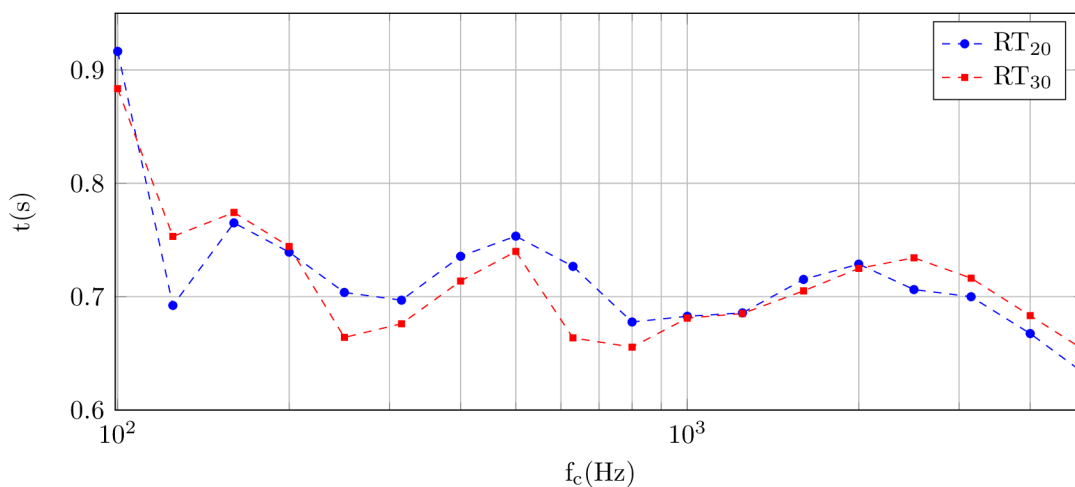
Obr. 6.4: Demonstrace regresní analýzy (RT_{20}) - metoda přerušovaného šumu.

Další ukázky vyhodnocení poklesových křivek jsou v příloze C.

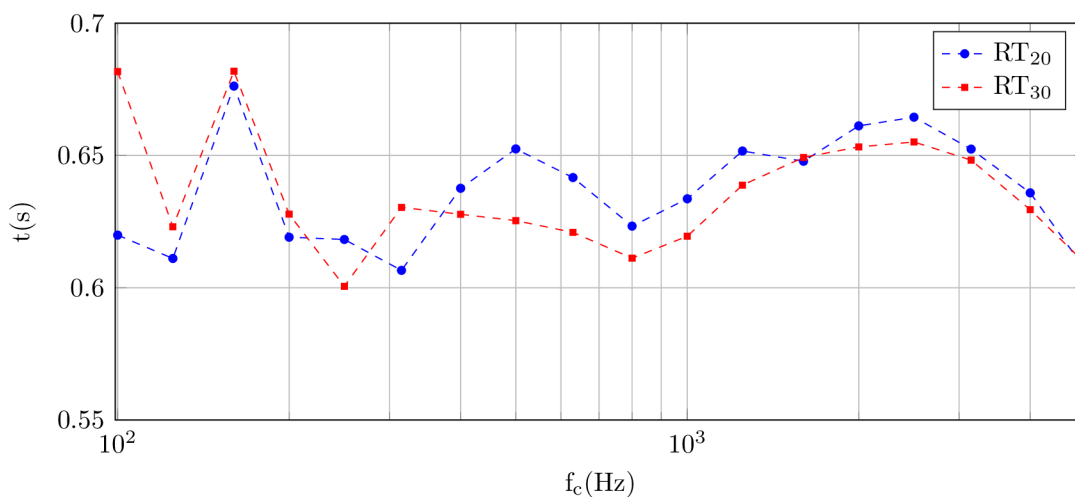
7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

7.1 Porovnání vyhodnocení pomocí RT_{20} a RT_{30}

Časové výsledky interpretujeme pomocí spojnicových grafů, což doporučuje norma [6]. Frekvence je vynesena v logaritmickém měřítku v Hz a doba dozvuku v s. V grafech lze sledovat odchylky mezi RT_{20} a RT_{30} , které souvisí s nelinearitou poklesové křivky. Lze si také povšimnout tvarové podobnosti křivek obou metod — tedy zesílení frekvencí v oblasti 500 Hz a 2,5 kHz.



Obr. 7.1: RT_{20} a RT_{30} – metoda přerušovaného šumu.



Obr. 7.2: RT_{20} a RT_{30} – impulsní metoda.

7.2 Porovnání absolutních časů obou metod

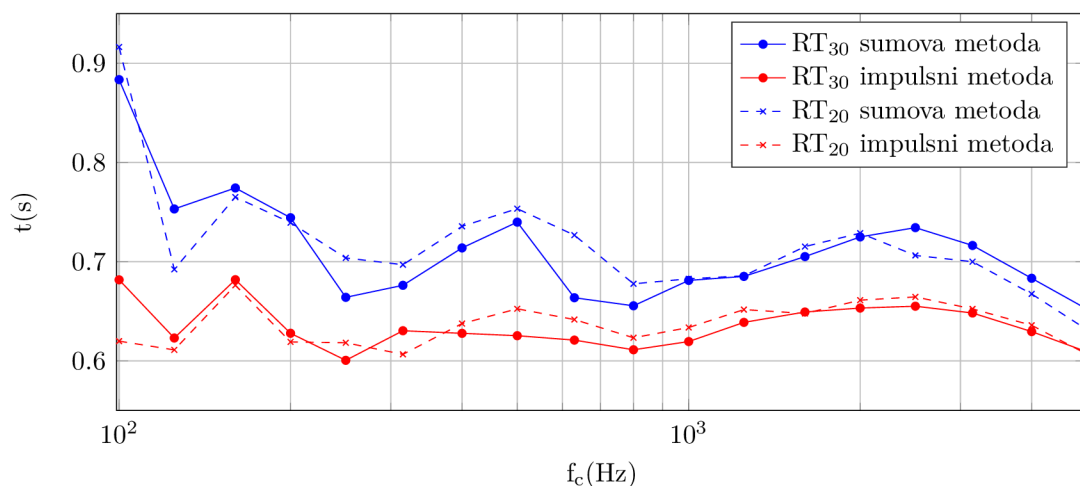
Porovnáním absolutních časů obou metod na stejných vyhodnocovacích intervalech lze vyhodnotit rozdíly mezi metodami. Kvantitativně lze usoudit, že je mezi metodami konstantní časový rozdíl ve všech pásmech.

Příčinu tohoto rozdílu nelze snadno určit. Můžeme ji nicméně lokalizovat ve 2 částech — chybu může způsobovat buďto záznam, respektive odlišné chování místnosti při rozdílném buzení nebo matematická metoda použita k vyhodnocení.

K odpovědi se můžeme dostat snadno — na naměřené data z obou metod použijeme oba způsoby vyhodnocení. Tím ověříme správnost rozdílnost matematických metod.

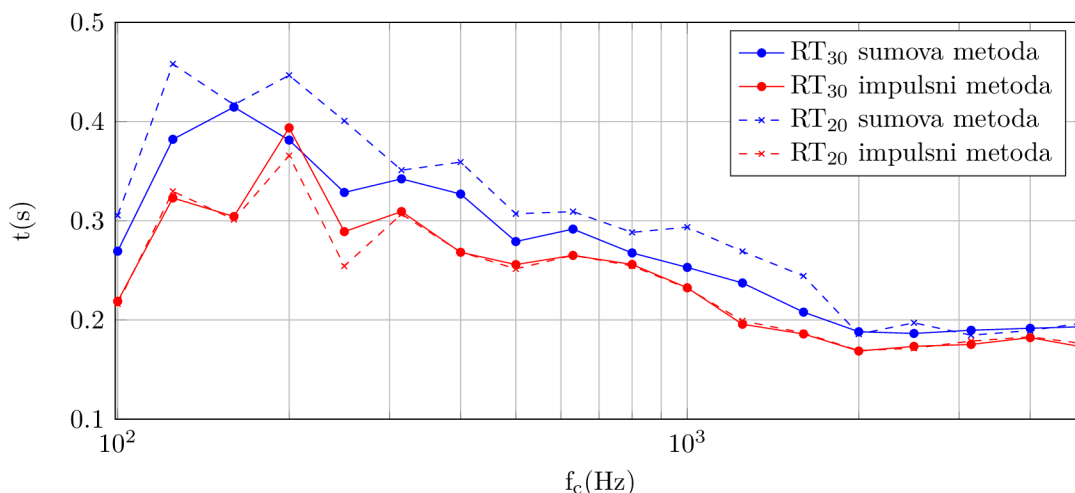
Tohle jednoduché ověření vyhodnocovacích metod nám potvrdilo, že matematický algoritmus použitý při obou výpočtech je správný — výsledky obou metod aplikovaných na stejnou poklesovou křivku se lišily v rámci statické chyby, nikoliv až v desítkách procent jak tomu je při rozdílných vstupních datech. Proto je patrné, že rozdíly, které jsme zaznamenali v měření školní laboratoře, jsou způsobeny převážně vstupními daty.

Tyto chyby mohou mít různou povahu — rozdílná směrovost zdroje buzení, špatné triggerovací podmínky, rozdílná povaha zdroje, nedostatečné vybuzení prostoru. Můžeme tedy konstatovat, že se jedná o chybně naměřená data zapříčiněná špatnými podmínkami měření.



Obr. 7.3: Porovnání RT_{20} a RT_{30} obou metod (laboratoř).

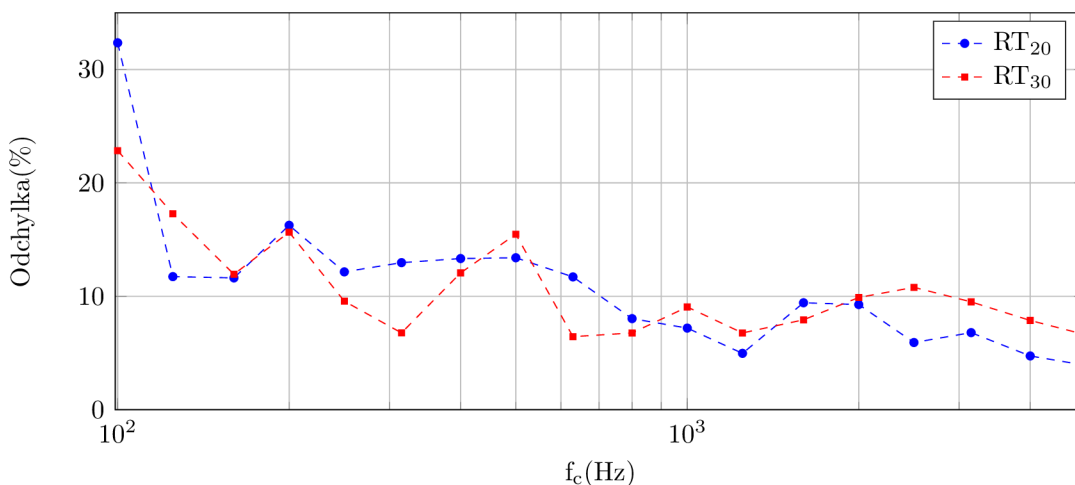
Stejný experiment jsme provedli v nahrávacím studiu Indies v Brně. Zde byla měřena nahrávací místnost našimi navrženými metodami. Opět se jedná o velmi vysoké odchylky mezi šumovou a impulsní metodou. Odchylky mezi RT_{20} a RT_{30} vyjádřené v procentech jsou řádově až 20 %.



Obr. 7.4: Porovnání RT_{20} a RT_{30} obou metod (studio Indies).

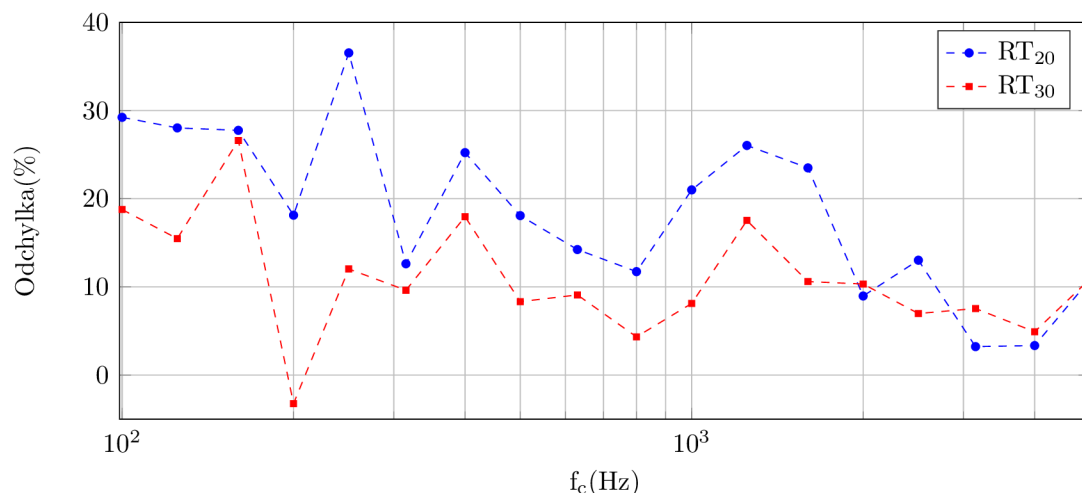
7.2.1 Odchyvky metod

Jestliže tedy vyjádříme zmíněné časové rozdíly v procentuální škále, dostaneme jasnější představu o frekvenční závislosti chyb.



Obr. 7.5: Procentuální chyba u dat ze školní laboratoře. Modrá křivka je rozdíl RT_{20} vyhodnocené šumovou a impulsní odezvou. Tentýž rozdíl je i pro červenou křivku zaznamenávající rozdíl RT_{30} .

Tyto chyby mají i frekvenční závislost, kdy na nízkých frekvencích se dostáváme nad 10 % hranici. Tento nárůst je způsoben zejména špatným typem reproduktoru. Membrána reproduktoru totiž měla jistý doběh, způsobený neadekvátním zatížením reproduktoru téměř na hranici zkreslení. Tento doběh nejvíce ovlivnil tzv. počáteční dobu dozvuku, neboli první část poklesové křivky. I když je vůči takovým nepřesnostem ošetřen počátek poklesem o -5 dB, v časovém měřítku tento pokles znamená 10 – 20 ms (v závislosti na RT) a tím pádem můžeme lehce zkreslit počátek vyhod-



Obr. 7.6: Procentuální chyba u dat z nahrávacího studia Indies. Modrá křivka je rozdíl RT_{20} vyhodnocené šumovou a impulsní odezvou. Tentýž rozdíl je i pro červenou křivku zaznamenávající rozdíl RT_{30} .

nocovacího intervalu, jestliže doběh membrány bude mít například 100 ms. Tento jev můžeme potvrdit průběhem v grafu a tedy rozdílem chyb RT_{20} a RT_{30} , kdy při poklesu o 20 dB je chyba obecně větší, než-li při delším poklesu o 30 dB. Tímto se dostáváme k dalšímu parametru — stupni křivosti, který úzce souvisí s rozdíly mezi absolutními hodnotami RT_{20} a RT_{30} .

7.2.2 Stupeň křivosti C

Stupeň křivosti je definován následovně:

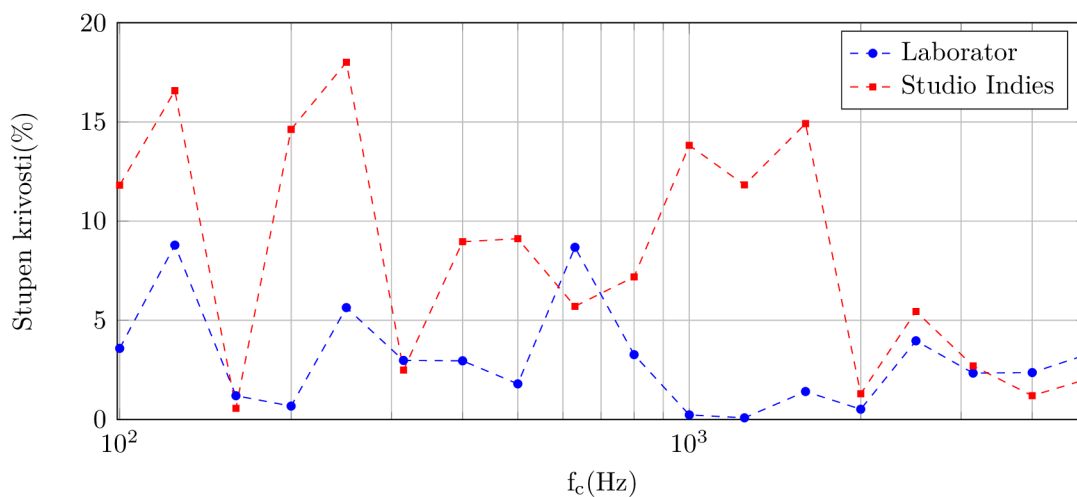
$$C = 100 \left(\frac{RT_{30}}{RT_{20}} - 1 \right). \quad (7.1)$$

V závislosti na různém poměru časových hodnot RT_{20} a RT_{30} dostáváme hodnotu zlomku menší nebo větší než 1 a tuto hodnotu vztahujeme k absolutně lineární dozvukové křivce která má tento poměr roven 1. Procentuální vyjádření podle normy [7] má být nejlépe do 5% — od 10% už indikuje křivku, která má daleko od rovné čáry.

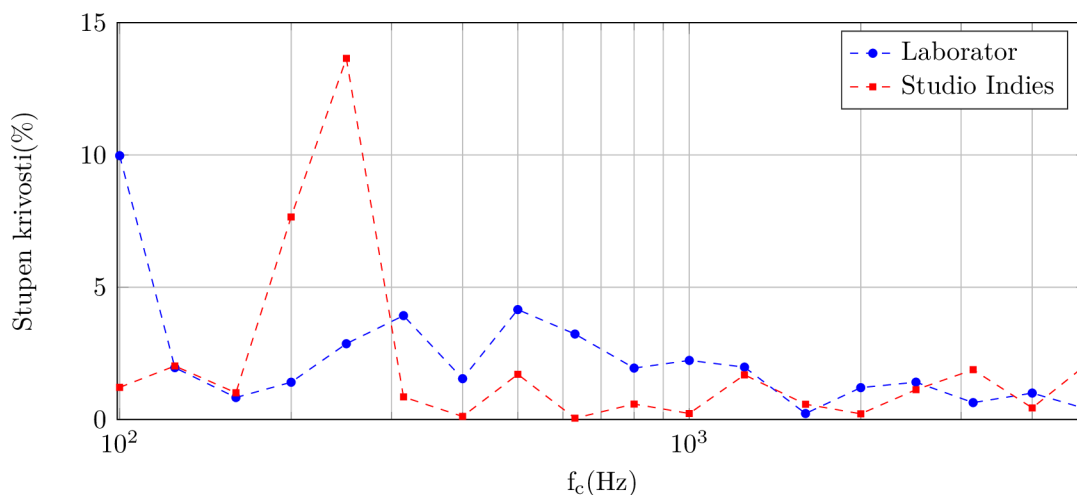
Pokud vztáhneme hodnoty stupně křivosti k našemu ovlivnění doběhem membrány reproduktoru, zjistíme, že ačkoliv se jedná o stejný prostor, je **linearita u obou metod rozdílná**. Tohle je zásadní poznatek, který nám dokazuje, že problém je v buzení, respektive v špatně ošetřeném počátku poklesu.

Pokud zhodnotíme výsledky z hlediska akustiky prostoru, linearita v našich 2 rozdílných prostorech je naprosto jiná. Zatímco v laboratoři splňujeme kritérium u impulsové metody poměrně uspokojivě, ve studiu už tak jednoznační býti nemůžeme. Stupeň křivosti je nízký a dostačující ve všech pásmech kromě 200 Hz a 250 Hz.

Na těchto pásmech je výrazná nelinearita systému. Mohli bychom předpokládat, že na těchto pásmech vznikají stojaté vlny, tzv. vlastní kmity místnosti, které jsou charakteristické pro každou místnost a závislé na jejich rozměrech. Tohle zjištění navíc koresponduje i s hudební zkušeností, kdy studioví inženýři ve studiu mají problémy s tímto kmitočtem a do budoucna tohle důležité pásmo chtějí řešit pomocí akustických úprav — např. použitím basových pastí a podobně.



Obr. 7.7: Stupně křivosti šumové metody.



Obr. 7.8: Stupně křivosti impulsové metody.

7.3 Shrnutí základních poznatků experimentů

V předchozí kapitolách jsme provedli podrobnou analýzu měření a výsledků, kterou na závěr shrneme v několika důležitých bodech:

Měření/podmínky měření

1. Správně definovaný počátek měření

Pokud nebudeme mít správně definován a ošetřen počátek měření, dojde ke značnému zkreslení výsledků. Platí zejména u metody přerušovaného šumu. Viz. 6.2.

2. Správně definovaný vzorkovací kmitočet

Jedná se zejména o podmínku pro filtr, jelikož při vysokém vzorkovacím kmitočtu na nízkých frekvencích dochází k nesprávnému filtrování a konvoluce nám značně změní originální průběh signálu. Viz. 6.1.

3. Vhodný zdroj buzení

Jak jsme se v našem experimentu poučili, nevhodný zdroj šumu nám zanesl nelinearitu do řetězce, která způsobila mírný časový offset oproti impulsní metodě. Viz. 3.1.

Vyhodnocování/výpočet

1. Správně vyhodnocený počátek a konec poklesové křivky

2. Vhodný integrační čas u metody přerušovaného šumu

Tento čas závisí jednak na době dozvuku, kterou měříme a také na frekvenci, respektive délce vlny. Při příliš krátké poklesové křivce a zvoleném dlouhém integračním čase může snadno nastat situace, kdy budeme mít příliš malé rozlišení na to, abychom spolehlivě určili směrnici poklesu, respektive vhodně proložili přímkou.

3. Správně oddělený hluk pozadí při metodě integrované impulsní odezvy

Při zpětné Schröderově integraci dochází ke zpětné integraci směrem od pomyslného hluku pozadí. Pokud nevhodně odstraníme hluk pozadí z průběhu dozvuku, dojde k ovlivnění výsledné křivky integrace a RT se nám prodlouží.

8 ZÁVĚR

Tato práce je shrnujícím souborem základních poznatků při měření a vyhodnocování doby dozvuku. Cílem bylo ověřit měřicí modul Photon+ s přiloženým softwarem a ověřit jeho dispozice. Měřicí modul, včetně nastavení vstupů a výstupů, byl poměrně sofistikované zařízení. Umožňoval spoustu možností nastavení — od nastavení maximálního rozsahu napětí, spouštěcích podmínek, citlivosti mikrofonu až po nastavení výstupu. Samotný výstup měřicího modulu jsme nevyužili. Bylo to způsobeno převážně omezenými možnostmi jeho buzení — konkrétně chybělo nastavení časového úseku, po který bude generován růžový šum.

Aplikace RT Pro 7.1. nemá žádné funkce na vyhodnocení doby dozvuku a proto jsme sestavili svůj výpočetní program. S ohledem na omezenou licenci po velkou část práce nebylo příliš prostoru k podrobnému prozkoumání aplikace. Aplikace obsahuje nástroje akustické analýzy, která je určitě významným nástrojem při jiných akustických aplikacích. S jistým úsilím bychom mohli pomocí aplikace vykreslit dozukovou křivku, ale to je maximum, které může aplikace zprostředkovat. Měření doby dozvuku je specifická hlavně lineární regresí a dále i různými metodami vyhodnocení dozukových křivek. Provádí se navíc několik měření a poté se realizuje statistické zpracování, což program není schopen obsáhnout.

Hlavní fází práce bylo zpracování teoretické části, ke které patřilo jak akustická teorie, tak hlavně studium příslušných norem. Na základě těchto poznatků jsme sestavili výpočetní program v prostředí Matlab. Tento algoritmus byl testován už při samotném měření a tím jsme postupně vyladovali některé jeho funkce. Program je vytvořen pouze ve skriptech, bez uživatelského prostředí. Uživatelské prostředí by určitě bylo vhodné realizovat, ale vzhledem k rozsahu práce by přesahovalo nad jeho rámec.

V páté a šesté kapitole jsou popsány princip a algoritmus měření a vyhodnocování a sedmá kapitola přidává výsledky měření. Jsou zde vyzdvíženy některé souvislosti v naměřených datech a dokázány závislosti množství nelinearity v měření na špatných vstupních datech.

Správně vyhodnocená doba dozvuku není cílem této práce, proto se výsledky neporovnávají ve vztahu k akustice místnosti, ale spíše ve vztahu k procesu měření. Z výsledků plyne, že absolutní doba dozvuku se s v rámci našeho přístrojového vybavení nedá přesně určit — konkrétně u metody přerušovaného šumu. Dospěli jsme k závěru, že odchylky, které nastaly mají hlavní příčinu ve volbě nevhodného typu reproduktoru a ve špatně určeném počátku poklesu.

LITERATURA

- [1] ŠŤASTNÍK, S. A J. ZACH. *Stavební akustika a zvukoizolační materiály*. Brno: CERM, 2002.
- [2] KOLMER, F. A J. KYNCL. *Prostorová akustika*. Praha: SNTL, 1982.
- [3] SMETANA, C. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL, 1981.
- [4] KOLMER, F. A J. TICHÝ. *Příručka elektroakustiky*. Praha: SNTL, 1964.
- [5] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*. Brno: VUT v Brně, 2014.
- [6] ČSN EN ISO 3382-1 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Třídící znak 73 0534.
- [7] ČSN EN ISO 3382-2 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Třídící znak 73 0534.
- [8] ČSN EN ISO 3382-3 *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 3: Otevřené společné prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. Třídící znak 73 0534.
- [9] HORVAT, M. K. JAMBROSIC a H. DOMITROVI. *Methods of measuring the reverberation time*. Graz (Austria): 3rd AAA Congress, 2007.
- [10] VORLÄNDER, M., BIETZ, H. *Reverberation Time Measurements Methods*. In: *Acustica*. Braunschweig, Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1994.
- [11] SCHRÖDER, M. R. *New Method of Measuring Reverberation Time*. J. Acoust. Soc. Am. , 1965.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

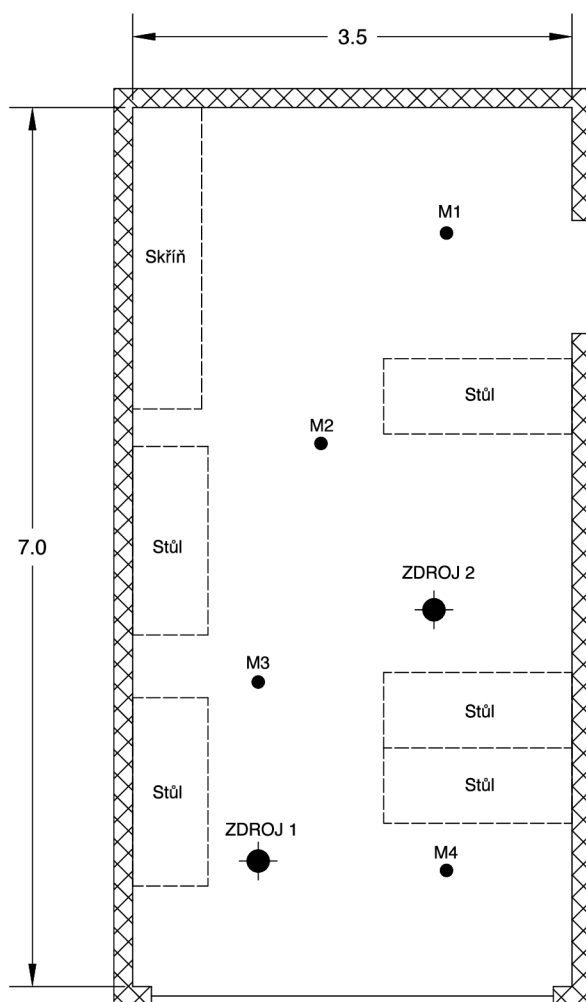
WAV	waveform audio file format
$p(t)$	tlaková impulsová odezva
$h(t)$	integrovaná impulsová odezva
$L(t)$	hladina akustického tlaku

SEZNAM PŘÍLOH

A Půdorys místnosti učebny	61
B Nejistoty měření	63
C Dozvukové křivky v kmitočtových pásmech	65
D Obsah příloženého CD	67

A PŮDORYS MÍSTNOSTI UČEBNY

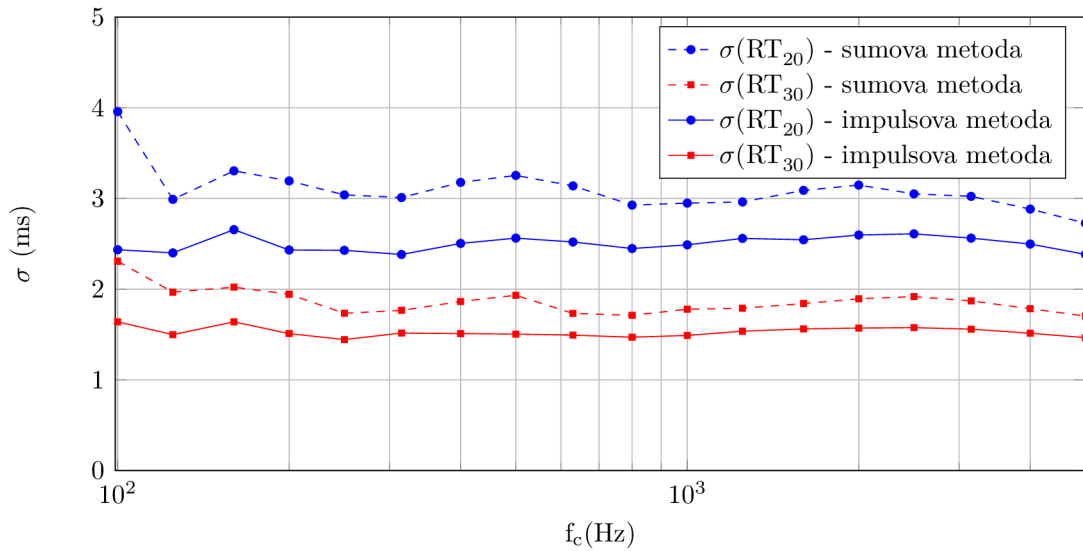
Na obrázku jsou čárkovanou čarou ohraničeny hlavní tělesa v místnosti. Rozložení stolů je jen pro představu místnosti, do výpočtu předpokládané doby dozvuku se nijak nezapočítávaly. Objem skříně však odečítáme od celkového objemu místnosti. Z geometrického hlediska skříně umístěná v rohu nezvětšuje plochu stěn v místnosti, tudíž plocha stěn je neovlivněna vloženou skříní. I když je skříně výrazným prvkem v místnosti a její činitel pohltivosti je rozdílný oproti stěnám místnosti, pro orientační výpočet jsme použili hodnotu činitele pro všechny plochy stejný.



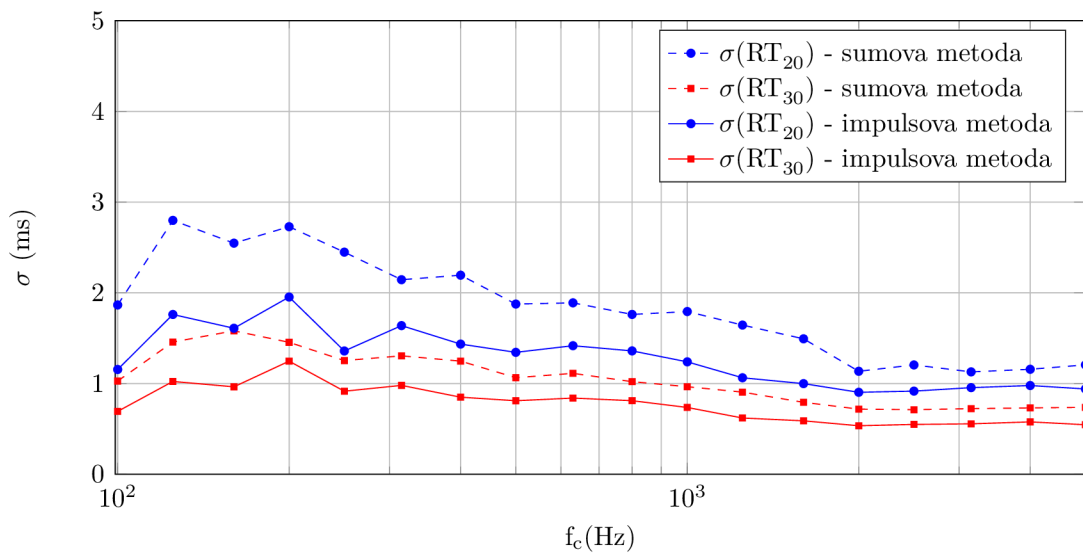
Obr. A.1: Půdorys místnosti učebny

B NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistoty měření byly podrobněji popsán v kapitole 4.4 . Nejistoty jsme vynesli do grafu a jako měřítko jsme zvolili ms.



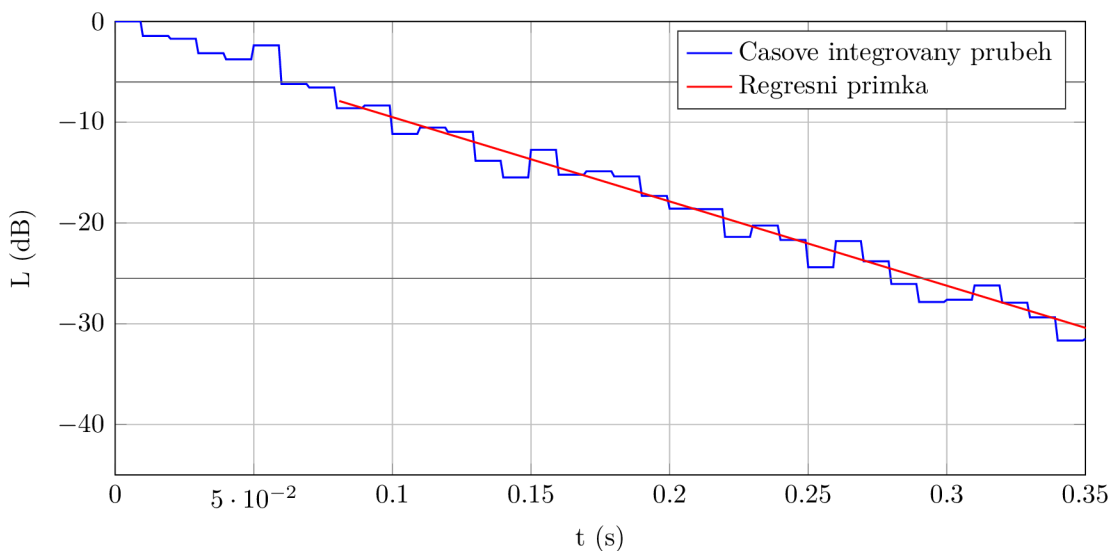
Obr. B.1: Velikost nejistot měření v laboratoři podle normy [7].



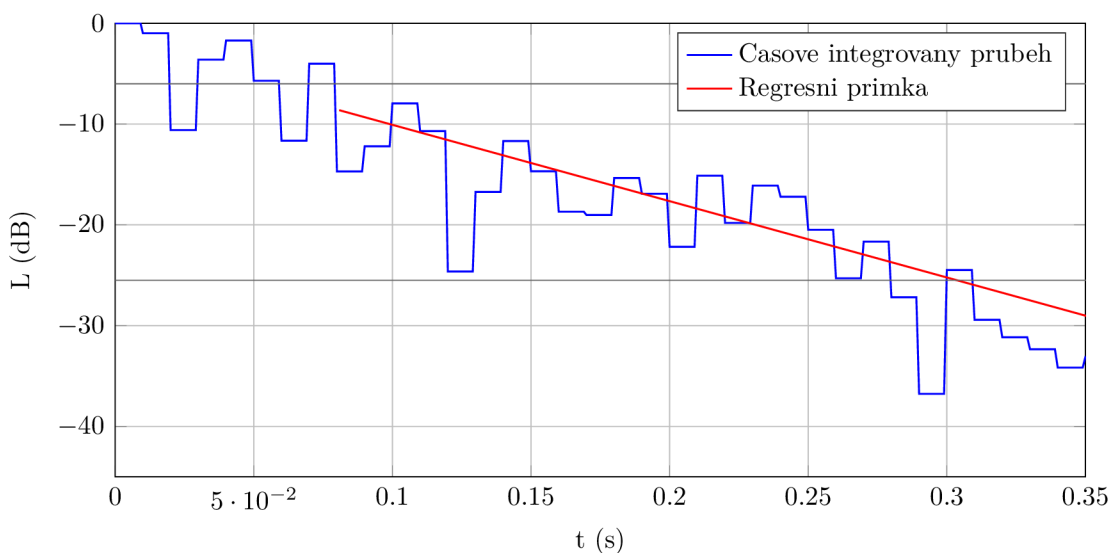
Obr. B.2: Velikost nejistot měření ve studiu Indies podle normy [7].

C DOZVUKOVÉ KŘIVKY V KMITOČTOVÝCH PÁSMECH

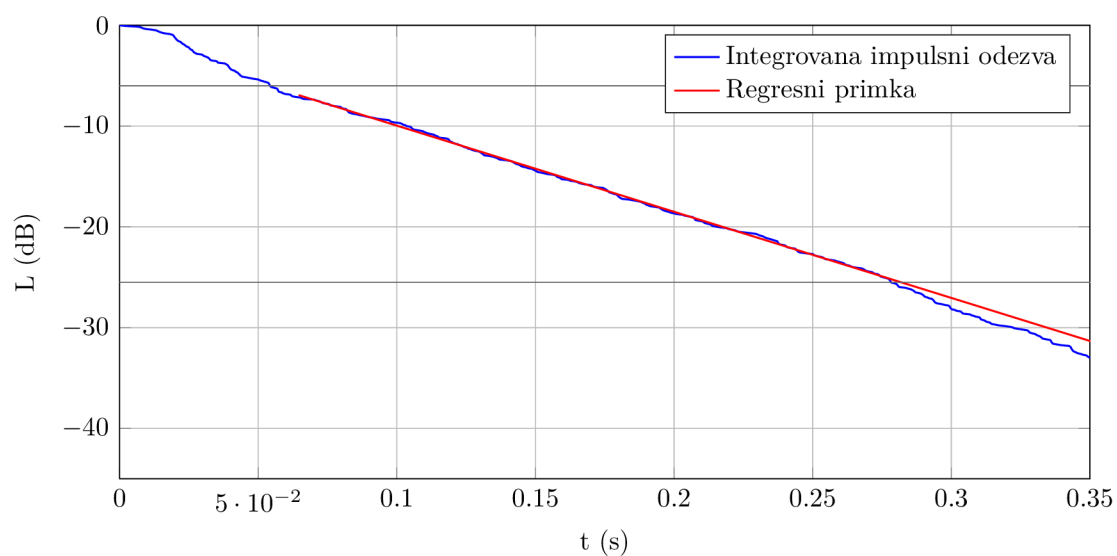
Níže zobrazené grafy slouží k demonstraci rozdílného průběhu v kmitočtových pásmech – pásmo 4000 Hz je charakteristické lineárním charakterem, zatímco v pásmu 500 Hz jsou patrné výraznější odchylky od lineárního průběhu dozvuku.



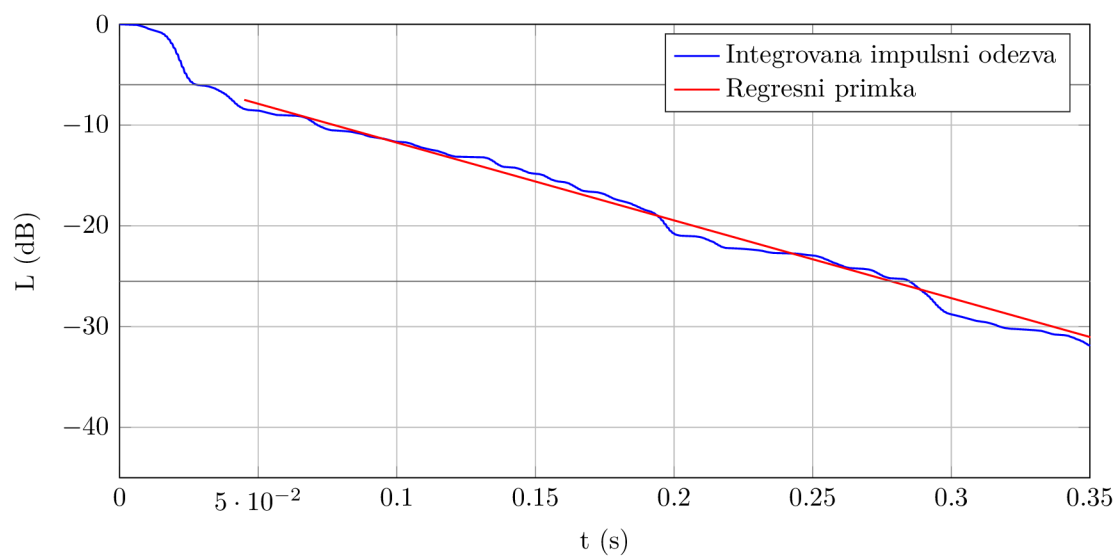
Obr. C.1: Demonstrace regresní analýzy pro pásmo 4000 Hz (RT_{20}).



Obr. C.2: Demonstrace regresní analýzy pro pásmo 500 Hz (RT_{20}).



Obr. C.3: Demonstrace regresní analýzy pro pásmo 4000 Hz (RT_{20}).



Obr. C.4: Demonstrace regresní analýzy pro pásmo 4000 Hz (RT_{20}).

D OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Přiložené CD obsahuje elektronickou verzi bakalářské práce ve formátu PDF a základní skripty pro výpočet doby dozvuk pomocí 2 metod.

Adresářová struktura přílohy bakalářské práce na CD:

- /1)IMPULSNI METODA/
- /1)IMPULSNI METODA BASS/
- /2)SUMOVA METODA/
- /2)SUMOVA METODA BASS/
- /VYSLEDKY MERENI/
- /WAV SOUBORY/
- /GRAFY/
- /README.rtf/

Každá složka obsahuje skripty pro filtry, vyhodnocení dozvukových křivek, regresní analýzu a výpočet doby dozvuku. Dále obsahuje ukázková data pro možnost ilustrace výpočtu.