

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Mapování akustického pole v dozvukové komoře

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek ŠVAMBERG**
Osobní číslo: **E14N0034P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Mapování akustického pole v dozvukové komoře.**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku rozložení akustického pole v uzavřeném prostoru.
2. Navrhněte vhodnou metodu mapování akustického pole v dozvukové komoře Fakulty elektrotechnické.
3. Pomocí navržené metody mapování zrealizujte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

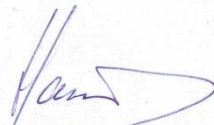
Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN ISO 354: Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti. Praha: Český normalizační institut, listopad 2003.
2. EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. Master Handbook of Acoustics. New York: MC Graw Hill, 2009, ISBN 978-0-07-160333-1.
3. KOLMER, F.; KYNCL, J. Prostorová akustika. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury Alfa, 1982.
4. KUTTRUFF, H. Room Acoustics. Oxfordshire: Spon Press, 2009, ISBN 978-0-415-48021-5.

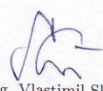
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Schlosser**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Hlavním cílem této diplomové práce je zmapování akustického pole v dozvukové komoře, na základě kterého lze poté určit pozice pro měřicí mikrofony. Práce se tedy zabývá především prostorovou akustikou. V její teoretické části jsou popsány základní akustické pojmy, poté popsána prostorová akustika a nakonec způsoby a druhy měření v prostorové akustice. Druhá část se věnuje již praktické části a to zmíněnému zmapování akustického pole v dozvukové komoře na Fakultě elektrotechnické ZČU.

Klíčová slova

doba dozvuku, prostorová akustika, CPB, FFT, dozvuková komora, vlastní kmity, činitel zvukové pohltivost

Abstract

The main topic of this thesis is room acoustics and mapping of acoustic field in reverberation chamber. In theoretical part are described some basic acoustic facts, information about room acoustics and in the end of theoretical part, there are described eigenfrequencies and typical measurement methods in acoustics. Second part deals with practical part of the thesis, which is mapping of acoustic field in reverberation chamber of Faculty of Electrical Engineering.

Key words

reverberation time, room acoustics, CPB, FFT, reverberation chamber, modal frequencies, absorption coefficient

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 9.5.2016

Marek Švamberg

Poděkování

Tímto bych chtěl rád poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinovi Schlosserovi za veškeré cenné rady, připomínky a vedení práce při jejím vzniku.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ZÁKLADNÍ POJMY AKUSTIKY	11
1.1 ZVUK.....	11
1.2 HLADINA INTENZITY A AKUSTICKÉHO TLAKU	12
2 PROSTOROVÁ AKUSTIKA	13
2.1 POLE PŘÍMÝCH A ODRAŽENÝCH VLN	13
2.2 FREKVENČNÍ PÁSMA V MÍSTNOSTI.....	15
2.3 VLASTNÍ KMITY.....	17
2.4 DOBA DOZVUKU	21
2.4.1 Doba dozvuku podle Sabina	21
2.4.2 Doba dozvuku podle Eyringa.....	23
2.4.3 Doba dozvuku podle Millingtona.....	24
2.5 ČINITEL ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI	25
3 MĚŘÍCÍ METODY POUŽÍVANÉ V PROSTOROVÉ AKUSTICE	27
3.1 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZY	27
3.1.1 CPB analýza	27
3.1.2 Fourierova transformace (DFT, FFT).....	29
3.2 MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	30
3.2.1 Metoda přerušovaného šumu.....	31
3.2.2 Metoda integrované impulsové odezvy	33
3.3 MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ AKUSTICKÉHO POLE	34
4 MAPOVÁNÍ AKUSTICKÉHO POLE DOZVUKOVÉ KOMORY	35
4.1 VÝPOČET KRITICKÉ FREKVENCE.....	36
4.2 VÝPOČET VLASTNÍCH KMITŮ A JEJICH VLNOVÉ DÉLKY.....	37
4.3 PŘÍPRAVA DOZVUKOVÉ KOMORY PRO MĚŘENÍ	40
4.4 POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	41
4.5 NASTAVENÍ PULSE LABSHOP	44
4.6 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	46
4.7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	48
4.8 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	51
ZÁVĚR	54
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	55

Úvod

V dnešní době se dá akustika považovat ve svém okruhu za poměrně důležitý obor. Na řadu přichází například v souvislosti s hudebními koncerty, nebo i jen v obyčejné místnosti, či velkých posluchárnách, kde se využívá veškerých znalostí akustiky k dosažení právě lepší kvality poslechu. Z opačného pohledu zase můžeme mluvit například o měření a dodržování hladiny hluku dané hygienickými předpisy zejména v nočních hodinách. S tímto problémem například měly v posledních letech problémy především venkovní hudební festivaly. Původní limity pro venkovní prostory totiž byly nastaveny hodně přísně, dalo by se říci až nesmyslně, kdy limit hluku v nočních hodinách pro chráněný vnitřní prostor byl nastaven tak, že porušení toho limitu způsobí například i padající listí, což odpovídá přibližně 30 dB. S tímto zákonem bojoval především festival Mighty Sounds, který také měl hlavní iniciativu a zásluhu na úpravě zákona, který nyní dává obcím udělovat krátkodobou výjimku na hlukové limity. Tyto věci byly především jedním z hlavních důvodů, proč mě zaujalo právě toto téma diplomové práce.

Tato diplomová práce se dá rozdělit na dvě hlavní části. Tou první je teoretický úvod do dané problematiky nezbytný právě pro změření rozložení akustického pole. V jeho první kapitole jsou popsány základní pojmy a definice týkající se zvuku. Druhá kapitola se už věnuje konkrétnější části akustiky, kterou je prostorová akustika. Je zde popsáno, jak je rozděleno akustické pole v uzavřeném prostoru, jaké druhy kmitů tyto prostory mohou obsahovat, co znamená doba dozvuku a způsoby jejího výpočtu a v poslední řadě bylo vysvětleno, co znamená činitel zvukové pohltivosti. V další části teoretického úvodu jsou popsány metody, jakými lze vyhodnocovat akustická pole a způsoby jejich měření. Prvně jsou zde porovnány rozdíly mezi CPB analýzou a FFT analýzou. Poté jsou zde vysvětleny dva způsoby, kterými se měří doba dozvuku a především způsob měření rozložení akustického pole, který je hlavním cílem této práce. Druhá část, praktická část, se už zabývá praktickým splněním této práce. Jejím úkolem bylo zmapování rozložení akustického pole v dozvukové komoře, která je umístěna na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity. Nejdříve jsou zde provedeny veškeré výpočty, které jsou potřebné k realizování samotného měření. Na jejich základě je dále znázorněno, jaké body byly v dozvukové komoře zvýrazněny k provedení následného zmapování. Nakonec je zmíněno, jak probíhalo samotné měření a jaké závěry se z něj dají vyvodit.

Seznam symbolů a zkratk

c	..... rychlost zvuku
f	..... frekvence
l	..... délka
p	..... akustický tlak
p_0	..... referenční hodnota akustického tlaku
r	..... reálná složka akustické impedance
z_0	..... vlnový odpor vzduchu
I	..... intenzita zvuku
I_0	..... referenční hodnota intenzity zvuku
L	..... hladina intenzity, nebo akustického tlaku
S	..... plocha
T_{30}	..... doba dozvuku pro pokles o 30 dB
T_{60}	..... doba dozvuku pro pokles o 60 dB
T_E	..... doba dozvuku podle Eyringa
T_M	..... doba dozvuku podle Millingtona
T_s	..... doba dozvuku podle Sabina
V	..... objem
W_a	..... zvuková energie pohlcená plochou
W_i	..... zvuková energie dopadající na plochu
W_r	..... zvuková energie odražená od plochy
α	..... činitel zvukové pohltivosti
α'	..... Eyringův činitel zvukové pohltivosti
$\alpha(v)$	..... činitel zvukové pohltivosti závislý na úhlu
ρ	..... hustota prostředí

1 Základní pojmy akustiky

Stejně jako u každého jiného vědního oboru, tak i u akustiky je potřeba na začátku definovat určité pojmy, které tento obor definují. Podle jednoho ze základních rozdělení, by se dala akustika rozdělit do pěti skupin: fyzikální akustika, hudební akustika, fyziologická akustika, stavební akustika a elektroakustika. Fyzikální akustika popisuje způsoby vzniku a šíření zvuku, jeho odrazem a pohlcováním okolními materiály. Druhá skupina, tedy hudební akustika, se věnuje například zvukům a jejich kombinací, vytvářením a modulací tónů a dalšími závislostmi potřebnými pro hudbu. Další skupinou je fyziologická akustika. Ta se zabývá vznikem zvuku pomocí lidského těla a jeho vnímáním. Jsou zde popsány sluchové orgány, jejich citlivost a zkreslení v nich, teorie slyšení, maskování zvuků a například ještě akustika hlasu a řeči. Předposlední skupinou je stavební fyzika zkoumající přenosy hluku mezi dvěma prostory, nebo prostorovou akustikou, která zas vyhodnocuje podmínky kvality poslechu hudby, nebo řeči v místnostech. Tato skupina obsahuje pro představu předpisové a normativní požadavky na prostory, nebo zvukové izolační vlastnosti a materiály. Poslední výše zmíněnou podskupinou je elektroakustika. Elektroakustika se zabývá zkoumáním šíření, záznamu a reprodukci zvuku za použití elektrického signálu, potažmo elektrických přístrojů. Jedná se především o měniče, kterými jsou mikrofony a reproduktory. Jedná se teda o propojení oborů akustiky a elektroniky. V této diplomové práci ovšem nebudou popsány veškeré základní pojmy, ale v následujících podkapitolách jen ty nezbytné, které jsou potřebné pro tuto práci. [1, 3, 10]

1.1 Zvuk

Zvukem se rozumí kterékoliv chvění pevného, kapalného, nebo plynného prostředí v rozsahu slyšitelných frekvencí. Slyšitelný rozsah se pohybuje v rozmezí od 16 Hz do 20 kHz. Jestliže má zvuk nižší frekvenci, než 16 Hz, jedná se o infrazvuk. Naproti tomu při zvuku o frekvenci přesahující 20 kHz již mluvíme o ultrazvuku. V plynném prostředí se zvuk šíří pomocí podélného vlnění. Zvuk je přenášen částicemi vzduchu, které kmitají okolo své rovnovážné polohy ve směru šíření zvukových vln. Takovéto šíření poté v prostoru způsobuje střídavé zhuštění a následné zředění vzduchu, které se ve výsledku

projeví jako časové a prostorové změny tlaku. Tyto změny mohou probíhat jak periodicky, tak i neperiodicky. Příkladem periodického šíření je například sinusový průběh s určitou frekvencí. Každý zvuk je charakterizovaný svojí frekvencí a intenzitou. Frekvence zvuku by se pro člověka dala popsat jako výška tónu a intenzita jako jeho hlasitost.

1.2 Hladina intenzity a akustického tlaku

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, každý zvuk je definovaný frekvencí a intenzitou. Podle Fechnerova – Wereberova zákona, hlasitost sluchového vjemu stoupá s logaritmem intenzity zvuku. V důsledku tohoto zákona se definovaly vztahy pro převody intenzity a akustického tlaku do hladin, které jsou vyjádřeny v decibelech. Pro převod intenzity na hladinu intenzity se používá vztah (1.1) a pro vyjádření hladiny akustického tlaku vztah (1.2). V tabulce 1 jsou pro představu uvedeny zdroje zvuku pro různé hladiny a k nim odpovídající akustická intenzita a akustický tlak. [1]

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1.1)$$

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (1.2)$$

kde:

- L hladina intenzity, nebo akustického tlaku [dB],
- I intenzita zvuku [W/m^2],
- I_0 referenční hodnota intenzity zvuku [$10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$],
- p akustický tlak [Pa],
- p_0 referenční hodnota akustického tlaku [$2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$].

Tabulka 1 Příklady zdrojů pro hladiny zvuku [převzato z 1, 11]

Akustická intenzita [W/m ²]	Akustický tlak [Pa]	Hladina zvuku [dB]	Slovní vyjádření	Příklad zdroje
		10	práh slyšení	
10 ⁻¹⁰	0,0002	20	hluboké ticho	bezvětří
		30		padající listí
10 ⁻⁸	0,002	40	ticho	lednice
		50	klid	větrák
10 ⁻⁶	0,02	60		běžný hovor
		70	mírný hluk	televize
10 ⁻⁴	0,2	80		vysavač
		90	silný hluk	sekačka na trávu
10 ⁻²	2	100		motocykl
		110	velmi silný hluk	řetězová pila
		120	extrémně silný hluk (hranice zákazu pobytu osob)	pneumatická nýtovačka
10	60	130	práh bolesti	
		140	vznik akustického traumatu	start tryskového letadla

2 Prostorová akustika

Prostorová akustika je obor zabývající se návrhem, realizací a rozložením akustického pole v uzavřeném prostoru. K tomu je důležité znát veškeré zákony šíření zvuku, jako jakým směrem se zvuk šíří, k jaké dojde změně šíření při dopadu na nějakou překážku, nebo jak dochází k jeho tlumení.

2.1 Pole přímých a odražených vln

Na tom, jak bude akustické pole vypadat, má vliv několik činitelů. Jedná se především o tyto činitele: [1, 2]

- Umístění zdroje
- Rozměry prostoru
- Pohltivost v prostoru

Akustické pole v prostoru se dá rozdělit na dvě části, pole přímých vln a pole odražených vln. V bezprostřední blízkosti okolo zdroje je vytvářeno pole přímých vln. Okolí, ve kterém vzniká, neboli vzdálenost od zdroje, odpovídá přibližně vlnové délce zdroje zvuku a jeho rozměrům. Velikost blízkého pole je ale také ovlivněna kmitočtem a rozměry zdroje a fázovými posuny. Toto pole je ale poměrně obtížné vypočítávat, a tak se určuje především experimentálně. [2]

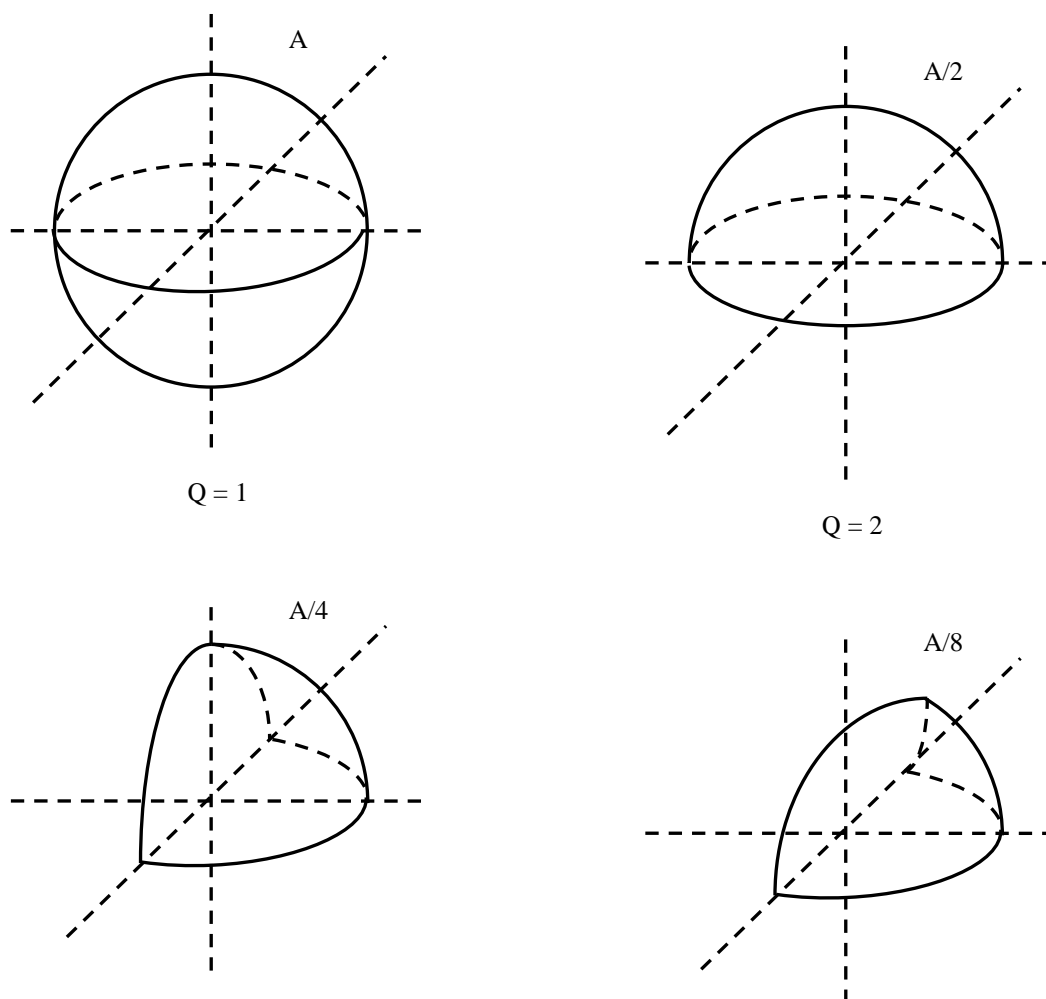
S přibývajícím vzdáleností se však toto pole mění na pole odražených vln. V odraženém poli, nebo také dozvukovém, se dohromady skládají odražené vlny od stěn s vlnami jdoucími od zdroje. V tomto poli už však akustický tlak skoro vůbec nezávisí na vzdálenosti od zdroje. Vzdálenost, v jaké se mění pole přímých vln na pole odražených, se nazývá kritická vzdálenost r_k a je určena jako: [1, 2]

$$r_k = \sqrt{\frac{QV}{T_s}} \quad (2.1)$$

kde:

- r_k kritická vzdálenost [m]
- Q činitel směrovosti zdroje [-],
- V celkový objem místnosti [m^3],
- T_s doba dozvuku místnosti [s].

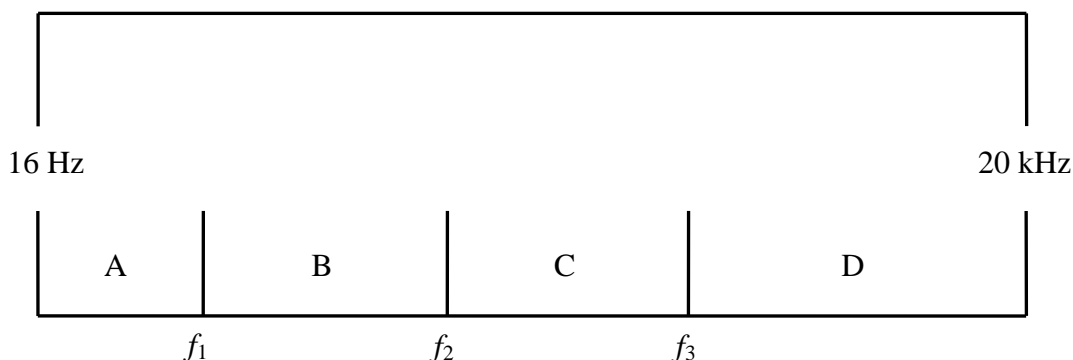
Činitel směrovosti Q nám popisuje směrové vlastnosti zdroje. Je určen jako poměr intenzity zvuku, kterou v nějaké vzdálenosti zdroj vyvolává a intenzitou ve stejné vzdálenosti, kterou by vyvolal zdroj s kulovou charakteristikou. Dále je také ovlivněna vlnovou délkou zdroje, jeho rozměry a umístění v prostředí. Na obr. 1 jsou znázorněny některé hodnoty Q . [1] ;



Obrázek 1 Vliv různého prostorového uspořádání bodového zdroje na jeho činitel směrovosti [převzato z 1]

2.2 Frekvenční pásma v místnosti

Spektrum slyšitelného zvuku z pohledu vlnové délky je velmi široké. Když vezmeme v úvahu běžně uvažovaný rozsah slyšení, který má frekvenční rozpětí 16 Hz až 20 kHz, dostaneme rozmezí vlnových délek 17 m – 17 mm. Chování zvuku je tedy značně ovlivněno právě vlnovou délkou. V tomto rozsahu frekvencí dochází ke značným změnám principů šíření zvuku, a proto je pro jejich popis nutné využít různé nástroje. Z tohoto důvodu se tento frekvenční rozsah rozdělí do následujících čtyř oblastí naznačených na obr. 2. [4]



Obrázek 2 Zobrazení rozdělení rozsahů frekvencí do pásem [převzato z 3]

Jednotlivé rozdělení pásem závisí na rozměrech zkoumané místnosti, jak je vidět na rovnicích rozdělující jednotlivá pásma. První oblast, označená písmenem A, je oblast velmi nízkých frekvencí. Její šířka je dána minimální slyšitelnou frekvencí, tedy 16 Hz a na maximální hodnotě daná vztahem pro první modální frekvenci: [4]

$$f_1 = \frac{c}{2L} \quad (2.2)$$

kde:

- f_1 první modální frekvence [Hz],
- c rychlost zvuku [340 m/s],
- L rozměr nejdelší strany místnosti [m].

Tato frekvence f_1 je také zároveň prvním axiálním módem. Pod touto frekvencí nejsou žádné rezonanční frekvence místnosti. [4]

„V dalším pásmu, pásmu B, je vlnová délka srovnatelná s rozměry místnosti. Ta je ohraničena frekvencí prvního axiálního modu f_1 a kritickou frekvencí f_2 , která je daná rovnicí:“ [4]

$$f_2 = 2000 \sqrt{\frac{T_s}{V}} \quad (2.3)$$

kde:

- f_2 kritická frekvence [Hz],
- T_s doba dozvuku v místnosti [s],
- V celkový objem místnosti [m^3].

Oblast C je pouze přechodovou oblastí mezi pásmy B a D. Je ohraničena kritickou frekvencí na spodní straně a na horní hranici frekvencí, která je rovna čtyřnásobku právě také kritické frekvence, $f_3 = 4f_2$. Poslední pásmo D je tedy definováno frekvencemi od čtyřnásobku kritické frekvence f_3 až do nejvyšší slyšitelné frekvence. V tomto pásmu už jsou vlnové délky mnohem kratší než rozměry místnosti, ale pořád slyšitelné. V tento okamžik již přichází na řadu podobor prostorové akustiky, kterým je akustika statistická.

2.3 Vlastní kmity

Každý uzavřený prostor je z pohledu akustiky definován a ovlivněn určitým počtem vlastních kmitů, které určují jeho vlastnosti. Ty jsou vybuzeny vlastním zdrojem, když dochází ke shodě budící frekvence s frekvencí vlastních kmitů místnosti. Při této shodě dochází k rezonanci, během které jsou amplitudy vždy vyšší než při ostatních frekvencích. Aby byl přenos zvuku dostatečně kvalitní, musí být splněna podmínka co nejvyššího množství vlastních kmitů v poslechovém pásmu. Nejnižší vlastní frekvence by měla být hluboko pod uvažovaným frekvenčním pásmem, toho je ale možno docílit jen u místností s objemem alespoň 200 m^3 . [1, 2]

Vlastní kmity kromě kvality přenosu zvuku ovlivňují také přechodné jevy. Při šíření zvuku dochází k utlumení, nebo zesílení zvukové energie vlivem odrazů od stěn, případně jejím pohlcováním. Toto zesílení, nebo zeslabení závisí na tom, na jaké frekvenci je zvuk přenášen a jakému vlastnímu kmitu tato frekvence odpovídá, neboť každý je jinak tlumen.

Pro kvalitní přenos zvuku je úkolem dosáhnout co největší hustoty vlastních kmitů v celém pásmu. Frekvence vlastních kmitů se vypočítají podle rovnice: [2, 4]

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (2.4)$$

kde:

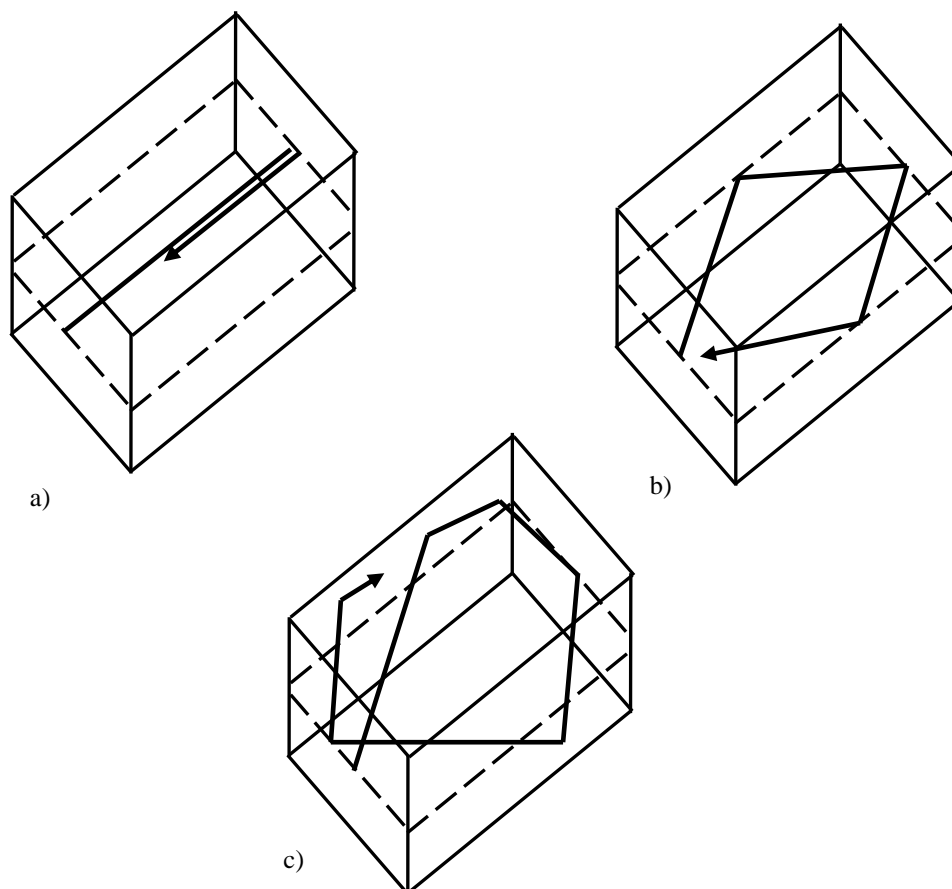
f_n	frekvence n-tého módu [Hz],
c	rychlost zvuku [340 m/s],
n_x, n_y, n_z	kombinace celých čísel [-],
l_x, l_y, l_z	rozměry místnosti [m].

Podle kombinací celých čísel n_x, n_y, n_z se vypočtené vlastní frekvence rozdělují do tří druhů módů: [3, 5]:

- axiální – neboli osová, vzniknou, když dvě z těchto čísel jsou rovna nule a mají poté směr podél jedné ze zdí místnosti,
- tangenciální – ty vznikají pouze při jedné nule v kombinaci celých čísel. Tato vlna je kolmá na jednu ze stěn místnosti, nebo jinak řečeno se vlna šíří odrazem od čtyř zdí. Oproti axiálním módům mají poloviční energii,
- šikmé – ani jedno z kombinačních čísel není rovné nule a následná vlna se odráží od všech stěn místnosti. V porovnání s axiálními módy mají 4x menší energii, nebo poloviční energii tangenciálních módů.

Průběh šíření a odrazů těchto tří druhů módů vlastních frekvencí je znázorněn na obr.

3.



Obrázek 3 Průběh jednotlivých módů a) axiální, b) tangenciální, c) šikmé [převzato z 4]

Celkový počet vlastních kmitů v místnosti není závislý na tvaru místnosti, tj. na jednotlivých rozměrech místnosti, ale jen na jejím celkovém objemu. To je patrné ze zjednodušeného vztahu pro přibližný počet vlastních kmitů do určité frekvence, viz. rovnice (2.5), která vyjadřuje přibližný počet vlastních kmitů. Protože pro nižší frekvence dochází k nepřesnostem při výpočtu počtu vlastních kmitů, pro přesnější výpočet jejich počtu slouží poupravená rovnice (2.6). Co je ovšem ovlivněno tvarem místnosti, je pouze vzájemné posunutí vlastních kmitů v celém spektru. Z toho vyplývá, že tedy není ani moc podstatný konkrétní tvar dané místnosti. [2, 4]:

$$N \approx \frac{4}{3} \pi V \frac{f^3}{c^3} \quad (2.5)$$

$$N = \frac{4}{3} \frac{\pi V}{c^3} f^3 + \frac{\pi S}{4c^2} f^2 + \frac{l}{8c} f \quad (2.6)$$

$$S = 2(l_x l_y + l_y l_z + l_x l_z) \quad (2.7)$$

$$l = 4(l_x + l_y + l_z) \quad (2.8)$$

kde:

N	přibližný počet vlastních kmitů [-]
V	objem místnosti [m^3],
c	rychlost zvuku [340 m/s],
S	celková plocha stěn [m^2],
l	celková délka hran pravoúhlého prostoru [m],
l_x, l_y, l_z	rozměry místnosti [m].

U místností, u kterých je požadavek na dobré akustické vlastnosti, je důležité při návrhu počítat s tím, že nevhodně zvolené rozměry místnosti ovlivňují kvalitu zvuku. Například by se mělo vyvarovat vzájemných násobků rozměrů stěn, jako například poměru 1:2:4. Naopak pro menší místnosti je vhodný poměr délky, šířky a výšky 2,5:1,5:1. U větších prostorů je zase lepší poměr 3:2:1. [2]

Jak již bylo zmíněno výše u rozdělení módů, jednotlivé druhy mají oproti sobě různé energie. Tangenciální módy mají poloviční energii oproti axiálním. To je odůvodněno podle rovnic (2.9) a (2.10). Šikmé módy mají dokonce čtvrtinovou energii axiálních módů, viz rovnice (2.11). [5]

$$w_{axial} = \frac{1}{l_x} \int_0^{l_x} \cos^2 \left(\frac{m\pi}{l_x} x \right) dx = 1/2 \quad (2.9)$$

$$w_{tan} = \frac{1}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \cos^2\left(\frac{m\pi}{l_x} x\right) \cos^2\left(\frac{n\pi}{l_y} y\right) dx dy = \frac{1}{4} \quad (2.10)$$

$$w_{šikmé} = \frac{1}{l_x l_y l_z} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \int_0^{l_z} \cos^2\left(\frac{n_x \pi}{l_x} x\right) \cos^2\left(\frac{n_y \pi}{l_y} y\right) \cos^2\left(\frac{n_z \pi}{l_z} z\right) dx dy dz = \frac{1}{8} \quad (2.11)$$

kde:

- w energie jednotlivých módů,
- l_x, l_y, l_z rozměry místnosti [m],
- n_x, n_y, n_z kombinace celých čísel [-].

2.4 Doba dozvuku

Dozvukem se rozumí postupné ubývání akustické energie po vypnutí zdroje, ke kterému dochází vlivem pohltivosti stěn a pohltivosti zvuku ve vzduchu. K pohltivosti zvuku ve vzduchu dochází především ve velkých prostorech. Doba dozvuku tedy udává rychlost poklesu zvuku, kdy hustota energie, nebo intenzita zvuku klesne ze své původní hodnoty o 60 dB, neboli na jednu miliontinu. Doba dozvuku se značí písmeny T_S , T_E , nebo T_M a je udávána v sekundách. Indexy u značení doby dozvuku říkají, podle které rovnice se daný dozvuk počítal. Jde o vzorec podle Sabina - T_S , nebo podle Eyringa - T_E , případně podle Millingtona - T_M . [5]

2.4.1 Doba dozvuku podle Sabina

Jedná se o nejčastěji používaný vzorec pro výpočet doby dozvuku. Jeho výhoda spočívá v jednoduchosti výrazu, i přesto, že může být trochu nepřesný. Především je vhodný pro méně tlumené prostory, do činitele zvukové pohltivosti $\alpha = 0,25$, protože P. E. Sabin předpokládal, že pokles energie je v uzavřeném prostoru plynulý. Sabinův vztah je dán rovnicí: [4, 5]

$$T_s = 0,161 \frac{V}{\alpha S} \quad (2.12)$$

kde:

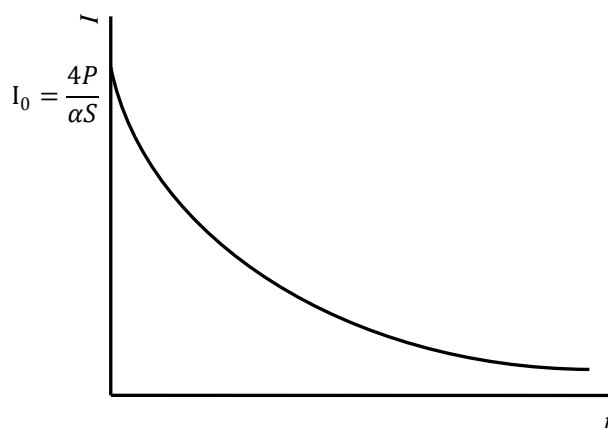
- T_s doba dozvuku podle Sabina [s],
- V objem místnosti [m^3],
- α činitel pohltivosti zvukové pohltivost[-],
- S součet ploch všech stěn [m^2],
- 0,161 konstanta při teplotě vzduchu 20 °C.

V případě, že stěny obklopující uzavřený prostor nemají stejný činitel zvukové pohltivosti, musí se nejdříve spočítat jeho průměrná hodnota z jednotlivých zdí vztahem [2]:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S} \quad (2.13)$$

kde:

- α průměrná pohltivost stěn [-]
- α_i činitel zvukové pohltivosti jednotlivých stěn [-],
- S_i jednotlivé plochy stěn [m^2],
- S celková plocha všech stěn v místnosti [m^2].



Obrázek 4 Pokles intenzity zvuku v uzavřeném prostoru po vypnutí zdroje [převzato z 1]

Postupem času však bylo experimentálně zjištěno, že přesnější vztah pro Sabinovu rovnici doby dozvuku je [2]:

$$T_s = 0,164 \frac{V}{\alpha S} \quad (2.14)$$

kde:

T_s	doba dozvuku podle Sabina [s]
V	objem místnosti [m ³],
α	činitel zvukové pohltivosti [-],
S	celková plocha stěn [m ²].

Jak již bylo na začátku kapitoly zmíněno, Sabinův vztah není úplně ideální a platí pro místnosti s malým činitelem zvukové pohltivosti. Například pro činitel zvukové pohltivosti $\alpha = 0$, tedy dokonale odrazné povrchy, by vyšla doba dozvuku nekonečná. Naopak při činiteli zvukové pohltivosti $\alpha = 1$, což jsou dokonale pohltivé plochy, by měla vyjít doba dozvuku nulová. Jak je však patrné z rovnice (2.14), doba dozvuku vyjde rovna hodnotě $0,164 V/S$. [2]

2.4.2 Doba dozvuku podle Eyringa

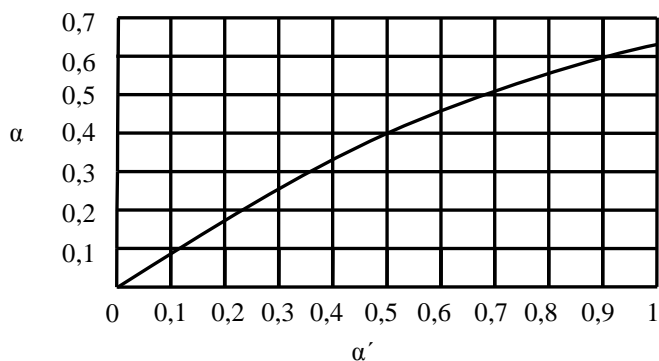
Sabinův vztah předpokládal, že útlum energie je plynulý. Na rozdíl od něj Eyring počítal s tím, že útlum po odrazu už je skokový. To v praxi znamená, že stěny místnosti už mají vyšší střední koeficient činitele zvukové pohltivosti. Při maximálním činiteli pohltivosti, tedy $\alpha' = 1$, vyjde, že doba dozvuku $T_E = 0$. Doba dozvuku podle Eyringa je tedy dána vztahem [2]:

$$T_E = 0,164 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha')} = 0,164 \frac{V}{\alpha' S} \quad (2.15)$$

kde:

- T_E doba dozvuku podle Eyringa [s]
- V objem místnosti [m^3],
- α koeficient útlumu [-],
- S plocha stěn [m^2],
- α' Eyringův koeficient útlumu $\alpha' = \ln(1 - \alpha)$ [-].

Stejně jako u Sabinova vztahu, pokud jednotlivé stěny nemají stejný koeficient útlumu, jeho hodnota se vypočte pomocí výše zmíněné rovnice, rov. (2.13). Na obr. 5 je znázorněna grafická závislost koeficientu pohltivosti mezi Sabinovo a Eyringovo vztahem. [1, 2]



Obrázek 5 Závislost α na α' [převzato z 2]

2.4.3 Doba dozvuku podle Millingtona

Stejně jako Sabinův vztah byl omezen pro určité použití, tak i Eyringova rovnice doby dozvuku je přesná jen pro určité parametry. Tím parametrem je opět koeficient zvukové pohltivosti a to jeho hraniční hodnota 0,8. Jakmile je větší než tato hodnota, je lepší použít třetí vztah pro dobu dozvuku, a to vztah podle Millingtona. První dva vztahy předpokládaly, že útlumy po každém odrazu je buď plynulý, nebo skokový. Millington už zohledňuje jednotlivé odrazy a tedy útlumy jednotlivě. Millingtonova doba dozvuku se vypočte pomocí rovnice [2]:

$$T_M = 0,164 \frac{V}{-\sum_{i=1}^n S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (2.16)$$

kde:

- T_S doba dozvuku podle Millingtona [s]
- V objem místnosti [m^3],
- α_i činitel zvukové pohltivosti jednotlivých ploch [-],
- S_i jednotlivé povrchy stěn [m^2].

2.5 Činitel zvukové pohltivosti

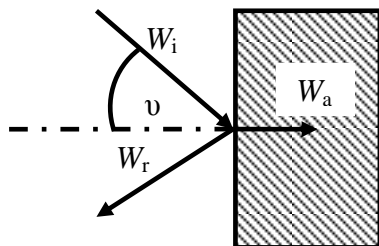
Činitel zvukové pohltivosti vyjadřuje schopnost materiálu utlumovat zvukovou vlnu při nárazu na něj. Činitel zvukové pohltivosti se značí řeckým písmenem α a jde o bezrozměrné číslo. Může nabývat pouze hodnot v intervalu od 0 do 1. To znamená, že plochy s činitel zvukové pohltivosti $\alpha = 0$ jsou dokonale odrazné plochy a nedochází u nich k žádnému útlumu. Naopak oproti tomu při činiteli zvukové pohltivosti $\alpha = 1$ dochází k úplnému pohlcení zvuku a jde tedy o dokonale pohltivé plochy. Činitel zvukové pohltivosti lze vypočítat podle vztahu (2.17). V tabulce 2 jsou pro představu uvedeny hodnoty činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci pro některé materiály. [1,2,5]

$$\alpha = \frac{W_a}{W_i} \quad (2.17)$$

$$W_a = W_i - W_r \quad (2.18)$$

kde:

- α činitel zvukové pohltivosti [-],
- W_a zvuková energie pohlcená plochou [W],
- W_i zvuková energie dopadající na plochu [W],
- W_r zvuková energie odražená od plochy [W].



Obrázek 6 Znárodnění směru energií při dopadu na pohltivou plochu

Tabulka 2 Příklady hodnot činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci [8]

Materiál	Frekvence f [Hz]					
	Činitel zvukové pohltivosti α [-]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Beton hutný	0,01	0,016	0,019	0,023	0,035	0,05
Dřevotřísková deska	0,3	0,25	0,1	0,8	0,05	0,04
Koberec plyšový	0,13	0,11	0,15	0,3	0,63	0,9
Linoleum	0,02	0,025	0,03	0,035	0,04	0,04
Okno zasklené	0,3	0,02	0,15	0,1	0,06	0,04
Sádrokartonová deska	0,11	0,13	0,05	0,02	0,02	0,03
Zdivo cihelné režné	0,024	0,025	0,032	0,042	0,049	0,07

Vztah (2.17) předpokládá kolmý dopad zvukové vlny na stěnu. Ve skutečnosti však zvuková vlna šířící se prostorem může dopadnout na stěnu pod jakýmkoliv úhlem. Z toho vyplývá, že činitel zvukové pohltivosti je závislý na úhlu zvukové vlny. Vezmeme-li v úvahu, že pohltivé plochy stěn jsou v difúzním poli, to znamená, že zvukové vlny jsou rovnoměrně rozprostřeny do všech směrů šíření, pak je činitel zvukové pohltivosti pro všesměrový dopad zvuku určen rovnicí: [2]

$$\alpha = \int_0^{\pi/2} \alpha(\vartheta) \sin 2\vartheta d\vartheta \quad (2.19)$$

$$\alpha(\vartheta) = \frac{4rz_0 \cos \vartheta}{(r \cos \vartheta + z_0)^2} \quad (2.20)$$

$$z_0 = \rho c \quad (2.21)$$

kde:

- α činitel zvukové pohltivosti [-],
- $\alpha(\nu)$ činitel zvukové pohltivosti závislý na úhlu [-],
- r akustický odpor,
- z_0 vlnový odpor vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
- ρ hustota prostředí [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
- c rychlost zvuku [340 m/s].

Jak bylo zmíněno, činitel zvukové pohltivosti je závislý na úhlu dopadající zvukové vlny. Při kolmém dopadu je koeficient zvukové pohltivosti větší než pro šikmý dopad. Z toho vyplývá, že axiální módy jsou více tlumeny než ostatní. [3]

3 Měřicí metody používané v prostorové akustice

3.1 Spektrální analýzy

3.1.1 CPB analýza

CPB analýza je frekvenční analýza. Je založena na rozdělení měřeného signálu na pásma o konstantní procentuální šířce. Odtud je odvozen její název z anglického constant percentage band, zkráceně CPB. K analýze se používají jednotlivé filtry, které jsou definovány jejich středními kmitočty. Všechny používané filtry mají stejnou směrnici útlumu. To znamená, že při srovnání dvou filtrů o různých středních frekvencích, tak ten s vyšší frekvencí zabírá větší frekvenční pásmo, pro které je používán. Z téhle vlastnosti tedy vyplývá, že při dvojnásobné frekvenci se pokrývané pásmo zvětší také 2x. Při zobrazování frekvenčních spekter se tedy používá logaritmická osa, právě proto, aby jednotlivá pásma měla stejnou šířku. Měřicí filtry lze rozdělit do několika skupin podle toho, jak moc velké pásmo mají pokrývat vzhledem k základnímu. Základními filtry jsou jednooktávové. Oktáva je definovaná jako interval mezi dvěma tóny, jejichž poměr kmitočtů je 2:1. Dalšími skupinami používaných filtrů jsou zlomkooktávové filtry, které zajišťují jemnější dělení. Nejpoužívanějšími zlomkooktávovými filtry jsou 1/3 oktávové,

ale také používané jsou například 1/12, 1/24 a 1/48 oktávové. V tabulce 3 jsou zobrazeny používané střední kmitočty pro jedno a třetinooktávové filtry.[6, 7]

Tabulka 3 Používané střední frekvence pro 1/1 a 1/3 filtry [7]

Střední kmitočet v pásmu [Hz]	1/1 oktávový	1/3 oktávový	Střední kmitočet v pásmu [Hz]	1/1 oktávový	1/3 oktávový	Střední kmitočet v pásmu [Hz]	1/1 oktávový	1/3 oktávový
25		x	250	x	x	2 500		x
31,5	x	x	315		x	3 150		x
40		x	400		x	4 000	x	x
50		x	500	x	x	5 000		x
63	x	x	630		x	6 300		x
80		x	800		x	8 000	x	x
100		x	1 000	x	x	10 000		x
125	x	x	1 250		x	12 500		x
160		x	1 600		x	16 000	x	x
200		x	2 000	x	x	20 000		x

Rozsahy pásem pro jednotlivé filtry se vypočítají podle následujících vztahů. Pro jednooktávové filtry je spodní hranice dána rovnicí (3.1) a horní frekvence rovnicí (3.2). Pro třetinooktávové filtry jsou jejich rozsahy dány vztahy (3.3) a (3.4). Na obr. 7 je znázorněna šířka pásma pro oktávový a třetinooktávový filtr se střední frekvencí 1000 Hz. [6]

$$f_D = \frac{f_s}{\sqrt{2}} \quad (3.1)$$

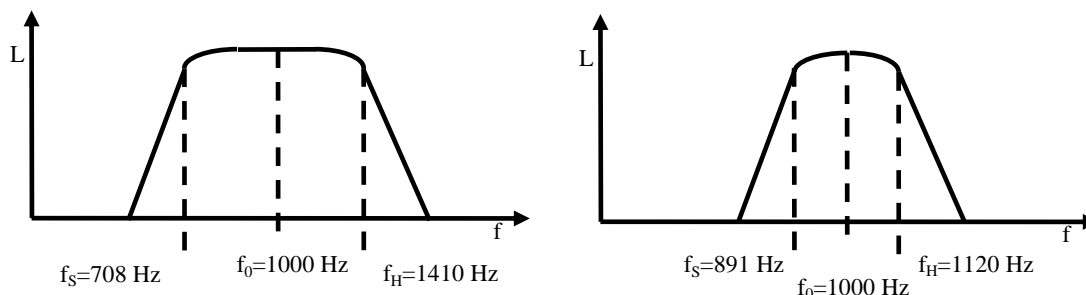
$$f_H = f_s \sqrt{2} \quad (3.2)$$

$$f_D = \frac{f_s}{\sqrt[6]{2}} \quad (3.3)$$

$$f_H = f_s \sqrt[6]{2} \quad (3.4)$$

kde:

- f_s střední frekvence filtru [Hz],
- f_D minimální frekvence filtru [Hz],
- f_H maximální frekvence filtru [Hz].



Obrázek 7 Zobrazení šířky pásma pro oktávový a 1/3 oktávový filtr 1000 Hz [převzato z 7]

3.1.2 Fourierova transformace (DFT, FFT)

Druhou metodou jak zpracovávat frekvenční analýzu je pomocí Fourierovy transformace. Fourierova transformace slouží k převodu časového průběhu funkce $x(t)$ do její spektrální funkce. Transformaci lze provést jak pro periodické, tak i neperiodické funkce. Takto převedené spektrum je vyjádřeno spojitou funkcí frekvence. Fourierova transformace funkce je dána vztahem (3.5) a inverzní transformace vztahem (3.6). [3, 12, 13]

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.5)$$

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.6)$$

kde:

$x(t)$ časový průběh funkce,

$X(\omega)$ frekvenční spektrum funkce.

Jednodušším způsobem převodu funkce mezi časovým a frekvenčním zobrazením je použití diskretní Fourierovy transformace. Ta se používá z důvodu poměrně složitého výpočtu při použití předchozích vztahů, ke kterým je potřeba znát průběh funkce. Diskretní Fourierova transformace (DFT) pracuje s nespojitým signálem, který se skládá ze sekvencí N diskretních, periodicky se opakujících čísel. Stejně jako u normální Fourierovy

transformace, tak i u diskretní je převod vyjádřen přímou transformací (3.7), a zpětnou (3.8). [3, 6]

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-\frac{2\pi i k n}{N}} \quad (3.7)$$

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{\frac{2\pi i k n}{N}} \quad (3.8)$$

kde:

$f(n)$ časový průběh funkce,

$F(k)$ frekvenční spektrum funkce,

k $0, 1, 2, \dots, N-1$.

Jelikož diskretní Fourierova transformace je značně časově náročná, používá se v dnešní době rychlejší algoritmus, a to rychlá Fourierova transformace (FFT). Ta už nepracuje s N vzorky, ale pouze s $N/2$ vzorků. Pro ukázkou porovnání časové náročnosti je ve zdroji [12] uveden příklad. Je dána posloupnost $N = 10^6$ a počítač s cyklem dlouhým 1 μ s. Rychlá Fourierova transformace by potřebovala k výpočtu 30 sekund, kdežto oproti tomu diskretní dva týdny času. To je tedy přibližně 40 000x delší čas. [12]

3.2 Měření doby dozvuku

Jak již bylo popsáno výše, doby dozvuku lze spočítat podle teoretických vztahů podle Sabina, Eyringa, nebo Millingtona. Ovšem pokud budeme chtít zjistit onu dobu dozvuku v prostředí, kde například neznáme veškeré parametry, nebo si jen ověřit správnost vypočtených hodnot, budeme muset přistoupit na praktické měření této doby. Jako veškeré přesnější metody pro měření, kterým můžeme dát nějakou váhu významu, tak i tato je popsána normami. Primárně se měřením doby dozvuku zabývá norma ČSN EN ISO 3382-1, nebo ČSN EN ISO 3382-2, ale je také zmíněna v normě ČSN EN ISO 354 Akustika – Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti. Jsou v ní popsány dvě metody pro

měření – metoda přerušovaného šumu a metoda integrované impulsové odezvy. Jak bude dokázáno dále v praktické části, čím bude větší rozsah frekvence signálu, tím bude i větší počet vybudzených vlastních kmitů.

3.2.1 Metoda přerušovaného šumu

Metoda přerušovaného šumu probíhá v třetinooktávových pásmech v rozmezí 100 – 5 000 Hz. Při měření se získávají dozvukové křivky, které znázorňují pokles akustického tlaku po vypnutí zdroje. Tyto křivky musejí být změřena vícekrát při stejném rozestavení měřících zařízení v místnosti a následně vyhodnocena zprůměrováním. To zajistí opakovatelnost měření. [1, 9]

Schéma pro měření doby dozvuku je znázorněno na obr. 8. Na vysílací straně je složeno z generátoru signálu (G), zesilovače (Z) a reproduktoru (R) s všesměrovou charakteristikou, které mají činitel směrovosti do 6 dB. Zaznamenávající strana je složena ze všesměrových mikrofonů (M), filtrů (F), zesilovače (Z) a zaznamenávajícího zařízení. [1]



Obrázek 8 Blokové schéma pro měření doby dozvuku

Jako zdroj zvuku využívaný pro měření doby dozvuku se použije všesměrový zdroj. Měří se pro různá umístění zdroje zvuku v místnosti, ale jejich vzdálenost musí být od sebe minimálně 3 m. Pro měření se používají všesměrové mikrofony. Mikrofony by měly být rozmístěné tak, aby rovnoměrně vyplňovaly měřený prostor. Avšak minimální počet nezávislých pozic umístění mikrofonů a zdrojů musí být 12. Umístění jednotlivých mikrofonů v měřené místnosti by měly mít od sebe minimálně tyto vzdálenosti [9]:

- 1,5 m vzájemně mezi sebou,
- 2 m od zdrojů zvuku,
- 1 m od kteréhokoliv povrchu místnosti.

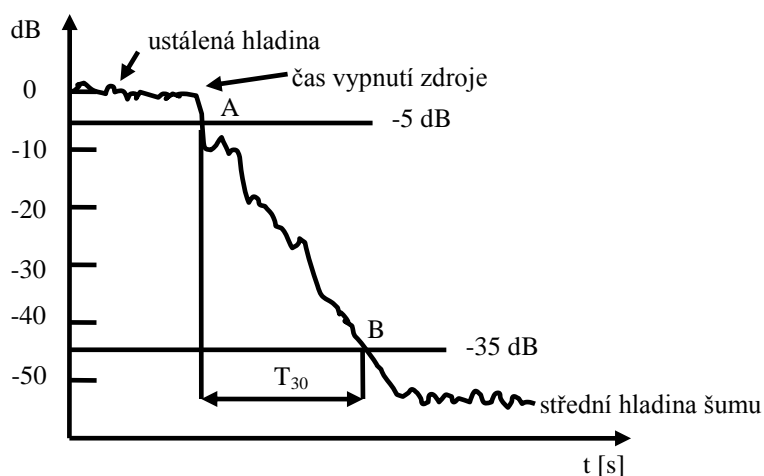
V prvním kroku měření je nejdřív nutné nastavit akustický výkon zdroje takový, aby hladina akustického tlaku byla minimálně 45 dB nad hladinou hluku pozadí. Poté se zapne buzení místnosti, které musí být dostatečně dlouhé, aby se vytvořila ustálená hladina akustického tlaku ve všech uvažovaných frekvenčních pásmech. Tato doba závisí na velikosti měřeného prostoru a jeho pohltivosti a neměla by být menší než polovina doby dozvuku. Po vypnutí zdroje se sleduje poklesová křivka. Z ní je patrná rychlost úpadku akustického tlaku. Doba dozvuku se zjistí z času poklesu akustického tlaku od -5 dB do -35 dB oproti ustálené hodnotě, viz obr. 9. Jak je patrné z rozmezí, sleduje se zde úpadek pouze o 30 dB. Doba dozvuku je ovšem definována jako změna o 60 dB a je tedy nutné zjištěnou hodnotu přepočítat podle vztahu (3.9). [2]

$$T_{60} = 2 \cdot T_{30} \quad (3.9)$$

kde:

T_{60} doba dozvuku pro pokles o 60 dB [s],

T_{30} doba dozvuku pro pokles o 30 dB [s].



Obrázek 9 Určení doby dozvuku z dozvukové křivky [převzato z 1]

3.2.2 Metoda integrované impulsové odezvy

Druhou metodou jak změřit dobu dozvuku je metodou integrované impulsové odezvy. Ta využívá jako zdroj signálu třeba šumové impulzy, výstřel z pistole, prasknutí balónku, jiskrový výboj, sekvence pseudonáhodného šumu, nebo speciální signály, které je možné použít i ve více hlasitějším prostředí. Při zpracovávání zdrojového signálu se využije metody, kterou vynalezl německý fyzik Manfred R. Schroeder, tedy Schroederovy metody. Tato metoda má oproti předchozí metodě, metodě přerušovaného šumu jednu výhodu a to – úsporu času. U první metody bylo potřeba většího počtu měření a následného průměrování, abychom dostali vyhlazený průběh bez jakýchkoliv odchylek. Tento výsledný průběh lze právě pomocí Schroederovy metody získat ihned, právě bez většího počtu měření. Jde tedy o deterministickou funkci. Tato metoda vychází z rovnice (3.10), která ovšem platí za podmínky, že spektrální složení impulsu a šumového signálu je stejné. [1, 2]

$$W(t) \sim \int_t^{\infty} p^2(x) dx = \int_0^{\infty} p^2(x) dx - \int_0^t p^2(x) dx \quad (3.10)$$

kde:

$W(t)$ průměrný průběh poklesu energie,

$p^2(t)$ impulsová odezva.

Tato rovnice popisuje vztah mezi průměrným průběhem poklesu energie ze všech naměřených průběhů a k tomu odpovídající impulsovou odezvou. „*Druhý integrál s mezemi $(\infty; 0)$ se rovná celkové energii impulsové odezvy úměrné hustotě stacionárního pole. Třetí integrál s mezemi $(t; 0)$ popisuje časový průběh nárůstu zvukové energie.*“ Výsledný rozdíl těchto integrálů je poté ekvivalentem právě zjišťovanému dozvukovému poklesu. Další výhodou pro tuto metodu by mohlo být, že z integrované impulsové odezvy je možné odvodit další parametry pro popsání prostoru. Jde například o počáteční dobu dozvuku, míru jasnosti, nebo míru zřetelnosti. [1, 2]

Stejně jako první metoda, tak i tato je definována v normě ČSN EN ISO 354. Jsou zde popsány dvě metody – přímá a nepřímá. Přímá metoda může být vyhodnocena ihned po použití zdroje. U nepřímé metody lze používat speciální zvukové signály. Ty mohou

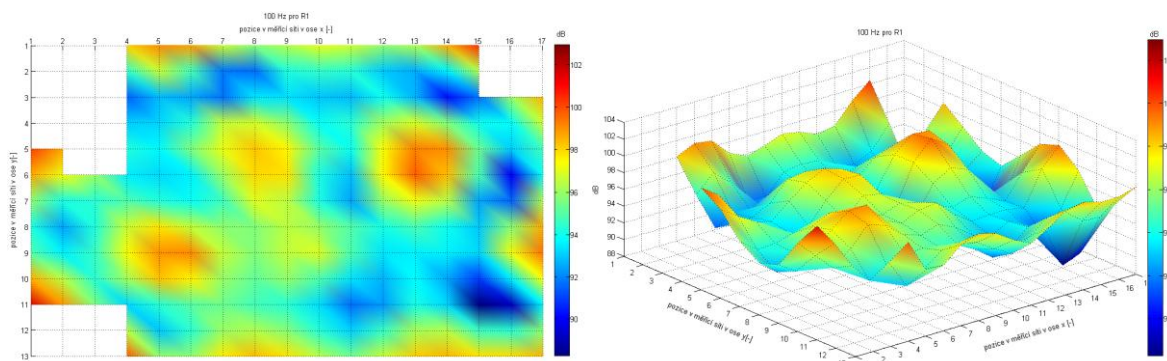
mít například lepší odstup signálu od šumu. Dalšími zdrojem, který je možné použít, může být klouzavý tón, nebo pseudonáhodný šum. Ovšem použití těchto zdrojů je omezeno podmínkou na spektrální charakteristiku zdroje. Při synchronizovaném průměrování je nutné zajistit, aby v průběhu celého měření byla impulzová odezva nezměněna. Další podmínkou této metody je, že šířka pásma signálu musí být větší než třetina oktávy. Měřicí řetězec je stejný jako u metody přerušovaného šumu, tedy obsahuje mikrofony, zesilovače a vhodný vyhodnocovací přístroj. Požadavky na tyto části byly popsány v předchozí kapitole. [9]

3.3 Měření rozložení akustického pole

Cílem měření rozložení akustického pole je, na základě jeho výsledků rozhodnout o optimálních pozicích měřících mikrofونů. Pro jakýkoliv tento bod je totiž výsledná hodnota akustického tlaku dána superpozicí různého počtu tlumených vlastních kmitů. To jak bude výsledný akustický tlak v daném bodě velký, závisí na umístění reproduktoru budící místnost. Pro zdrojový reproduktor je nejlepší, když je umístěný v místě, kde je akustický tlak největší. Takové místo je u pravoúhlých místností vždy v jejich rozích a zajistí, že bude vybuzen maximální počet vlastních kmitů. Jak bude dokázáno dále v praktické části, viz tabulka 5, čím se budeme zabývat filtrem s větší střední frekvencí, tím bude daný filtr obsahovat větší počet vlastních kmitů. Měření rozložení akustického pole by ovšem mělo být omezeno jen do hodnoty kritické frekvence dané vztahem (2.3). Od této frekvence již totiž dochází ke zhuštění vlastních kmitů a rozložení akustického tlaku lze považovat za rovnoměrné. Takovéto rozložení je možné popsat už jen statisticky. [2]

K měření rozložení akustického pole v uzavřeném prostoru nejsou potřeba žádné jiné speciální přístroje, než například k měření doby dozvuku. Je tedy potřeba mít generátor zdrojového signálu. Dále reproduktor, který bude tento signál vysílat do prostoru. Jak již bylo řečeno, nejlepším místem pro umístění reproduktoru jsou rohy místnosti. K měření jsou potřeba ještě mikrofony, pomocí kterých se měří akustický tlak v daných bodech. A jako poslední část měřících přístrojů je samozřejmě mít nějaký vyhodnocovací přístroj, v dnešní době počítač s příslušným akustickým softwarem. Před měřením je nejdříve dobré

vymyslet, v jakých bodech bude měření probíhat, tedy vytvořit síť měřících bodů. Tato síť by měla pokrývat celý měřený prostor. Poté pomocí mikrofonů proměříme celou tuto vymyšlenou měřící síť. Takto naměřené hodnoty lze pak pro lepší přehlednost interpretovat jako 2-D mapu rozložení akustického tlaku (obr. 10a), a nebo jako 3-D graf prostoru(obr. 10b).[2]



Obrázek 10 Graf rozložení akustického pole a) mapa b) 3-D graf

4 Mapování akustického pole dozvukové komory

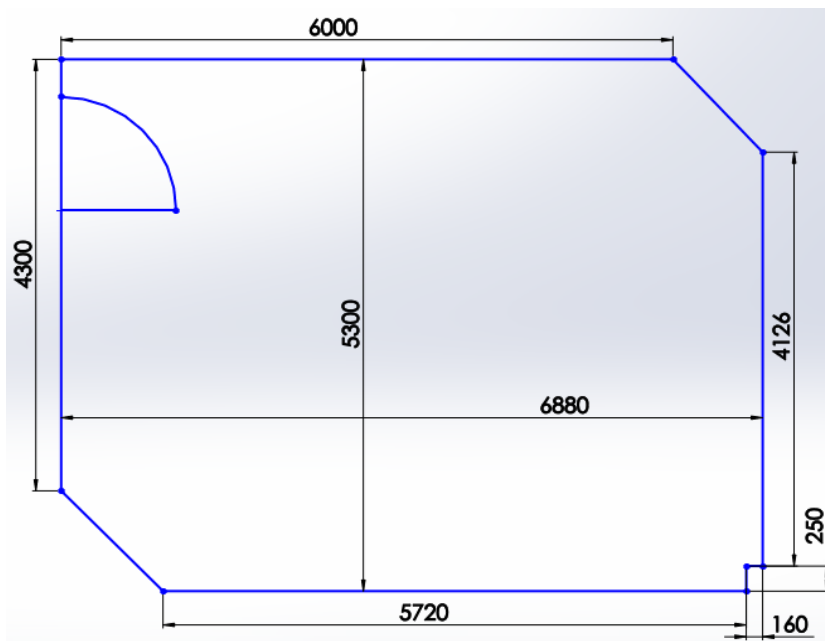
Jak je patrné již z názvu této diplomové práce, jejím hlavním cílem je zmapování akustického pole v dozvukové komoře. Požadavky na dozvukové komory jsou popsány například v normě ČSN EN ISO 354 v podkapitole 6.1 „dozvuková místnost a dosažení difúzního zvukového pole“. Tato norma říká, že objem dozvukové komory musí být minimálně 150 m^3 a pro nové stavby se doporučuje dokonce již minimálně 200 m^3 . Naproti tomu maximální objem nesmí být větší než přibližně 500 m^3 , protože poté již nejde změřit zvukovou pohltivost na vysokých frekvencích přesně v důsledku pohltivosti ve vzduchu. Další podmínka pro dozvukové komory určuje její tvar. Je dána vtahem (4.1), který určuje nejdelší vzdálenost v porovnání s objemem místnosti. Tato podmínka zajišťuje rovnoměrné rozložení vlastních kmitů, především u nízkých kmitočtů. Zmapování akustického pole bylo provedeno v dozvukové komoře ve sklepení Fakulty elektrotechnické na Západočeské univerzitě v Plzni. Její půdorys je znázorněn na obr. 11. [9]

$$l_{max} < 1,9V^{1/3} \quad (4.1)$$

kde:

l_{\max} nejdelší vzdálenost dvou bodů na hranici místnosti [m],

V objem dozvukové komory [m^3].



Obrázek 11 Půdorys dozvukové komory

4.1 Výpočet kritické frekvence

Hodnota kritické frekvence byla vypočtena podle vztahu (2.3). Jak je z rovnice patrné, je potřeba dosadit hodnotu doby dozvuku v měřené dozvukové komoře. Ta byla vypočtena jako průměrná hodnota na základě dodaných, již dříve změřených, hodnot. Průměrná hodnota doby dozvuku T_s se vypočetla z hodnot uvedených v tabulce 4. Průměrná hodnota doby dozvuku vyšla $T_s = 9,10$ s a následná kritická frekvence se rovná 406,5 Hz. Pro výpočet objemu dozvukové komory byly použity následující zjednodušené rozměry:

- délka: 6,88 m,
- šířka: 5,28 m,
- výška: 6,06 m.

Tabulka 4 Doby dozvuku dozvukové komory pro jednotlivé frekvence

f [Hz]	T_s [s]	f [Hz]	T_s [s]	f [Hz]	T_s [s]
100	11,68	400	11,08	1600	6,91
125	11,85	500	10,12	2000	6,21
160	15,40	630	9,37	2500	5,42
200	14,66	800	8,82	3150	4,69
250	12,98	1000	8,29	4000	3,74
315	11,90	1250	7,64	5000	2,95

$$V = a \cdot b \cdot c = 6,880 \cdot 5,280 \cdot 6,060 = 220,1 \text{ m}^3$$

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T_s}{V}} = 2000 \sqrt{\frac{9,095}{220,138}} = 406,5 \text{ Hz}$$

4.2 Výpočet vlastních kmitů a jejich vlnové délky

V předchozí kapitole byla vypočítána kritická frekvence. Ta nám určila, do jaké frekvence bude stačit vypočítat vlastní kmitů, protože právě od kritické frekvence se předpokládá, že jsou vlastní kmitů již rovnoměrně rozprostřeny. Nejdřív byl vypočten předběžný počet vlastních kmitů. Podle vztahu (2.6) bylo vypočteno, že by v dozvukové komoře mělo být přibližně 1834 vlastních kmitů pod frekvencí 406,5 Hz. Tato hodnota ale nemusí vyjít stejně jako reálný součet vlastních kmitů, protože tento výpočet závisí na dosazené rychlosti zvuku, respektive dosazené teplotě. Poté byly vypočteny jednotlivé vlastní frekvence podle rovnice (2.4), dokud poslední vlastní mód nepřekročil hodnotu kritické frekvence, tj. do 406,5 Hz. Z jednotlivých frekvencí vlastních módů byly ještě vypočteny jejich vlnové délky, podle kterých se později určí vlastnosti měření.

$$N = \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 + \frac{\pi S}{4c^2} f^2 + \frac{l}{8c} f = \frac{4\pi \cdot 220,138}{3 \cdot 340^3} 406,522^3 + \frac{\pi \cdot 220,032}{4 \cdot 340^2} 406,522^2 + \frac{72,880}{8 \cdot 340} 406,522 = 1834,1 \approx 1834$$

$$S = 2(l_x l_y + l_y l_z + l_x l_z) = 2(6,880 \cdot 5,280 + 5,280 \cdot 6,060 + 6,880 \cdot 6,060) = 220 \text{ m}^2$$

$$l = 4(l_x + l_y + l_z) = 4(6,880 + 5,280 + 6,060) = 72,9 \text{ m}$$

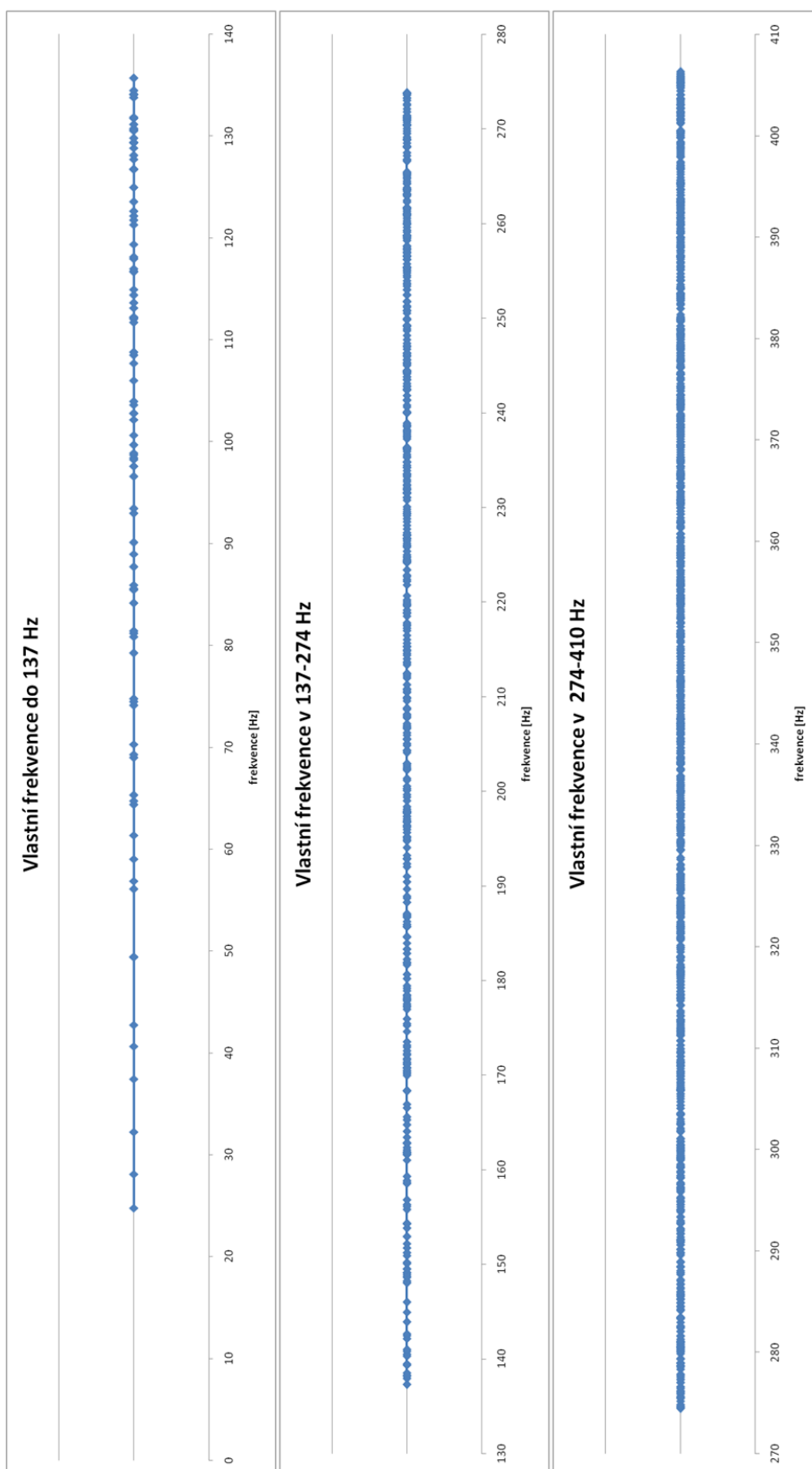
$$f_{(1,1,1)} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} = \frac{340}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{6,88}\right)^2 + \left(\frac{1}{5,28}\right)^2 + \left(\frac{1}{6,06}\right)^2} = 49,3 \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{49,337} = 6,88 \text{ m}$$

Na výše zmíněných rovnicích jsou znázorněny příklady výpočtu pro jednu frekvenci vlastního kmitu, konkrétně pro tangenciální mód $f_{(1,1,1)}$, a k němu příslušnou vlnovou délku. V tabulce 5 je pro ukázkou vypsáno prvních 10 vlastních frekvencí, které jsou v dozvukové komoře a jejich vlnová délka a přiřazení druhu módu. Veškeré ostatní vlastní frekvence jsou vypočteny na 1. listu v příloženém souboru diplomka.xls. Všechny vypočtené vlastní frekvence, až do kritické frekvence, byly vyneseny do grafů na obrázku 12, který zobrazuje hustotu vlastních kmitů s přibývajícím frekvencí. Jak je z grafů patrné, od frekvence přibližně 180 Hz už dochází k poměrně hustému příbytku módů. Pro ještě lepší přehlednost nárůstu vlastních frekvencí je v tabulce 6 zobrazen počet vlastních módů v jednotlivých třetinooktávních pásmech.

Tabulka 5 Prvních 10 vlastních frekvencí a jejich vlnové délky

	n_x	n_y	n_z	f_0 [Hz]	axiální	tangenciální	šikmé	λ [m]
1.	1	0	0	24,71	x			13,76
2.	0	0	1	28,05	x			12,12
3.	0	1	0	32,20	x			10,56
4.	1	0	1	37,38		x		9,10
5.	1	1	0	40,59		x		8,38
6.	0	1	1	42,70		x		7,96
7.	1	1	1	49,337			x	6,89
8.	2	0	0	49,42	x			6,88
9.	0	0	2	56,11	x			6,06
10.	2	0	1	56,83		x		5,98



Obrázek 12 Graf zhuštění vlastních frekvencí

Tabulka 6 Četnost vlastních módů v 1/3 oktávových pásmech

$f_{stř}$ [Hz]	četnost	$f_{stř}$ [Hz]	četnost	$f_{stř}$ [Hz]	četnost
25	2	80	13	200	151
31,5	1	100	24	250	301
40	3	125	43	315	572
50	3	160	94	400	518
63	9				

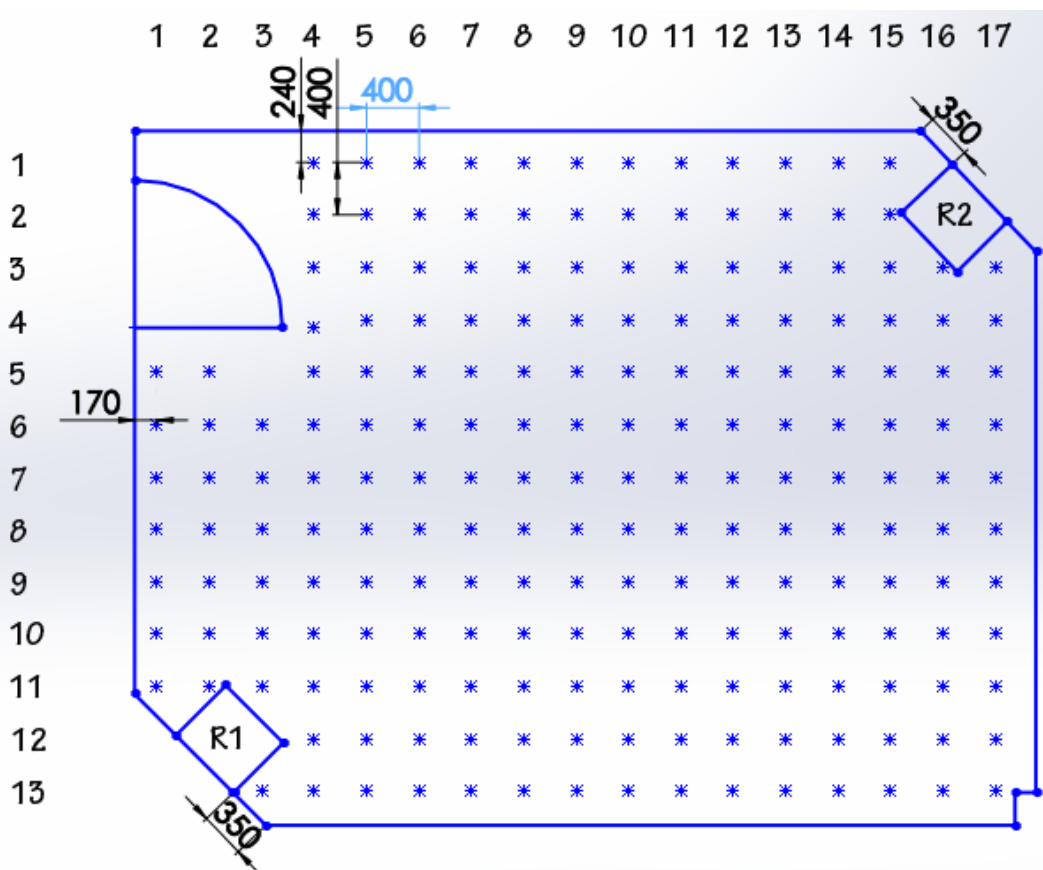
4.3 Příprava dozvukové komory pro měření

Jak již bylo napsáno v předcházející kapitole, měření probíhalo v dozvukové komoře na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity. V kapitole 3.3, ve které bylo popsáno měření rozložení akustického pole, bylo napsáno, že je důležité vymyslet měřicí síť. Měřicí síť by měla být ideálně rozprostřena po celé dozvukové komoře. To znamená, že by měla mít rovnoměrné rozestupy mezi jednotlivými měřicími body a také by měla být změřena místa v okolí přilehlých stěn a rohů. Ke spočtení kroku měření bylo potřeba zjistit maximální frekvenci. Tou byla vybrána frekvence, při které dochází k zahušťování vlastních frekvencí, tedy 180 Hz. Jelikož bude ale mapování akustické pole provedeno pomocí CPB analýzy, byla jako maximální frekvence brána frekvence třetiooktávového filtru. Poté pomocí tabulky 3, která ukazovala přehled používaných třetiooktávových filtrů a vztahů (3.3) a (3.4) pro výpočet rozsahů těchto filtrů, bylo potřeba zjistit, do kterého třetiooktávového filtru patří 180 Hz. Z výpočtů vyplynulo, že frekvence 180 Hz spadá do filtru se středním kmitočtem 200 Hz. Tento třetiooktávový filtr má maximální frekvenci 224,5 Hz. Z této frekvence bylo už jen potřeba zjistit, po jakém kroku je vhodné provádět mapování akustického pole. To se vypočetla jako čtvrtina z vlnové délky odpovídající frekvenci 224,5 Hz. Z výpočtů tedy vyšlo, že by se měření mělo provádět po 0,38 m. V dozvukové komoře byla již dříve vytvořena síť bodů s rozestupem 20 cm. Z tohoto důvodu byla výsledná hodnota kroku měření zaokrouhlena na 40 cm a byla využita již vyrobená síť bodů. Výsledné vybrané body a pozice měření jsou nakresleny na následující obrázku, obr. 13. Na obrázku jsou již vyznačeny i pozice obou reproduktorů označené jako R1 a R2.

$$f_{200min} = \frac{f_s}{\sqrt[6]{2}} = \frac{200}{\sqrt[6]{2}} = 178,2 \text{ Hz}$$

$$f_{200max} = f_s \sqrt[6]{2} = 200 \sqrt[6]{2} = 224,5 \text{ Hz}$$

$$l = \frac{c}{f} = \frac{340}{224,49} = 0,4 \text{ m}$$



Obrázek 13 Měřicí síť bodů a umístění reproduktorů

4.4 Použité měřicí přístroje

Měřicí sestava potřebná ke zmapování akustického pole se sestávala z následujících přístrojů: zvukového analyzátoru, mikrofونů (mikrofonních vložek a jejich předzesilovačů), výkonového zesilovače, reproduktoru a vyhodnocovacího zvukového softwaru. Použité přístrojové vybavení, které bylo použito při měření, je převážně od dánské firmy Brüel & Kjaer. Tato společnost s více jak sedmdesátiletou historií je největším výrobcem měřicích zařízení pro měření hluku a vibrací. Velikost a postavení na trhu Brüel & Kjaer dokazuje například jejich spolupráce se Sikorsky Aircraft Corporation, kterým dodávají technologie pro armádní vrtulníky MH-60R Seahawk, nebo testování

jejich vibračních systémů na vozítku Curiosity od Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku NASA a mnoho dalších spoluprací se světově známými společnostmi. [14]

Prvním přístrojem v měřicí sestavě byl analyzátor zvuku, přesněji model 3560C. Tento analyzátor umí vyhodnocovat frekvenční analýzy do rozsahu až 25 kHz. Dále má čtyři vstupní kanály pro měření signálů a dva generátory, taktéž o rozsahu frekvence do 25 kHz. Pro komunikaci s PC slouží klasický Ethernetový port. [15]



Obrázek 14 Analyzátor Bjüer & Kjaer 3560C [16]

Dalšími přístroji v měřicí sestavě byly mikrofonní vložky označené jako typ 4943. Tyto mikrofony jsou určeny především pro měření difúzních polí a měření uvnitř aut. Průměr těchto mikrofonů udávaný výrobcem je 0,5 palce, což je 1,27 cm. Dalším důležitým parametrem jsou jejich frekvenční a dynamické rozsahy. Dynamický rozsah je dán v rozmezí 15,5 – 148 dB. Co se týče frekvenčního rozsahu, ten je definován hodnotami 3,15 – 10 000 Hz. Citlivost těchto mikrofonů je 50 mV/Pa a polarizační napětí 200 V. [17]



Obrázek 15 Mikrofon Brüel & Kjaer 4943 [17]

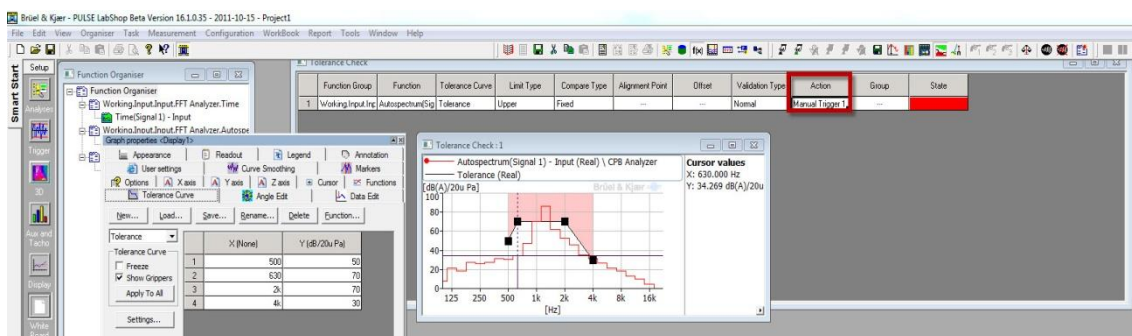
Ke každé mikrofonní vložce byly použity jejich vlastní předzesilovače. Brüel & Kjaer má pro ně typové označení 2669C. Předzesilovače mají stejný průměr jako použité mikrofony, tedy 0,5 palce, s možností použití adaptérů pro jiné další průměry ať již větší,

nebo menší. Jejich frekvenční rozsah je v rozmezí 3 – 200 000 Hz. Maximální výstupní napětí je dáno hodnotou 55 V a proud 20 mA. Také mají podporu polarizačního napětí. [18]



Obrázek 16 Předzesilovač Brüel & Kjær 2669C [18]

Důležitou součástí měřících sestav je vždy také nějaký vyhodnocovací software. V tomto případě bylo měření provedeno pomocí programu PULSE LabShop ve verzi 19.0.0.128. PULSE LabShop umožňuje sbírání dat v reálném čase, takže jsme schopni ihned uvidět naměřené hodnoty a průběhy a zjistit, jestli neobsahují nějaký fatální chyby. Standardně tento software v sobě obsahuje několik nástrojů, které provádějí vyhodnocování měření například následujícími způsoby: FFT analýzou, zlomko oktávovou CPB analýzou, obálkovou analýzou, nebo cepstrum analýzou. V případě potřeby dalších nástrojů je možné PULSE LabShop rozšířit o další potřebné moduly. Výhodou tohoto softwaru je, že umí zpracovávat v jednom okamžiku i více analýz. Tuto vlastnost především oceníme v případě větších měření, která zaberou spoustu času. Nemusíme tedy nejdřív provést jedno měření a až poté další, ale stačí před měřením vhodně nastavit software a všechny analýzy se provedou již současně při jednom měření. Dalším plusem tohoto programu můžeme také označit, že naměřená data umí vyexportovat například ve formátech pro Microsoft Excel nebo pro textový editor, tedy v souborech s příponami .xls a .txt. Pro zpracovávání výsledků tedy není nutné mít tento program a výsledky může už upravovat kdokoliv a kdekoliv. V tabulce 7 jsou uvedeny veškeré přístroje použité pro měření této diplomové práce, včetně jejich sériových čísel. [19]



Obrázek 17 Ukázka prostředí PULSE LabShop [19]

Tabulka 7 Použité měřicí přístroje

Přístroj	Výrobce	Typ	seriové číslo
audio analyzátor	Brüel and Kjaer	3560C	2241811
mikrofonní vložka	Brüel and Kjaer	4943	2479538
		4943	2479537
		4943	2479496
		4943	2527729
předzesilovač	Brüel and Kjaer	2669c	2488025
		2669c	2488024
		2669c	2498150
		2669c	2444011
měřicí software	Brüel and Kjaer	Pulse Labshop	ver. 19.0.0.128
pasivní reproduktor	Yamaha	S115V	74146449
výkonový zesilovač	QSC	PLX2 1804	111252935
kalibrátor	Brüel and Kjaer	4231	3006028
vlhkoměr, teploměr	Omegaette	HH311	50202152

4.5 Nastavení PULSE LabShop

Jak již bylo napsáno, k měření byl použit software PULSE Labshop. Tento program je založen na principu projektů. To znamená, že pro každé nové měření je nutné vytvořit nový projekt, v kterém se provedou veškerá potřebná nastavení. Výhodou těchto projektů je, že projekty můžeme opakovaně použít pro další měření se stejným nastavením.

Každý projekt v sobě obsahuje několik částí, které ho definují, tzv. organizéru. Prvním z nich je „Configuration Organiser“. V tomto organizéru se nastavují vstupní signály. V tomto případě se přiřadili všechny čtyři mikrofony a generátor. Všechny mikrofony byly poté dány do jedné skupiny. Druhou částí je nastavení měření v

„Measurement Organiser“. Tato část slouží k nastavení měření konkrétním způsobem. V předchozí kapitole bylo zmíněno, že PULSE LabShop umožňuje provádět více druhů měření v jeden okamžik. Toho bylo využito a neměřilo se jen rozložení akustického pole pomocí CPB analýzy, ale nastavilo se i měření pomocí FFT analýzy a doba dozvuku využitím CPB pro případná další analyzování akustického pole v dozvukové komoře. Jednotlivé způsoby měření byly nastaveny následovně:

CPB spektrum:

- 1/3 oktávová analýza
- frekvenční rozsah 20 Hz – 20 kHz
- lineární průměrování
- doba průměrování 10 s
- délka multibufferu 31 s

FFT spektrum:

- 3200 spektrálních čar
- frekvenční rozsah 0 – 3,2 kHz
- překrytí 0%
- lineární průměrování
- 10 průměrů
- doba průměrování 10 s
- délka multibufferu 31 s

CPB doba dozvuku:

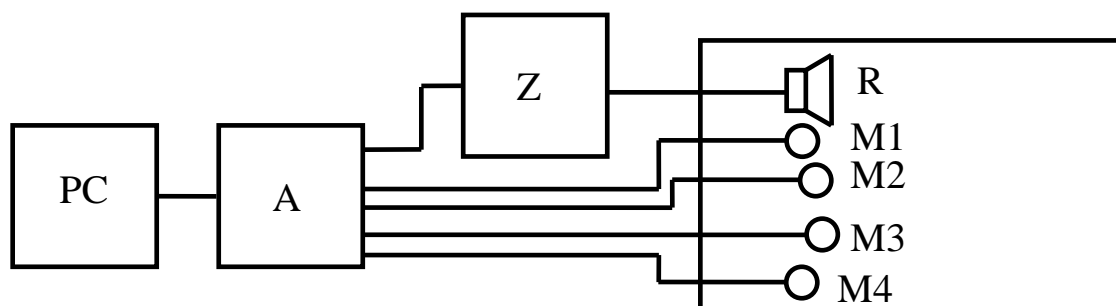
- 1/3 oktávová analýza
- frekvenční rozsah 20 Hz – 20 kHz
- exponenciální průměrování
- doba průměrování 1/16 s
- multibuffer se zápisem po 0,1 s
- délka multibufferu 31 s

Posledním důležitým parametrem bylo nastavení budícího signálu. Zde byl nastaven a použit růžový šum. Pro akustická měření je nejčastěji používaným šumem právě růžový

šum. Růžový šum má v každé oktávě, nebo při třetinooktávové šířce pásma, stejně velkou průměrnou hodnotu energie. Z toho vyplývá, že v nižších frekvencích je energii vyšší a s přibývajícím frekvencí klesá. Přesněji klesá rychlostí o 3 dB za oktávu. Díky předchozí vlastnosti je též růžový šum znám jako 1/f šum. [4]

4.6 Průběh měření

Kompletní proměření rozložení akustického pole v dozvukové komoře proběhlo 15. března 2016. Prvním krokem před samotným měřením bylo označení bodů měřicí sítě v již předkreslené síti. Toto bylo provedeno z důvodu omezení chyby přehlédnutí se ve vybrání správné pozice mikrofónů a změření akustického pole ve špatném bodě. Jako u každého měření bylo nejdřív nutné zapojit veškeré přístroje uvedené již v tabulce 7. Přístroje byly zapojeny podle následujícího schématu na obrázku 18. Všechny mikrofóny byly nastaveny na výšku 120 cm. Tato výška byla vybrána z důvodu, aby se ve všech místech dozvukové komory vešly mikrofóny pod instalované odrazné desky a zároveň byla splněna podmínka na vzdálenost minimálně 1 m.



Obrázek 18 Schéma měření rozložení akustického pole (A – analyzátor, R – reproduktor, Z- zesilovač, Mx – mikrofóny s předzesilovači)

Po zapojení přístrojů a nastaveném softwaru PULSE LabShop se mohlo přejít již k samotnému měření akustického pole. Při jednom cyklu měření bylo využito naráz všech čtyř mikrofónů, tedy byly proměřeny zároveň čtyři body měřicí sítě. Jeden měřicí cyklus trval přibližně dobu jedné minuty. Po zapnutí generátoru signálu se dozvuková komora budila 10 sekund budícím signálem. Tato hodnota má být větší než polovina doby dozvuku komory, což podle tabulky 4, ve které jsou uvedeny časy doby dozvuku, odpovídá. Po uplynutí této doby dojde k ustálení akustického pole a může se přejít k měření hodnot. Na tuto chvíli bylo nastaveno spuštění měření frekvenčních spekter pomocí FFT a CPB

analýzy. Po změření spekter byl v čase 21 sekund od zapnutí generátor vypnut. V okamžiku vypnutí generátoru přišlo na řadu měření poklesových křivek pro určení doby dozvuku. Jakmile došlo k celému vykreslení poklesových křivek, cyklus mohl být ukončen. Poté byla čtveřice mikrofonů posunuta na další čtyři dosud nezměřené body a měřicí cyklus mohl být zopakován. Takto se změřily veškeré body v měřící síti vyznačené na obrázku 13. Nejdříve byla dozvuková komora změřena pro reproduktor vyznačený na pozici R1. Až bylo měření dokončeno, celé měření se ještě jednou zopakovalo pro druhou pozici reproduktoru R2. V tabulce 8 jsou zapsány klimatické podmínky uvnitř dozvukové komory v průběhu celého měření.



Obrázek 19 Průběh měření

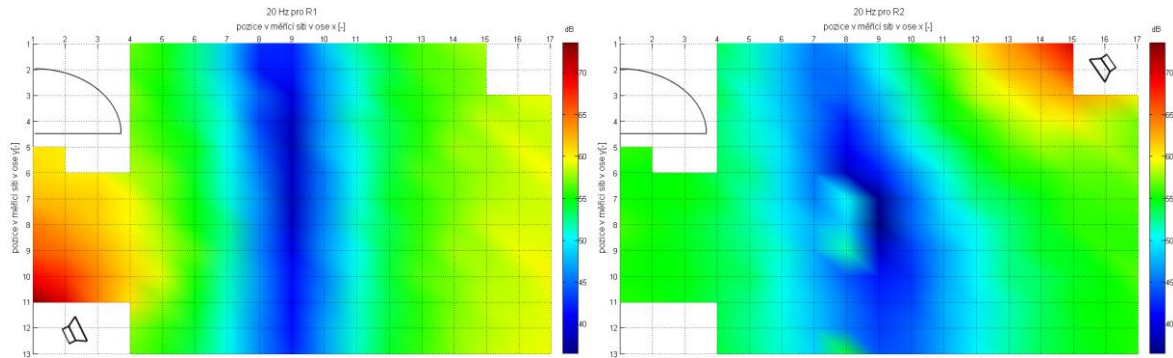
Tabulka 8 Klimatické podmínky v dozvukové komoře v průběhu měření

	Teplota [°C]	Vlhkost vzduchu[%]
začátek	22,7	31,5
1. hodina	22,8	29,5
3. hodina	23,7	29,1
4. hodina	23,6	30,2
5. hodina	23,4	30,8
průměr	23,2	30,2

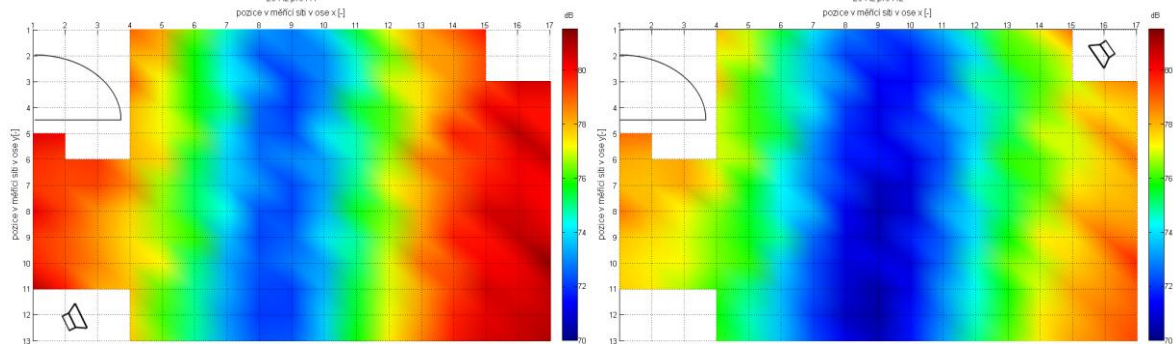
Na přiloženém CD jsou uloženy veškeré soubory, které vznikly během měření. Projekty naměřených hodnot v programu PULSE LabShop jsou uloženy pod názvy „CPB+FFT+dozvukR1.pls“ a „CPB+FFT+dozvukR2.pls“. Jak je z názvů patrné první soubor patří k měření s pozicí reproduktoru R1 a druhý v pozici R2. V obou těchto souborech jsou uloženy jednotlivé měření pro všechny body měřicí sítě, označené jako „Me1 - Me100“. Jelikož každé měření obsahuje data ze čtyř mikrofonů, je zde přiložen ještě soubor „DPmereni.xlsx“, který obsahuje informace o pozicích jednotlivých mikrofonů při každém měření vzhledem k měřicí síti.

4.7 Výsledky měření

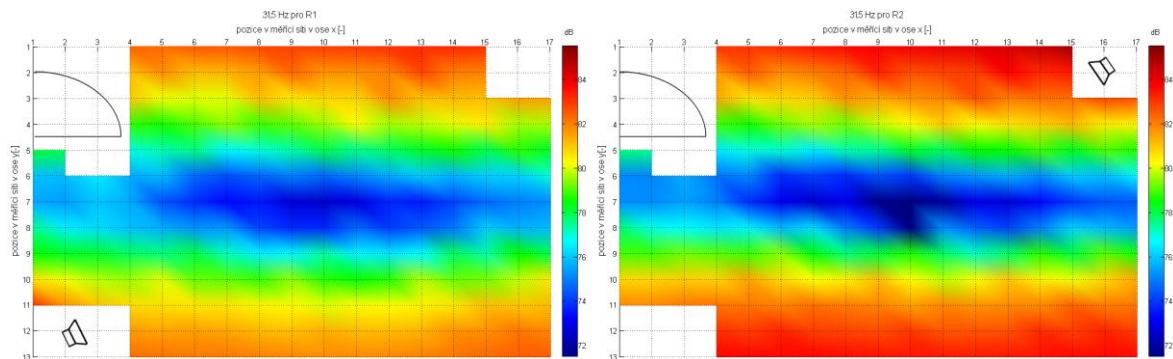
V kapitole 3.3, ve které bylo popsáno měření rozložení akustického pole, bylo napsáno, jakými způsoby lze vyhodnocovat naměřená data. Výsledky zmapovaného akustického pole dozvukové komory byly zpracovány jako 2D mapy. V první řadě však bylo potřeba nejdříve vyexportovat naměřené hodnoty z jednotlivých pozic mikrofonů. Při exportování CPB analýzy posloužil jako výstupní formát Microsoft Excel. Takovýto soubor v sobě obsahuje hlavičku s informacemi, ale především jsou zde pod sebou vypsány jednotlivé naměřené hodnoty ke všem středním frekvencím v rozsahu od 20 Hz do 20 kHz použitých v CPB analýze. Všechny tyto vyexportované Excel soubory jsou samozřejmě uloženy také na CD. Pojmenování je souhlasné s názvy všech měření v projektech PULSE Labshop, tedy „Me1.xlsx – Me100.xlsx“. Problémem těchto souborů je, že obsahují informace pouze o jedné měřené pozici. Proto bylo potřeba ze souborů vzít samostatně hodnoty jednotlivých frekvencí a z nich vytvořit matice pro každou měřenou frekvenci zvlášť. Z matic poté byly vykresleny výše zmíněné druhy grafů. V této kapitole, a vlastně v celém hodnocení práce, jsou vyobrazeny pouze grafy pro filtry se střední frekvencí do 200 Hz, tedy do frekvence, při které dochází k poměrně velkému zahušťování vlastních kmitů. Ostatní zbylé grafy, pro filtry s větší frekvencí, jsou pro zajímavost umístěny taktéž na přiloženém CD. Stejně tak CD obsahuje i 3D grafy pro veškeré měřené frekvence. Na následujících grafech do konce této kapitoly jsou vykresleny rozložení akustických polí v dozvukové komoře pro třetinooktávové filtry od 20 Hz do 200 Hz.



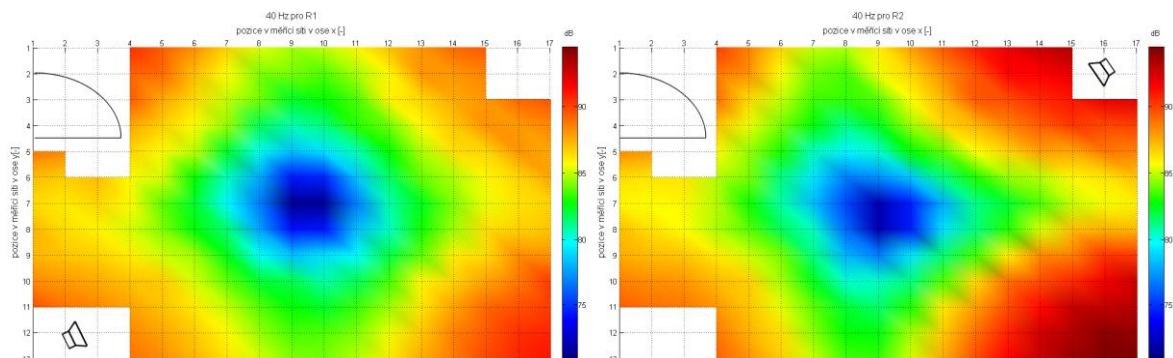
Obrázek 20 Rozložení akustického pole při 20 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



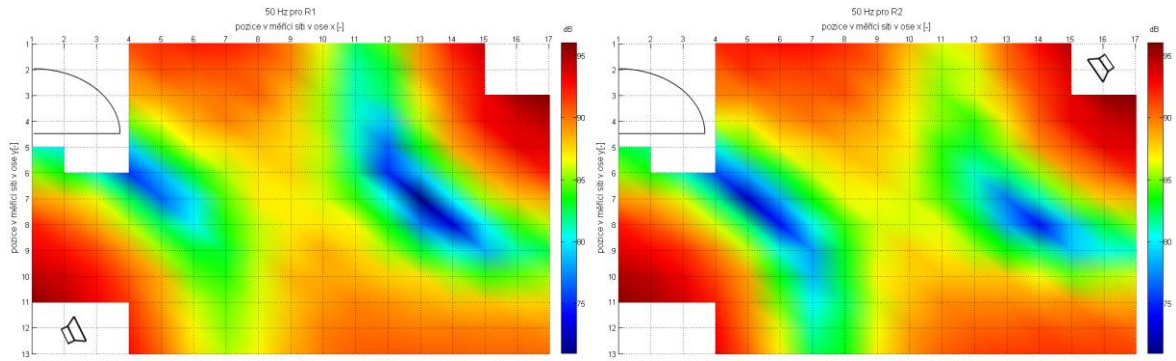
Obrázek 21 Rozložení akustického pole při 25 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



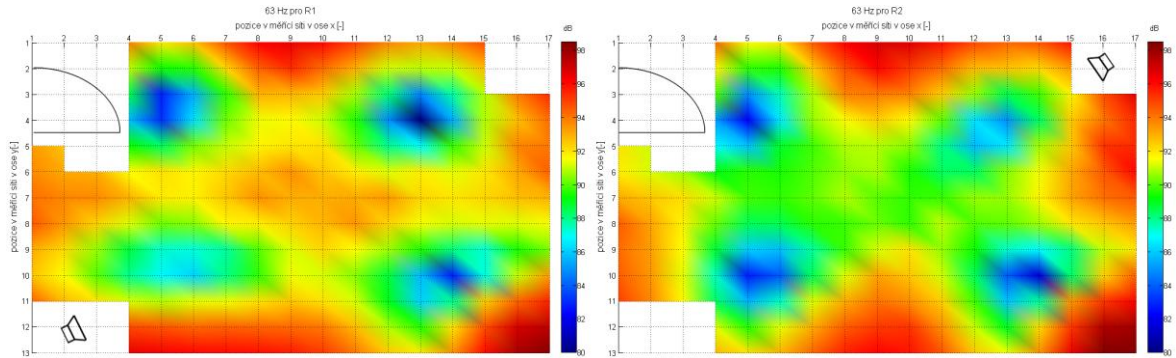
Obrázek 22 Rozložení akustického pole při 31,5 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



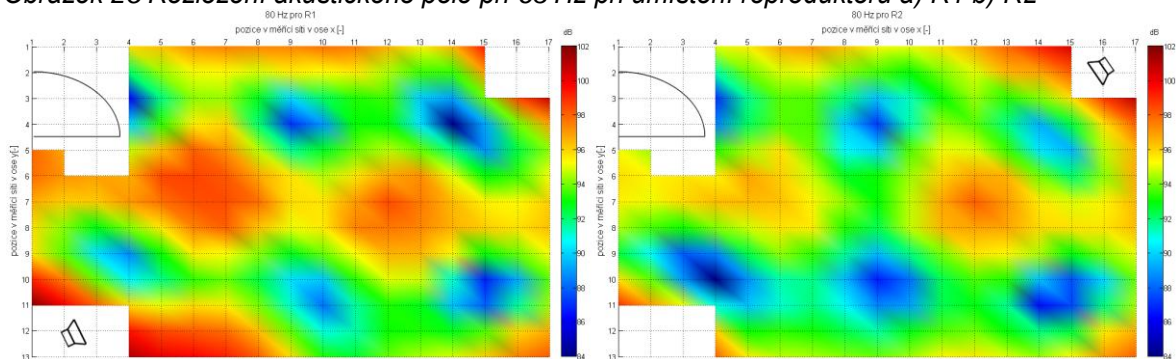
Obrázek 23 Rozložení akustického pole při 40 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



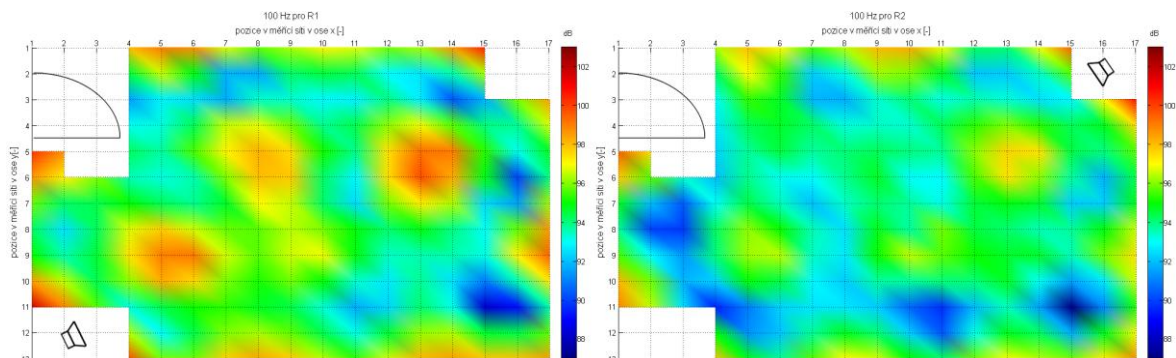
Obrázek 24 Rozložení akustického pole při 50 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



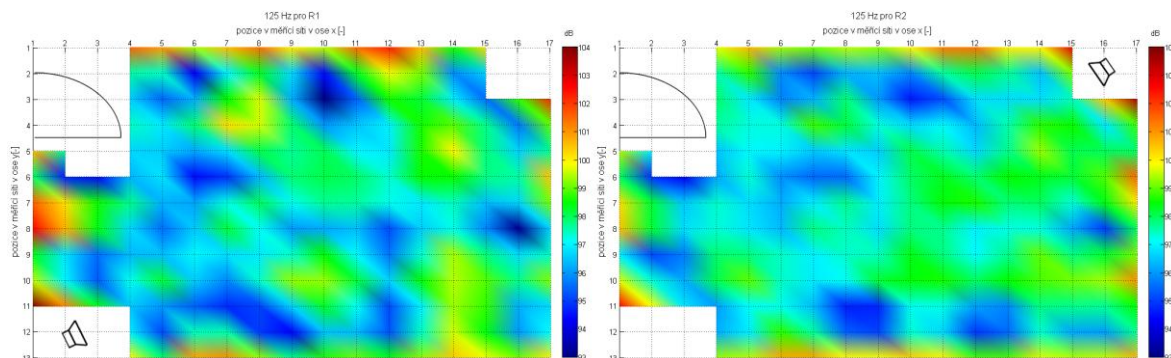
Obrázek 25 Rozložení akustického pole při 63 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



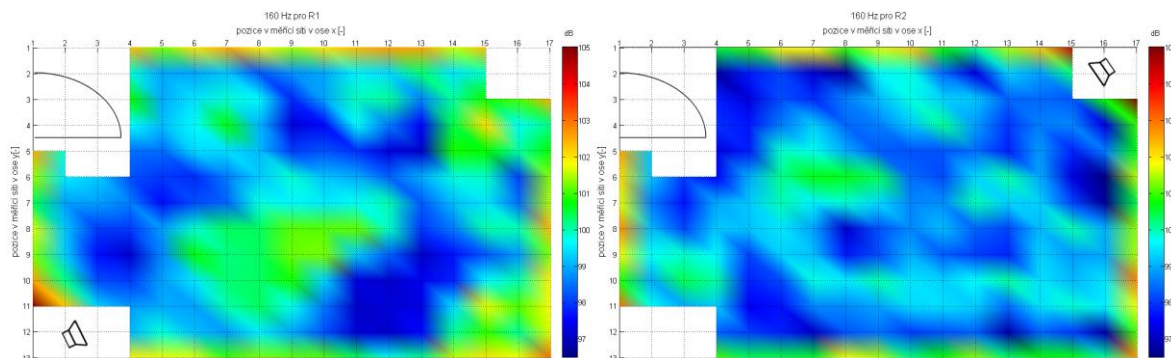
Obrázek 26 Rozložení akustického pole při 80 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



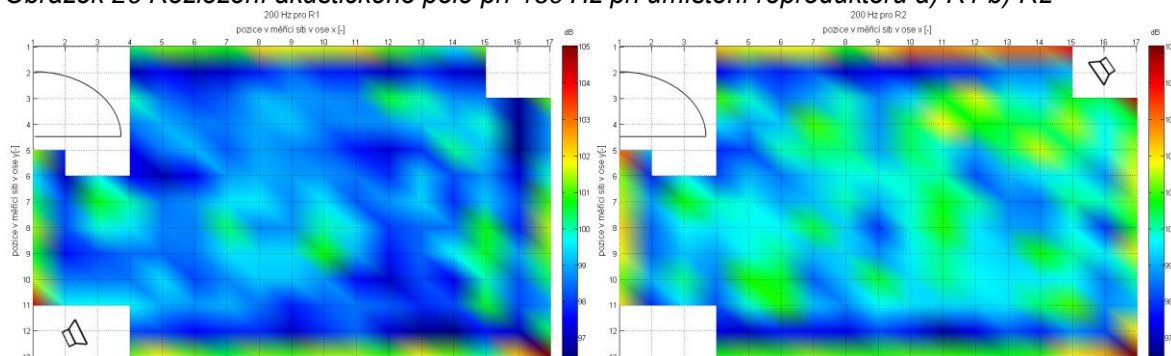
Obrázek 27 Rozložení akustického pole při 100 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



Obrázek 28 Rozložení akustického pole při 125 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



Obrázek 29 Rozložení akustického pole při 160 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2



Obrázek 30 Rozložení akustického pole při 200 Hz při umístění reproduktoru a) R1 b) R2

4.8 Zhodnocení měření

Na obrázcích 20 – 30 v předchozí kapitole byly zobrazeny výsledné mapy rozložení akustického pole na jednotlivých filtrech pro obě pozice zdrojových reproduktorů. Rozložení akustického pole pro první měřený filtr se střední frekvencí 20 Hz je vidět na obr. 20. Z nich je patrné, že akustické pole má náznak šíření axiálnímu módu v ose x. To dokazuje i to, že frekvence 20 Hz je poměrně blízko frekvenci právě prvního axiálního módu, která 24,7 Hz. Při měření na souřadnicích [8;8] pro reproduktor v pozici R2 muselo dojít k nějakému rušení z okolního prostředí, neboť je z grafu patrný náhlý a ojedinělý místní nárůst hladiny akustického tlaku. Z obou grafů je také na první pohled patrné, kde zrovna byli umístěny zdrojové reproduktory, protože v jejich okolí je největší hladina

akustického tlaku. Další měřený filtr měl střední frekvenci 25 Hz. Rozložení zobrazuje obr. 21. Tento filtr už celkem přesně odpovídá frekvenci onoho prvního axiálního módu. Z obou grafů je zřejmý sinusový průběh šíření ve směru osy x, kdy u počátečních a koncových stěn jsou naměřené nejvyšší hodnoty, kdežto uprostřed dozvukové komory jsou naopak nejnižší. Při porovnání obou pozic reproduktorů vychází, že pro pozici R1 jsou maximální hodnoty větší nejvýše o 3 dB. Další následující filtr se svojí střední frekvencí 31,5 Hz opět odpovídá frekvenci dalšího axiálního módu. Tentokrát se však už jedná o axiální mód šířící se podél osy y. Opět je zde zřejmý sinusový průběh šíření. Při porovnání obou pozic reproduktorů je z grafů patrné, že při reproduktoru v pozici R2 byl naměřen větší rozsah hodnot akustického tlaku. Jsou zde tedy jak vyšší maximální hodnoty, tak i nižší minimální hodnoty. Akustické pole při použití tohoto filtru je vidět na obr. 22. Pokud porovnáme rozložení akustických polí těchto tří filtrů, s axiálními módy zjistíme, že s větší hodnotou frekvence dochází k nárůstu minimální i maximálních hodnot akustického tlaku.

Čtvrtým filtrem, pro který se zjišťovalo rozložení akustického pole, byl filtr se střední frekvencí 40 Hz. Rozsah tohoto filtru v sobě obsahuje tři tangenciální módy. Na obrázku 23 je poznat právě průběh tangenciálního módu a jak se odráží od všech čtyř zdí. Opět je tu vidět i sinusový průběh, kdy po obvodech jsou nejvyšší hodnoty a směrem ke středu dozvukové komory dochází k poklesu až na minimální hodnotu, tedy toto pole má tvar „trychtýře“. Z grafu je jasně viditelné že reproduktor svým zdrojovým signálem vybudil především v rozích místnosti vyšší akustický tlak.

Od následujících filtrů už je z grafů poznat jak v jejich rozsazích vzrůstá počet vlastních módů. Ty rozložení akustických polí ovlivní tak, že už nejsou moc poznat sinusové průběhy, ale budou začínat vynikat lokální špičky a propady hodnoty akustického tlaku. Nejsou zde již jen axiální, či tangenciální módy, ale začnou přibývat i šikmé. Na akustickém poli pro filtr s 50 Hz, obr. 24, již dvě místa s lokálními minimy. Naproti tomu podle teoretický předpokladů jsou nejvyšší hodnoty na okrajích, především v rozích kde se potkávají 3 stěny. U třetinooktávového filtru s 63 Hz došlo k dalšímu přibytí lokálních minim. Podle obr. 25 již pro tuto frekvenci vidíme čtyři lokální propady k minimálním hodnotám, která jsou rozmístěna téměř souměrně v dozvukové komoře. Při pohledu na tvar akustického pole pro 80 Hz, obr. 26, vidíme opět souměrně uspořádané lokální minima. Tentokrát však přibýly další dvě a celkem je jich již šest. Na zbylých grafech, tedy pro 100 Hz (obr. 27), 125 Hz (obr. 28), 160 Hz (obr. 29) a 200 Hz (obr. 30), je vidět, jak jsou

maximální hodnoty vytlačovány na okraj komory a hlavně do rohů. Uprostřed dozvukové komory dochází s přibývajícím frekvencí ke stále většímu počtu propadů k minimálním hodnotám v dané frekvenci.

Z rozložení akustického pole u všech filtrů se tedy potvrdilo, že největší hodnoty akustického tlaku jsou na okrajích místnosti, především v jejich rozích. Uprostřed dozvukové komory s přibývajícím hodnotou frekvence pro dané filtry docházelo k nárůstu minimálních a maximálních hodnot akustického tlaku. Pro nejnižší filtr s frekvencí 20 Hz bylo naměřeno rozpětí 36,6 – 73,1 dB. Pro nejvyšší filtr 200 Hz došlo k nárůstu hodnot rozsahu na 96,4 – 104,9 dB. Tento nárůst je dalším důkazem, jak roste počet vlastních kmitů v jednotlivých filtrech, ve kterých toto zhuštění způsobí zmenšování propadů. K tomuto dochází tím, že se vlastní kmitů překrývají.

Z tohoto měření se poté vychází při určení vhodných pozic mikrofonů. Nejdříve se určí vhodné pozice pro každý filtr zvlášť. Tyto pozice by měly být zvoleny tak, aby mezi jednotlivými pozicemi mikrofonů byly co nejmenší rozdíly hodnot akustického tlaku. Poté se porovnají veškeré vybrané pozice napříč všemi filtry a vyberou se takové, které jsou nejvhodnější pro všechna frekvenční pásma. Jako příklad je zde uveden výběr vhodných pozic pro filtr 200 Hz s pozicí reproduktoru R1. Z naměřených hodnot uvedených na obr. 31 byly uvažovány zvýrazněné pozice s hodnotami v intervalu 98,6 dB – 99 dB. Ze zvýrazněných bodů poté bylo vybráno například těchto 12 pozic zobrazených na obr. 32.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1				100,4	101,2	101,0	100,7	102,0	101,7	101,6	102,0	101,0	100,3	99,5	101,2		
2				96,9	97,6	97,0	97,2	97,8	98,4	97,8	97,8	97,1	97,9	97,3	96,9		
3				99,9	98,5	98,0	98,3	99,1	98,9	98,7	98,6	100,5	100,0	98,7	98,6	96,7	101,1
4				98,5	99,0	98,7	98,6	99,0	99,2	98,6	98,7	98,8	99,2	99,2	99,8	96,6	98,8
5	101,3	97,8		97,5	98,6	99,1	98,3	98,9	98,6	98,4	97,7	97,3	98,0	100,1	99,2	96,5	98,8
6	99,5	97,2	99,7	97,5	96,9	97,5	98,9	99,0	98,8	98,8	98,5	97,9	99,2	98,2	98,9	97,3	99,8
7	100,4	98,1	100,6	100,0	98,5	98,8	99,5	99,5	98,7	99,5	98,3	98,8	99,3	97,9	99,2	98,1	101,0
8	101,4	98,2	99,8	99,5	98,7	98,6	100,2	98,7	98,8	100,0	99,4	98,0	98,4	98,5	100,6	97,8	101,5
9	100,6	97,7	98,1	98,5	98,4	98,6	99,5	99,4	99,4	100,7	99,0	97,7	98,4	99,6	100,5	98,9	101,2
10	101,5	98,6	98,5	98,6	99,4	98,2	98,7	99,2	99,2	98,8	97,7	97,1	98,2	97,5	100,0	98,2	100,3
11	104,3	99,6	99,7	99,6	99,0	98,8	99,1	98,5	97,8	98,3	98,6	98,3	97,9	98,1	100,5	98,2	98,9
12				98,1	98,0	97,6	97,9	97,8	97,1	97,9	98,4	97,2	96,6	96,5	97,7	97,1	100,4
13				101,2	101,8	101,2	100,5	101,2	101,0	101,4	101,4	100,9	101,7	101,2	100,0	102,2	104,9

Obrázek 31 Hodnoty akustického tlaku pro filtr 200 Hz při buzení reproduktorem R1 se zvýrazněnými hodnotami v intervalu 98,6 dB – 99 dB

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1				100,4	101,2	101,0	100,7	102,0	101,7	101,6	102,0	101,0	100,3	99,5	101,2		
2				96,9	97,6	97,0	97,2	97,8	98,4	97,8	97,8	97,1	97,9	97,3	96,9		
3				99,9	98,5	98,0	98,3	99,1	98,9	98,7	98,6	100,5	100,0	98,6	96,7	101,1	
4				98,5	99,0	98,7	98,6	99,0	99,2	98,6	98,7	98,8	99,2	99,2	99,8	96,6	98,8
5	101,3	97,8		97,5	98,6	99,1	98,3	98,9	98,6	98,4	97,7	97,3	98,0	100,1	99,2	96,5	98,8
6	99,5	97,2	99,7	97,5	96,9	97,5	98,9	99,0	98,8	98,8	98,5	97,9	99,2	98,2	98,9	97,3	99,8
7	100,4	98,1	100,6	100,0	98,5	98,8	99,5	99,5	98,7	99,5	98,3	98,8	99,3	97,9	99,2	98,1	101,0
8	101,4	98,2	99,8	99,5	98,7	98,6	100,2	98,7	98,8	100,0	99,4	98,0	98,4	98,5	100,6	97,8	101,5
9	100,6	97,7	98,1	98,5	98,4	98,6	99,5	99,4	99,4	100,7	99,0	97,7	98,4	99,6	100,5	98,9	101,2
10	101,5	98,6	98,5	98,6	99,4	98,2	98,7	99,2	99,2	98,8	97,7	97,1	98,2	97,5	100,0	98,2	100,3
11	104,3	99,6	99,7	99,6	99,0	98,8	99,1	98,5	97,8	98,3	98,6	98,3	97,9	98,1	100,5	98,2	98,9
12				98,1	98,0	97,6	97,9	97,8	97,1	97,9	98,4	97,2	96,6	96,5	97,7	97,1	100,4
13				101,2	101,8	101,2	100,5	101,2	101,0	101,4	101,4	100,9	101,7	101,2	100,0	102,2	104,9

Obrázek 32 Vybrané pozice mikrofonů

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zmapovat akustické pole v dozvukové komoře. V její první části byli popsány teoretické záležitosti, které se týkají prostorové akustiky a způsoby měření a vyhodnocování při analyzování akustických polí. Tím byl splněn první bod zadání, který dával za úkol právě prostudování problematiky rozložení akustického pole v uzavřeném prostoru. Druhým úkolem zadání bylo připravit vhodnou metodu, kterou lze následně provést ono zmapování pole v dozvukové komoře. Tomuto bodu se věnovaly první tři podkapitoly ve čtvrté kapitole. Posledním a hlavně tím nejdůležitějším požadavkem této práce bylo toto měření provést podle předchozí vymyšlené metody.

V podkapitole 4.7 byly vyobrazeny veškeré naměřené grafy pro filtry se střední frekvencí nižší, než začalo docházet k rychlému zahušťování vlastními kmity. U prvních třech filtrů, pro frekvence 20, 25 a 31,5 Hz byly vidět průběhy axiálních módů. Na dalším grafu pro filtr se 40 Hz byl pro změnu vyobrazen tangenciální mód. Od následujícího filtru, tedy pro 50 Hz, již bylo z rozložení akustických polí poznat, jak začíná docházet k nárůstu propadům lokálních minim. Například pro filtr 50 Hz byly tyto propady jen dva, poté u filtru 63 Hz již byli čtyři a u filtru 80 Hz bylo těchto propadů šest. U zbylých filtrů s vyšší frekvencí se potvrdily teoretické předpoklady. A to ty že nejsilnější akustické pole je na okrajích místnosti a především v jejích rozích. Uprostřed komory poté dochází ke střídání maximálních a minimálních hodnot. Také bylo změřeno, že na grafu pro filtr s nejnižší frekvencí byly nejmenší hladiny akustického tlaku, které se postupně zvyšovaly s přibývajícím frekvencí. Jak již bylo napsáno, v této diplomové práci jsou obsaženy grafy jen pro filtry do frekvence 200 Hz. Veškeré ostatní grafy jsou přiloženy na CD. Na základě naměřených výsledků bylo poté naznačeno, jak probíhá vhodný výběr pozic měřících mikrofonů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VAVERKA, Jiří. *Stavební fyzika*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 1998, 343 s. ISBN 80-214-1283-6
- [2] KOLMER, Felix a Jaroslav KYNCL. *Prostorová akustika: vysokošk. příručka pro vys. školy techn. směru*. 2., nezm. vyd. Praha: SNTL, 1982, 242 s.
- [3] KUTTRUFF, Heinrich. *Room acoustics*. 5th ed. London & New York: Spon Press/Taylor & Francis, 2009, xiv, 374 p. ISBN 9780203876374.
- [4] EVEREST, F. *The master handbook of acoustics*. 2nd ed. Blue Ridge Summit, Pa: TAB Books, c1989, xiii, 366 s. ISBN 0830693963.
- [5] KLEINER, Mendel a Jiri TICHY. *Acoustics of small rooms*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2014, pages cm. ISBN 9780415779302
- [6] BYSTRICKÝ, Tomáš. *Základní akustická měření pomocí standardního počítače PC a zvukové karty*, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická
- [7] JAKSCH, Ivan. *Technická diagnostika: Základy akustiky a hlukové diagnostiky* [online]. Liberec, 2010 [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: www.rss.tul.cz/download/tdg/P7_hluk_ESF.pdf
- [8] *Konstrukce na pohlcování zvuku* [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/228-konstrukce-na-pohlcovani-zvuku>
- [9] *ČSN EN ISO 354: Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. 2003.
- [10] *Encyklopedie fyziky: Akustika a její dělení* [online]. [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/214-akustika-a-jeji-deleni>
- [11] *Auris Audio: Kolik decibelů škodí* [online]. [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: <http://www.auris-audio.cz/kolik-decibelu-skodi>
- [12] HLAVÁČ, Václav. [online]. ČVUT v Praze [cit. 2016-03-29]. DOI: Fourierova transformace v 1D a 2D. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/12FourierTxCz.pdf>
- [13] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901-9361-7.
- [14] <http://www.bksv.com/NewsEvents/News>
- [15] <http://www.bksv.com/Products/analysis-software/signal-analysis/ssr-analysis/audio-analyzer-options.aspx>
- [16] <http://www.comoti.ro/img/poze/4.2/09.jpg>
- [17] <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/microphone-cartridges/4943>
- [18] <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/preamplifiers/2669-C>
- [19] <http://www.bksv.com/Products/pulse-analyzer/pulse-platform/pulse-labshop>
- [20] <http://www.bksv.com/~media/knowledge/CanIcreateatriggerinPULSELabShophbasedonfrequency/Tolerancecurves.ashx>

