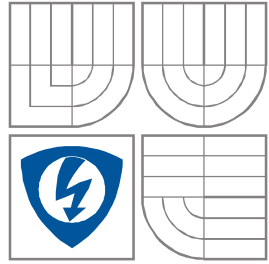


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

OPTIMALIZACE REPRODUKČNÍHO ŘETĚZCE PRO POSLECHOVÉ TESTY

THE OPTIMALIZATION OF THE AUDIO CHAIN FOR HEARING TESTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Rostislav Halaš

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc.Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Optimalizace reprodukčního řetězce pro poslechové testy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji odbornému vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Pelantovi a pedagogickému vedoucímu doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Abstrakt

Tato práce popisuje základní kroky vedoucí k řešení problému s neuspokojivou reprodukcí nahrávek zvuků, vznikajících při provozu automobilu, v poslechové místnosti hlukové zkušebny firmy Škoda Auto a.s.. Nejprve jsou přehledně shrnuty základní technické parametry jednotlivých prvků reprodukčního systému. Dále jsou stručně vysvětleny základní pojmy akustiky prostoru, rozložení zvukového pole v ohraničeném prostoru. Na základě teoretických vztahů jsou vypočítány módy kvádry s rozměry poslechové místnosti hlukové zkušebny. Poté je použit program pro výpočet přenosové charakteristiky, s jehož pomocí jsou simulovány jak různé idealizace prostoru (rozměry místnosti, absorpční koeficienty jednotlivých ploch...), tak i poslechová místa. Teoretické odsimulované výsledky jsou porovnávány s výsledky získanými měřeními. Na základě těchto měření je posouzena kvalita akustických úprav poslechové místnosti. V dalších kapitolách je shrnut průběh optimalizace reprodukčního řetězce a nastavení programu Automotive Sound Quality. Na závěr jsou zhodnoceny dosažené výsledky a navrženy další kroky navazující na tuto práci.

Abstract

This project describes basic steps leading to the solution of a problem associated with a poor quality of played recordings in the listening room of the Škoda Auto co. . Firstly, the main technical parameters of the reproduction chain elements are resumed. Secondly, the basics of the room acoustics, such as the distribution of the sound field in a bordered space, are explained. On the basis of theoretical relations, the main modes of a cubic room are calculated. Then, software for acoustic response computing is used to simulate various options of both room idealization (room size, absorption coefficient, etc.) and listening point location. Simulations are compared with results gained by measurement. On the basis of this measurement, the quality of acoustics of the listening room is evaluated. In next chapters, the process of the optimalization of the audio chain and setup of the Automotive Sound Quality software are summarized. To conclude, the results are assessed and further steps based on the project are proposed.

Bibliografická citace

HALAŠ, R. Optimalizace reprodukčního řetězce pro poslechové testy, bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 48 s., 4 příl.

Klíčová slova:

poslechový test, reprodukční řetězec, nahrávka, Automotive Sound Quality, akustika prostoru, nahrávací hlava, odezva, difúzní zvukové pole

Keywords:

hearing test, reproduction chain, record, Automotive Sound Quality, room acoustics, artificial head, response, diffuse sound field

Seznam použitých zkratk:

A/D – Analogue/Digital (analogově/číslicový)

SQ – Automotive Sound Quality (program pro analýzu a zpracování zvuku pro automobilový průmysl)

EBU – European Broadcasting Union Professional Format (datový formát)

FFT – Fast Fourier Transform (rychlá Fourierova transformace)

CPB – Constant Percentage Bandwidth (transformace s konstantní relativní šířkou pásma)

DAT – Digital Audio Tape (systém digitálního záznamu na pásku)

PC – Personal Computer (osobní počítač)

Obsah

1 ÚVOD	1
2 REPRODUKČNÍ ŘETĚZEC	3
2.1 STRUČNÁ TECHNICKÁ SPECIFIKACE	3
2.1.1 Nahrávací hlava Cortex Manikin MK1, digitální ekvalizér PE1	3
2.1.2 Zvuková karta a software pro zpracování zvuku.....	4
2.1.3 Reprodukory.....	5
2.1.4 Mixážní pult Mackie 1604 - VLZ3.....	7
2.1.5 Sluchátkový zesilovač.....	7
2.1.6 Sluchátka.....	7
2.2 PROPOJENÍ ŘETĚZCE.....	8
2.2.1 Analogový poslechový řetězec.....	8
2.2.2 Digitální poslechový řetězec	9
3 AKUSTIKA POSLECHOVÉ MÍSTNOSTI	10
3.1 ZÁKLADNÍ POJMY AKUSTIKY.....	10
3.2 TEORETICKÝ ÚVOD-MÓDY MÍSTNOSTI.....	10
3.3 SOUČASNÝ STAV, PROVEDENÉ AKUSTICKÉ ÚPRAVY	14
3.4 SIMULACE ROZLOŽENÍ ZVUKOVÉHO POLE.....	16
4 STANOVENÍ VLIVU AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ POSLECHOVÉ MÍSTNOSTI NA REPRODUKCI NAHRÁVEK MĚŘENÍM	20
4.1 POPIS MĚŘICÍHO VYBAVENÍ A POSTUP MĚŘENÍ.....	20
4.2 INTERPRETACE NAMĚŘENÝCH DAT	22
4.3 MĚŘENÍ VLIVU DESKY STOLU NA REPRODUKCI	26
4.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A POROVNÁNÍ SE SIMULACEM.....	29
5 NASTAVENÍ REPRODUKČNÍHO ŘETĚZCE	30
5.1 NASTAVENÍ REPRODUKTORŮ A SUBWOOFERU.....	30
5.2 POROVNÁNÍ ZVUKOVÝCH KARET RME DIGI 96/8 A VX POCKET PRO	32
5.3 VÝBĚR ZVUKOVÉ KARTY A ZESILOVAČE	33
6 MĚŘENÍ POMOCÍ UMĚLÉ NAHRÁVACÍ HLAVY, KOREKCE	34
6.1 MĚŘENÍ POMOCÍ UMĚLÉ NAHRÁVACÍ HLAVY	34
6.2 REPRODUKCE NAHRÁVEK A JEJICH KOREKCE.....	34
6.3 KALIBRACE PROGRAMU AUTOMOTIVE SOUND QUALITY	35
6.4 VYTVOŘENÍ TESTOVACÍCH NAHRÁVEK	37
6.5 SUBJEKTIVNÍ POROVNÁVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH KOREKČÍ	38
7 ZÁVĚR	40
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A PROGRAMOVÉHO VYBAVENÍ	42
PŘÍLOHY	44

Seznam obrázků

OBR. 2.1 NAHRÁVACÍ HLAVA NEUTRIK-CORTEX MANIKIN MK1	3
OBR. 2.2 PŘEDNÍ PANEL ELEKTRONICKÉ ČÁSTI NAHRÁVACÍ HLAVY	4
OBR. 2.3 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORŮ A MOŽNOSTI JEJÍHO NASTAVENÍ.....	6
OBR. 2.4 ZADNÍ ČÁST MIXÁŽNÍHO PULTU MACKIE VLZ 1603-PRO	7
OBR. 2.5 BLOKOVÉ SCHÉMA ANALOGOVÉHO PROPOJENÍ.....	8
OBR. 2.6 BLOKOVÉ SCHÉMA DIGITÁLNÍHO PROPOJENÍ	9
OBR. 3.1 PLÁN POSLECHOVÉ MÍSTNOSTI	14
OBR. 3.2 POSLECHOVÁ MÍSTNOST - SOUČASNÝ STAV	15
OBR. 3.3 DOBA DOZVUKU	15
OBR. 3.4 ZADÁNÍ PARAMETRŮ V PROGRAMU ROOM MODE CALCULATOR	16
OBR. 3.5 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V SOUČASNÉM POSLECHOVÉM MÍSTĚ (ROH U OKNA), VYZNAČENA TOLERANCE $\pm 5dB$	17
OBR. 3.6 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA - REPRODUKTORY A POSLECHOVÉ MÍSTO UPROSTŘED STĚNY W4, VYZNAČENA TOLERANCE $\pm 5dB$	18
OBR. 3.7 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA - POSLECHOVÉ MÍSTO V PROTILEHLÉM ROHU, VYZNAČENA TOLERANCE $\pm 5dB$	19
OBR. 4.1 PROSTŘEDÍ PROGRAMU PULSE LABSHOP	20
OBR. 4.2 UMÍSTĚNÍ MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ V POSLECHOVÉ MÍSTNOSTI	22
OBR. 4.3 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V BODĚ 1	23
OBR. 4.4 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V BODĚ 1, ZAKRYTÉ OKNO	23
OBR. 4.5 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V SOUČASNÉM POSLECHOVÉM MÍSTĚ (POLOHA 2) ...	24
OBR. 4.6 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V POLOZE 3	24
OBR. 4.7 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V POLOZE 4	24
OBR. 4.8 POROVNÁNÍ FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK V POLOZE 2.....	24
OBR. 4.9 POROVNÁNÍ FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK VE VŠECH MĚŘENÝCH POLOHÁCH	26
OBR. 4.10 ZÁVISLOST ABSORPČNÍHO KOEFICIENTU TLUMICÍHO MATERIÁLU NA FREKVENCII....	26
OBR. 4.11 SCHÉMA MĚŘICÍ APARATURY	27
OBR. 4.12 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MODULU PŘENOSU REPRODUKTOR-DESKA STOLU, REPRODUKTORY V SOUČASNÉM UMÍSTĚNÍ	24
OBR. 4.13 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA PŘENOSU REPRODUKTOR-DESKA STOLU, REPRODUKTORY POSUNUTY	24
OBR. 5.1 ÚROVEŇ AKUSTICKÉHO TLAKU POZADÍ V POLOZE 2, OKNO NASTAVENÍ PROGRAMU PULSE LABSHOP	30
OBR. 5.2 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V POLOZE 2.....	31
OBR. 5.3 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V POLOZE 2, SUBWOOFER ZATLUMEN.....	31
OBR. 5.4 POROVNÁNÍ SPEKTRA VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU (POUŽIT RŮŽOVÝ ŠUM)	32
OBR. 6.1 SCHÉMA KOREKČNÍ NAHRÁVACÍHO A REPRODUKČNÍHO ŘETĚZCE.....	35
OBR. 6.2 NASTAVENÍ VSTUPNÍ KALIBRACE	36
OBR. 6.3 BLOKOVÉ SCHÉMA VÝSTUPNÍ KALIBRACE	36
OBR. 6.4 DIALOGOVÉ OKNO BINAURÁLNÍ KOREKCE	38

1 Úvod

Zadání tohoto projektu bylo vypsané zadavatelem na základě dlouhodobých problémů s reprodukcí nahrávek v poslechové místnosti hlukové zkušebny společnosti Škoda Auto a.s..

V současnosti je výroba automobilů jedním z nejvýznamnějších odvětví průmyslu v České Republice, i ve světě. Vyrovnaný konkurenční boj vede k neustálé potřebě vše inovovat, zdokonalovat, a využít i zdánlivé maličkosti k získání náskoku. To platí i v případě měření hluků vznikajících při provozu automobilu. Cílem je utlumit nežádoucí zvuky na co nejmenší hodnotu a technickými úpravami změnit jejich spektrum tak, aby nebyly posádkou vnímány jako nepříjemné ani při dlouhodobém užívání.

V praxi jsou zvuky hodnoceny několikačlennou porotou. Je tedy nepraktické posuzovat je přímo v měřeném automobilu. Z tohoto důvodu se užívá nejmodernějších nahrávacích zařízení, která umožňují věrně zaznamenat situaci v měřeném automobilu včetně směrových vlastností a vlivu řidiče na výsledné zvukové pole.

Sebelepší nahrávací systém však ztrácí význam, pokud není k dispozici kvalitní reprodukční řetězec. Tento řetězec by měl být schopný reprodukovat nahrávky tak, aby výsledný sluchový vjem odpovídal skutečnosti. Nahrávky tedy musí být přehrávány se stejnou hlasitostí a bez přídavných zkreslení, či šumů, ve srovnání s realitou.

V současném stavu poslechové místnosti Škoda Auto a.s. je problémové zejména přehrávání přes reproduktory. V poslechovém místě jsou zřetelně zesílené nízké frekvence způsobující dunivost zvuků. V menší míře jsou tyto projevy patrné i při přehrávání přes sluchátka. V některých případech se k nahrávce přidává šum.

Pro archivaci nahrávek a jejich analýzu je používáno PC se specializovaným softwarem. Při uložení nahrávky do PC a její následné reprodukci se reprodukováné zvuky značně liší nejenom zmiňovaným dunivým efektem, ale i zkreslením vyšších frekvencí. Toto zkreslení je závislé jak na nastavení korekcí nahrávacího zařízení, tak na nastavení inverzních korekcí používaného softwaru.

V poslechové místnosti již byl tento komplexní problém několikrát řešen z různých hledisek (akustika poslechové místnosti, prvky reprodukčního řetězce). Zatím však nebylo nalezeno uspokojivé řešení.

Cíle této bakalářské práce jsou tedy:

- seznámit se s technickým vybavením hlukové zkušebny
- zapojit prvky reprodukčního řetězce dle požadavků zadavatele
- reorganizovat, a přehledně označit poslechové místo
- určit vliv akustiky prostoru na reprodukováné signály - podle teoretických vztahů vypočítat módy, které mohou v místnosti vznikat, a pak měřením zjistit skutečné rozložení zvukového pole v prostoru
- změřit potřebné charakteristiky reprodukčního řetězce

- na základě měření správně nastavit frekvenční charakteristiky reproduktorů a subwooferu
- seznámit se s programem Automotive Sound Quality a správně jej zkalibrovat
- na základě testů určit nejvhodnější nastavení korekcí pro měření umělou nahrávací hlavou
- nalézt příčinu zhoršení kvality poslechu zvuku z programu Automotive Sound Quality oproti záznamu na pásce DAT
- dosažené výsledky shrnout a zdokumentovat pro pozdější využití pracovníky hlukové zkušebny

2 Reprodukční řetězec

V této kapitole jsou stručně popsány jednotlivé prvky reprodukčního řetězce poslechové místnosti, a také možnosti propojení dle potřeb zadavatele. Pro optimalizaci a určení možných problémových prvků tohoto řetězce je znalost jejich technických parametrů nutností. Detailnější specifikace prvků je možné nalézt v příslušné technické dokumentaci, viz Příloha č.2.

2.1 Stručná technická specifikace

2.1.1 Nahrávací hlava Cortex Manikin MK1, digitální ekvalizér PE1

Potřeba věrného nahrávání zvuků v automobilech vedla k vytvoření umělé hlavy, tedy jakéhosi modelu lidské hlavy a části lidského těla (ramena a hrudník), ovlivňující vnímání zvuku člověkem. Frekvenční a směrové charakteristiky tohoto modelu měly plně odpovídat lidskému sluchu.

Výsledkem bylo vytvoření umělé hlavy Cortex (týmem Prof.Dr. Manfreda Zollnera, Regensburg) [7]. Pochopení nahrávání hlavou je základem pro pozdější optimální kalibraci a přehrávání záznamu.

Výhodou umělé hlavy oproti mikrofonům je zachování směrových vlastností zvuku. Tyto vlastnosti jsou charakteristické právě pro lidský sluch a umožňují nám určit orientaci zdroje zvuku v prostoru. Nahráváním mikrofonem nelze tohoto efektu docílit, proto tedy s výhodou využíváme umělých hlav pro přesné posuzování.

Nejnovější systém používaný ve Škoda Auto a.s. je označený jako **Neutrik-Cortex Manikin MK1** a skládá se z následujících částí (podrobněji viz [8]):



Obr.2.1 Nahrávací hlava Neutrik-Cortex Manikin MK1 [7]

- **Vlastní torzo hlavy** - zvuk vstupuje přes pěnové ušní boltce a vnější zvukovod k elektrostatickým mikrofonům s polarizačním napětím 200 V a rozsahem 3,5 Hz – 8 kHz, optimalizovaným pro difúzní pole. Celý systém má pak rozsah 1 Hz - 22 kHz, což zahrnuje celou slyšitelnou frekvenční oblast (dle [1]: 20 Hz – 20 kHz). MK1 je dále vybaven 24 bitovými A/D a D/A převodníky. Při

nahrávání v autě je možné využít naklápěcích mechanismů a MK1 na sedadle správně umístit.

- **Magnetofon** - MK1 umožňuje záznam na magnetofon typu DAT (Digital Audio Tape). Formát DAT byl vytvořen společností SONY v 80. letech minulého století. Digitální kazeta obsahuje magnetický pásek, na nějž je zaznamenáván digitální signál. Umožňuje vzorkovací frekvence 48; 44,1, nebo 32 kHz při 16bitové kvantizaci. Ve spojení s MK1 se však používá pouze vzorkovací frekvence 48 kHz. Na rozdíl od ostatních médií nepoužívá DAT magnetofon žádnou kompresní metodu, reprodukováná data jsou tedy nezkrácená.



Obr. 2.2. Přední panel elektronické části nahrávací hlavy [7]

- **Elektronická část NCF1** - první modul je určen pro připojení otáčkoměru, ten není pro tento projekt využíván. Do druhého modulu můžeme připojit dálkové ovládání, pomocí konektorů IN a THRU lze spojit více MK1 a ovládat je současně. Nejdůležitější částí je modul s výstupními konektory. Pro výstup signálů snímaných přímo mikrofony, nebo přehrávaných z vestavěného magnetofonu DAT je možné použít buď digitálního výstupu (AES/EBU - profesionální, vysoká odolnost proti rušení; SPDIF - verze AES/EBU pro běžné uživatele), nebo analogového. V případě analogového výstupu je možné dodatečně signál zesílit, či utlmit vestavěným zesilovačem. Při výstupu na sluchátka MK1 automaticky rozpozná typ sluchátek a aplikuje korekci sluchátek a inverzní korekci zvukového pole. Podrobnosti viz kapitola 6.
- **Spodní část s bateriemi** - k napájení je možné použít vestavěné baterie, popř. 12V z palubní sítě automobilu, či 220V napájení z rozvodné sítě

Firma Cortex dodává k nahrávací hlavě digitální ekvalizér **Personal Equalizer PE1**. Ten má 8 digitálních vstupů a rozpoznává použitý dynamický rozsah, který je kódován v 16. bitu datového rámce. PE1 automaticky aplikuje inverzní korekce vzhledem ke korekcím použitým při nahrávání a umožňuje vytvoření uživatelských korekcí. PE1 je také vybaven dvěma výstupy pro elektrostatická sluchátka.

2.1.2 Zvuková karta a software pro zpracování zvuku

U většiny nahraných zvuků je požadována jejich archivace, následná analýza, zobrazení spektra, filtrování atd. K tomu je využita pracovní stanice s interní zvukovou kartou

RME DIGI 96/8. Pro analýzu nahraných zvuků je pak použit program Automotive Sound Quality distribuovaný firmou Brüel&Kjaer. Některé pracovní stanice mohou svými obvody ovlivňovat obvody zvukové karty a způsobovat tak zvýšení šumu na jejím výstupu. Jelikož však stávající stanice nelze vyměnit, je nutné mít na paměti při vyhodnocování měření i tyto vlivy (zejména rušení na síťovém kmitočtu 50 Hz). Následuje popis současně používané zvukové karty a programu Automotive Sound Quality (dále jen SQ).

Zvuková karta RME DIGI 96/8 dle [12] patří do nejvyšší řady profesionálních zvukových karet. Umožňuje vstup formátu jak SPDIF (CINCH konektory), tak i AES/EBU (XLR konektory). Má také vstupní a výstupní konektor pro přenos optickým vedením. V neposlední řadě obsahuje analogový vstup a výstup. Dosahuje až 112 dB odstupu signálu od šumu. Podporuje vzorkovací frekvence 32; 44,1; 48; 64; 88,2 a 96 kHz. Tato karta je doplněna rozšiřujícím modulem AEB4 - I obsahujícím čtyři analogové vstupy s 24 bitovými A/D převodníky.

Program Sound Quality je efektivním nástrojem pro nahrávání, úpravu, analyzování a posuzování zvuků způsobených činnostmi zařízení. Skládá se z 5 modulů:

- **Recorder** - používaný pro nahrávání, editaci, zobrazení a přehrávání zvukových souborů.
- **Performer** - umožňuje přehrávání, kombinaci a porovnávání zvukových souborů.
- **Real - Time Filter** - umožňuje definovat a následně využívat filtry (DP,HP,PP,PZ...) jak v reálném čase, tak offline. Parametry filtrů je možné měnit i přímo při zpracování zvukových souborů v reálném čase.
- **Metrics** - zprostředkuje množství metrik popisujících zvuk (např. hlasitost,srozumitelnost...).
- **Designer** - zpracovává signál včetně informací o otáčkách.Umožňuje několik způsobů filtrace.

Pro správnou činnost programu SQ je třeba provést kalibraci vstupního a výstupního řetězce.

2.1.3 Reprodukory

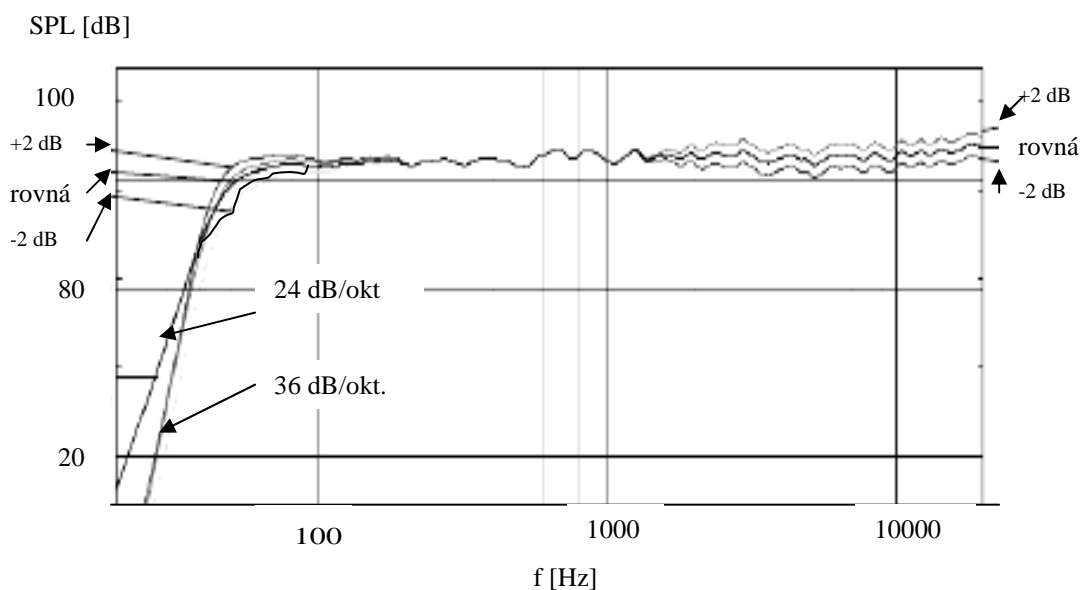
Pro reprodukci zvuků jsou použity studiové monitory LSR28P firmy JBL. Zkratka LSR označuje použití technologie Linear Spatial Reference. Nový přístup zajišťuje systému vyrovnaný výkon v různých akustických prostředích. Dle výrobce, viz [10], je možné dosáhnout optimálního výkonu při umístění posluchače do prostoru $\pm 15^\circ$ vertikálně a $\pm 30^\circ$ horizontálně vzhledem ke středu monitoru. LSR28P obsahuje dva akustické měniče (převodníky elektrického signálu na akustický). Dolnofrekvenční měnič se skládá ze dvou aktivních cívek a jedné působící jako dynamická brzda, sloužící k redukci slyšitelného zkreslení na nejvyšších hladinách. Hornofrekvenční měnič obsahuje kompozitovou membránu umístěnou v eliptickém vlnovodu s 60 x 100stupňovým rozptylem.

System je vybaven dvěma výkonovými zesilovači s aktivním přechodem, což znamená 250wattový výkon na nízkých frekvencích a 120wattový výkon pro vyšší frekvence.

Výrobce udává plochou frekvenční charakteristiku s maximálními odchylkou ± 1 dB v pásmu 50 Hz - 20 kHz, přechod mezi nízkými a vysokými frekvencemi 1,7 kHz a maximální hladinu zvuku ve vzdálenosti 1 m větší, než 108 dB.

Na zadní straně monitorů je možné dostavit pomocí potenciometrů následující parametry (viz Obr 2.3):

- útlum úrovně vstupního signálu (0 – 12) dB oproti nominální hodnotě
- dodatečný útlum vstupního signálu o 4 dB
- dodatečný útlum vstupního signálu o 8 dB
- měnit strmost poklesu frekvenční charakteristiky na nízkých frekvencích - 24 nebo 36dB na oktávu, to umožňuje utlumit subsonické frekvence
- nastavit sklon frekvenční charakteristiky na nízkých frekvencích na 36 dB na dekádu a zesílit frekvence do 150 Hz o 2 dB, používá se v případě potřeby zesílit basy
- nastavit sklon frekvenční charakteristiky na nízkých frekvencích na 36 dB na dekádu a utlumit frekvence do 150 Hz o 2 dB, je možno použít pro utlumení basů
- zesílení vysokých frekvencí od 1,8 kHz o 2 dB, použije se, pokud je místnost “akusticky mrtvá”(téměř neodráží zvukové vlnění)
- zeslabení vysokých frekvencí od 1,8 kHz o 2 dB, použije se, pokud je místnost příliš “jasná”(vzniká množství odrazů)



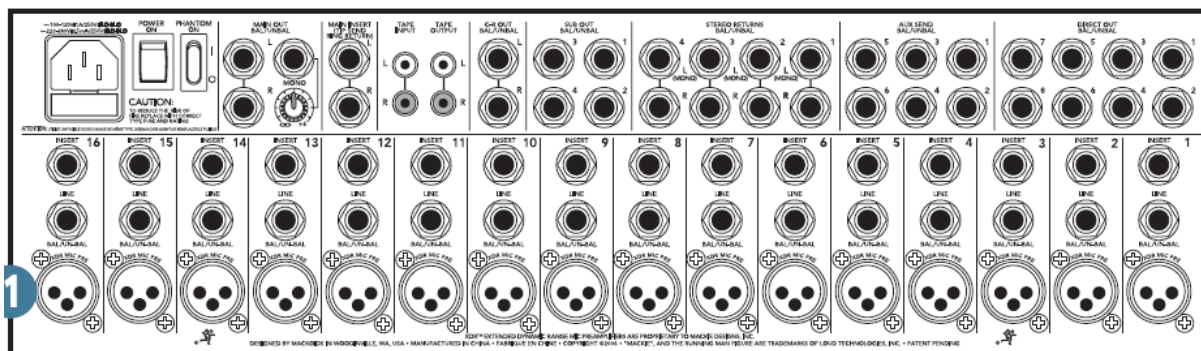
Obr. 2.3 Frekvenční charakteristika reproduktorů a možnosti jejího nastavení [10]

Monitory jsou doplněny subwooferem LSR12P s 250wattovým výkonovým zesilovačem. Podrobnější informace, viz [10].

2.1.4 Mixážní pult Mackie 1604 - VLZ3

Pro větší flexibilitu poslechového řetězce je s výhodou použit mixážní pult Mackie 1604 - VLZ3 (dále jen Mackie) , umožňující propojit dané vstupní a výstupní zařízení bez nutnosti přepojovat kabeláž.

Bohužel, Mackie je plně analogový mixážní pult. Lze k němu tedy připojit pouze zařízení , které má analogový vstup nebo výstup, popř. je nutné vřadit D/A převodník. Vedení signálu analogovou cestou je spíše nevýhodou. Digitální signál je totiž mnohonásobně odolný proti analogovému rušení a nedochází k jeho zkreslení průchodem jednotlivými prvky řetězce. Mackie má 16 samostatně nastavitelných vstupních kanálů, umožňujících připojit zařízení pomocí XLR konektoru, nebo 1/4 palcovým jack-konektorem. U každého vstupního signálu lze měnit hlasitost, nastavit korekce (zesílení, či útlum určitého pásma frekvencí), nastavit vyvážením a následně jej propojit na výstup. Pro naši aplikaci jsou důležité výstupy MAIN OUT (hlavní výstup) a SUB OUT (pomocný výstup). Další informace v [9].



Obr. 2.4. Zadní část mixážního pultu Mackie VLZ 1603-PRO [9]

2.1.5 Sluchátkový zesilovač

Při poslechu nahrávek přes současně používaný sluchátkový zesilovač je jasně slyšitelný šum, který zesilovač k signálu přidává. Také umožňuje připojení pouze čtyř sluchátek, což je pro potřeby skupinového posuzování nahrávek nedostačující. Pro účely přesného posuzování je tedy nevhodný, a proto nemá smysl zmiňovat jeho parametry. Na základě požadavků bude vybrán zesilovač nový, umožňující připojení až osmi sluchátek.

2.1.6 Sluchátka

K dispozici jsou sluchátka dvou konstrukčních typů.

První jsou otevřená elektrostatická, SENNHEISER HE60. Principiálně jsou tvořeny dvěma membránami, které slouží jako elektrody kondensátoru. Při dopadu zvukové vlny na jednu membránu se změní vzdálenost elektrod kondensátoru, a tím i kapacita a napětí na elektrodách. Pro svou činnost potřebují vysoké napájecí napětí, proto nelze jednoduše použít redukci pro zapojení do vstupu s jiným konektorem. HE60 mají omezený tlak na 110 dB. Jsou doporučené pro dlouhodobé používání i pro nízkofrekvenční zvuky. Ve frekvenční

charakteristice se objevuje vrchol na 100 Hz způsobený rezonancí hmoty sluchátek a pružiny, která je spojuje. Výrobce udává nelineární zkreslení 0,3 – 1 %.

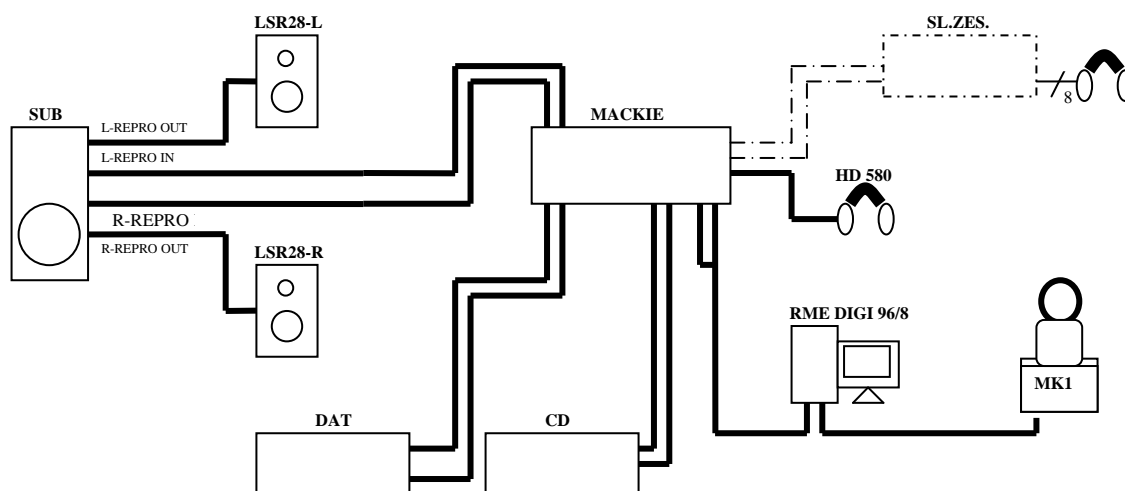
Druhým typem jsou otevřená elektrodynamická sluchátka SENNHEISER HD580. Jejich činnost je založena na indukci napětí na cívkách připevněných na membránu při pohybu v magnetickém poli. Výrobce deklaruje vyrovnanou frekvenční charakteristiku $\pm 1dB$ v pásmu frekvencí 15 Hz – 20 kHz.

2.2 Propojení řetězce

Zadavatel požaduje snadné a rychlé spojení všech používaných prvků. Jak již bylo zmíněno, mixážní pult MACKIE je pouze analogový, s jeho pomocí tedy vytvoříme analogové propojení. I přes vysokou kvalitu všech prvků řetězce je analogový signál náchylný na rušení a při průchodu přenosovými cestami je zkreslován. Proto vytvoříme i druhou variantu digitálního propojení za použití PE1.

2.2.1 Analogový poslechový řetězec

Pojem analogový může být zavádějící, jelikož některé prvky byly propojeny i digitálně a poté signál převeden zpět na analogový. Hlavní část je však analogová. Kvalita signálu na výstupu bude tedy záviset na frekvenčních charakteristikách jednotlivých prvků.



Obr. 2.5. Blokové schéma analogového propojení

Nyní bude popsáno výsledné zapojení viz blokové schéma na Obr 2.5. Nahrávací hlava MK1 je digitálně propojena se vstupem zvukové karty. Z výstupu zvukové karty je signál veden na vstupy 3 a 4 mixážního pultu.

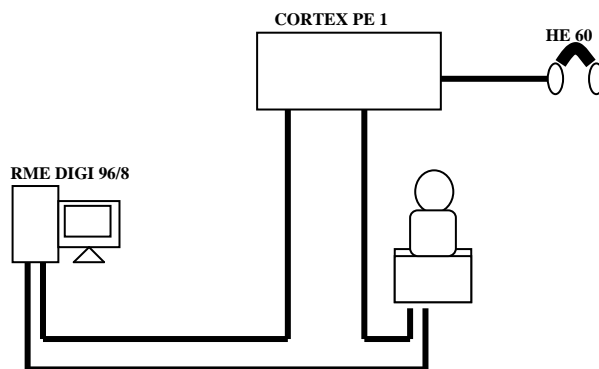
Jelikož zpracováváme stereofonní nahrávky, budeme používat konvenci připojení levého kanálu na kanál s lichým pořadovým číslem a pravého kanálu na kanál s pořadovým číslem sudým. Na kanál 5 a 6 je připojen výstup magnetofonu DAT a kanály 7 a 8 obsazuje výstup zřídka používaného CD přehrávače. Jednotlivé vstupy můžeme pomocí tlačítka **SOLO**

odeslat samostatně na výstup, nebo je tlačítka **1-2** a **3-4** přiřadit do podskupiny. V našem případě bude používán pouze režim **SOLO**.

Na výstupu se je připojen příslušný aktivní kanál. Jelikož zatím není k dispozici kvalitní sluchátkový zesilovač (ve schématu označen čerchovanou čarou, připojený na pomocný výstup **SUBOUT**), pro odposlech jsou využívána sluchátka zapojená přímo do mixážního pultu do výstupního konektoru **ROOM PHONES**. Na tento výstup je přiváděn signál shodný se signálem na hlavním výstupu, slouží pro jeho monitorování a je možné si jej dodatečně zesílit. K hlavnímu výstupu **MAIN OUT** jsou prostřednictvím subwooferu reproduktory. Pokud je subwoofer vypnutý, chová se pouze jako vodivé spojení vstupu a výstupu (dle výrobce v tomto stavu neovlivňuje přenášený signál).

2.2.2 Digitální poslechový řetězec

V tomto zapojení lze využít poslechu pouze přes dvojice elektrostatická sluchátka. Nahrávky by měly být reprodukovány bez zkreslení, toto propojení by mohlo být referenčním při zkoumání vlastností analogového řetězce. Kvalitu tohoto zapojení je ovšem nejprve třeba posoudit poslechovými testy.



Obr. 2.6 Blokové schéma digitálního propojení

Blokové schéma propojení je na Obr. 2.6. Na jeden digitální vstup PE1 je připojen výstup zvukové karty a na druhý nahrávací hlava MK1. Výstup nahrávací hlavy může být alternativně připojen ke vstupu zvukové karty. Nahrávky jsou poslouchány přes elektrostatická sluchátka připojená do sluchátkového výstupu. Je tedy možné porovnávat původní nahrávku z hlavy s nahrávkou zpracovanou programem SQ.

3 Akustika poslechové místnosti

Dle požadavků zadavatele jsou v této kapitole popsány základy akustiky prostoru. Tyto poznatky jsou dále aplikovány na simulaci akustických vlastností idealizovaného modelu místnosti. Na závěr je hodnocen význam těchto simulací a možný vliv akustiky na reprodukci zvuků v poslechové místnosti Škoda Auto a.s.

3.1 Základní pojmy akustiky

Zvuk je mechanické vlnění šířící se hmotným prostředím. Lze ho popsat časovými změnami akustického tlaku p (rozdíl mezi okamžitou hodnotou tlaku v daném bodě zvukového pole a statickou hodnotou atmosférického tlaku) v čase. Jednotka akustického tlaku je **Pascal** (Pa). V psychoakustice se používají tlaky v rozmezí $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (práh slyšitelnosti) až 10^2 Pa (práh bolesti). Vzhledem k možnému rozsahu sedmi řádů se zavádí jednotka **hladina akustického tlaku** (*SPL*) definovaná dle [2] rovnicí

$$SPL = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ [dB]}, \quad (3.1)$$

kde p je akustický tlak a p_0 referenční hodnota akustického tlaku $20 \mu\text{Pa}$.

Zvukové pole můžeme rozdělit na volné a difúzní. Volné pole je jakousi idealizací reálných konečných polí s překážkami a ohraničeními, vlny se šíří pouze přímočaře od zdroje. U pole difúzního je ohraničený prostor vyplněn přímými i odraženými vlnami a hustota akustické energie je rozložena rovnoměrně. Vlastnosti reálných prostředí se většinou pohybují mezi oběma krajními možnostmi. V interiéru automobilu i při následném přehrávání zvuků v poslechové místnosti vzniká spíše pole difúzní. Dále je tedy diskutováno pouze pole difúzní.

3.2 Teoretický úvod-módy místnosti

Ohraničený prostor (např. poslechová místnost) ovlivňuje šířící se zvuk v podstatě dvěma způsoby:

- v závislosti na rozměrech místnosti vzniká stojaté vlnění ovlivňující zejména nízké kmitočty
- vícenásobné odrazy od stěn a zařízení místnosti interferují s přímou vlnou a mění tak reálnou přenosovou charakteristiku na středních a vyšších kmitočtech

Rozměry místnosti tedy mohou velmi výrazně ovlivnit nízké kmitočty šířícího se zvuku. Je-li místnost pravoúhlá, dochází ke skládání přímé vlny, jejíž polovina vlnové délky je celočíselným násobkem rozměru místnosti, s vlnou odraženou (její fáze však musí být shodná s fází přímé vlny). Za výše popsaných podmínek tedy vzniká stojaté vlnění způsobující nerovnoměrné rozložení akustické energie. V prostoru se budou vyskytovat místa s velmi malou intenzitou zvuku (uzly) a naopak místa s velkou intenzitou zvuku (kmitny). Nerovnoměrnost rozložení energie je tím větší, čím větší je odrazivost stěn. V určitých místech jsou tedy některé tóny vnímány jako utlumené a v jiných naopak jako zesílené.

Vzhledem k tomu, že se zvuk šíří trojrozměrným prostředím, musíme uvažovat nejrůznější odrazy od všech hraničních ploch místnosti. V kvádrové místnosti tedy vzniká množství stojatých vlnění o daných frekvencích. Tyto frekvence jsou nazývány vlastní frekvence místnosti, nebo také módy místnosti.

Každá místnost má tedy svoje vlastní frekvence (módy), které závisí na jejích rozměrech. To se týká i místností, které nemají pravoúhlé stěny, jen způsob výpočtu jednotlivých vlastních frekvencí je složitější. Jednotlivé módy lze dle [1] podle orientace dělit na:

1. Axiální - vznikají mezi dvěma paralelními povrchy (protilehlé stěny, podlaha a strop) a většinou bývají nejsilnější, základní mód lze vypočítat ze vztahu:

$$f = p \cdot \frac{v}{2 \cdot d} \quad [\text{Hz}], \quad (3.2)$$

kde v je rychlost zvuku, d vzdálenost dvou paralelních povrchů místnosti (šířka, délka, výška), p celočíselný koeficient módu, pro který vztah řešíme.

2. Tangenciální - vznikají násobnými odrazy od rozhraní dvou dvojic paralelních povrchů (např. dvě stěny a strop - podlaha), jsou asi o polovinu slabší, než axiální. Také je lze určit podle jednoduchého vztahu:

$$f = \frac{v}{2 \cdot \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2}}} \quad [\text{Hz}], \quad (3.3)$$

kde v je rychlost zvuku, L délka místnosti, W šířka místnosti a parametry p , q reprezentují módy, pro které vztah řešíme (např. mód₁₁: $p = 1$, $q = 1$).

3. Šikmé - zahrnují všech šest povrchů (dvě dvojice stěn, strop - podlaha), jsou asi čtyřikrát slabší, než axiální. Jejich frekvenci určíme ze vztahu, který již zahrnuje všechny tři rozměry místnosti:

$$f = \frac{v}{2 \cdot \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}} \quad [\text{Hz}], \quad (3.4)$$

kde v je rychlost zvuku, L délka místnosti, W šířka místnosti, H výška místnosti a parametry p , q , r jsou přirozená čísla reprezentující módy, pro které vztah řešíme (např. mód₁₁₁: $p = 1$, $q = 1$, $r = 1$). Vzorec pro výpočet šikmých módů je zobecněním obou předchozích a při položení některých z koeficientů p , q , r rovných nule dostáváme vzorce (3.2) či (3.3).

Pro upřesnění uvádím příklad výpočtu módů pro idealizovanou posluchárnu Škoda Auto a.s.:

V tomto modelu zanedbávám výklenky a považuji místnost za kvádr s dokonale odrazivými stěnami a rozměry, dosazují do vzorců (3.2) - (3.4):

$$v = 340 \text{ m/s (rychlost zvuku při pokojové teplotě [2])}$$

$$L = 6,27\text{m}$$

$$W = 5,60\text{m}$$

$$H = 2,80\text{m}$$

výpočet provádím pro mód s koeficienty $p = q = r = 1$:

$$f = p \cdot \frac{v}{2 \cdot W} = 1 \cdot \frac{340}{2 \cdot 5,60} = 30,4 \text{ Hz}$$

$$f = \frac{v}{2 \cdot \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2}}} = \frac{340}{2 \cdot \sqrt{\frac{1^2}{6,27^2} + \frac{1^2}{5,60^2}}} = 710 \text{ Hz}$$

$$f = \frac{v}{2 \cdot \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}} = \frac{340}{2 \cdot \sqrt{\frac{1^2}{6,27^2} + \frac{1^2}{5,60^2} + \frac{1^2}{2,80^2}}} = 395,4 \text{ Hz}$$

Výpočty v reálných místnostech jsou však mnohem složitější, proto se v praxi pro výpočet akustických vlastností používá specializovaný software.

Ideálním stavem je, když jsou jednotlivé vlastní frekvence místnosti rovnoměrně rozložené a základní vlastní frekvence leží hluboko pod přenášeným pásmem. V případě poslechové místnosti je frekvenční pásmo (20 Hz – 20 kHz). Pro toto pásmo jsou dle [1] optimální rozměry místnosti v oblasti (100 – 200) m, což není reálně splnitelné. S tím tedy souvisí i volba nejnižší dolní frekvence poslechových monitorů. V malém prostoru bývá poslech na nejnižších frekvencích spíše na závadu.

V nejhorším případě je jeden rozměr násobkem druhého. Proto vzniká více módů na jisté nízké frekvenci a v přenosové charakteristice můžeme naměřit na jisté nízké frekvenci znatelný vrchol.

Většinou jsou ovšem rozměry místnosti dané. Pak nezbyvá nic jiného, než provést akustické vlastnosti místnosti pomocí úpravy odrazivých ploch.

K úpravě nízkých frekvencí se používají absorbéry. Ty se užívají jako konstrukce s vibračními panely. Konstrukce s vibračním panelem využívá rezonanční princip, kdy na

dřevěném rámu je pomocí měkkého závěsu upevněna kmitající deska a vnitřní prostor je obvykle vyplněn minerální vatou. Vyplněním absorbéru minerální vatou dojde ke snížení rezonanční frekvence a snížení jeho selektivity.

Použití obkladových materiálů (koberců, závěsů atd.) v praxi nefunguje. Tlumicí účinek těchto materiálů totiž roste s frekvencí. Na nízkých kmitočtech je tedy účinek minimální.

K úpravě středních frekvencí se využívá tzv. Helmholtzových rezonátorů. Konstrukce Helmholtzova rezonátoru je podobná jako vibračního panelu, místo kmitající desky je čelní panel absorbéru tvořen děrovanou deskou. Resonanční frekvence závisí na poměru děrované a plné plochy, hloubce absorbéru a výplni. Podrobný návrh obou konstrukcí lze nalézt v odborné literatuře.

Dále je diskutován vliv akustických vlastností prostoru vzhledem k vyšším frekvencím.

Jedním z projevů difúzního zvukového pole je dozvuk. Na rozdíl od volného pole, kde intenzita klesá se zvětšující se vzdáleností, v difúzním poli je intenzita ve všech místech víceméně stejná. Toto rozložení zvukového pole následně ovlivňuje výslednou přenosovou charakteristiku reprodukčního řetězce.

Zavádíme tedy tzv. poloměr doznívání, který je definován jako vzdálenost od zdroje zvuku, ve které poklesne intenzita zvuku na úroveň intenzity difúzního pole. Poloměr doznívání bývá v běžných místnostech asi 2m, viz poslední odstavec kapitoly.

Dozvuk závisí na rozměrech místnosti, na pohltivosti povrchu stěn a předmětech vyplňujících prostor.

Dozvuk charakterizuje tzv. *dobu dozvuku*. Je to doba, za kterou po vypnutí zdroje poklesne hladina zvuku o 60 dB. Je třeba zmínit, že doba dozvuku závisí na frekvenci. Musíme tedy stanovit dobu dozvuku pro celé spektrum frekvencí, které nás zajímají. Pomocí akustických úprav lze docílit optimální doby dozvuku dle [1] (0,2 - 0,5) s.

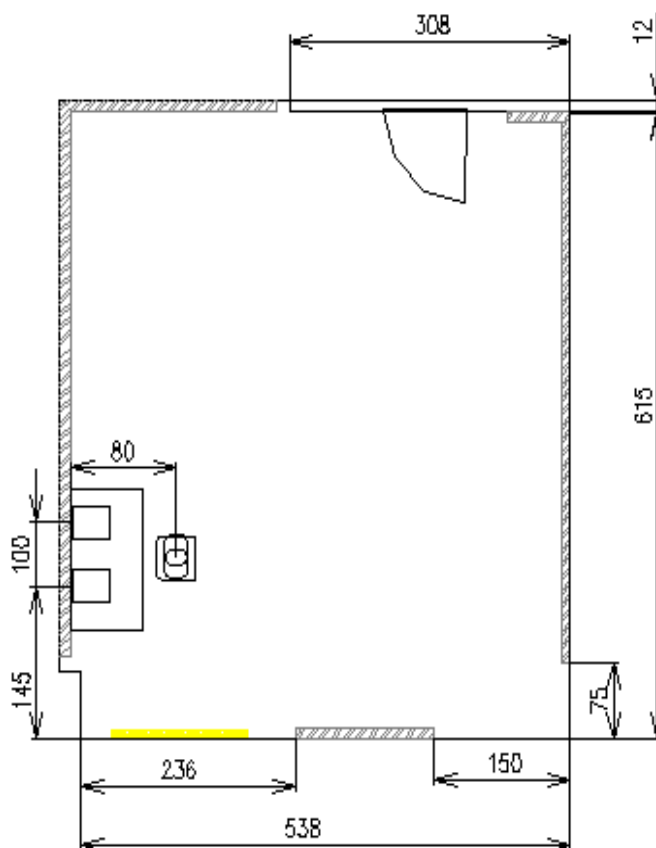
Akustické úpravy se provádí zvýšením tlumicích vlastností ohraničení místnosti a velkých předmětů, od kterých se vlnění může odrážet. V amatérských podmínkách je možné tyto úpravy provést použitím koberců, závěsů a dalších tlumicích materiálů, které, jak již bylo zmíněno mají na vyšších frekvencích dobré tlumicí vlastnosti. Prostor by však neměl být úpravami přetlumen, věrnost reprodukce se pak opět snižuje.

Pokud ovšem používáme k reprodukci poslechový monitor a poslechové místo je blíže, než poloměr doznívání, poslechová charakteristika závisí spíše na frekvenční charakteristice monitorů. V takovémto případě by neměly mít módy místnosti, ani odrazy od stěn blízkých reproduktoru na výsledný vjem vliv.

3.3 Současný stav, provedené akustické úpravy

Po rozboru akustických vlastností idealizované místnosti jsou zmíněny konkrétní úpravy reálné posluchárny.

Poslechová místnost hlukové zkušebny Škoda Auto a.s. je přibližně obdélníkového půdorysu se dvěma výklenky viz nákres Obr. 3.1. V minulosti zde byly provedeny jisté akustické úpravy, které téměř nejsou zdokumentovány. Vzhledem k zaměření tohoto projektu tedy pouze zhodnotíme kvalitu těchto úprav. Šedé vyšrafované plochy znázorňují pole vibračních panelů a štěrbinových rezonátorů. Na obrázku je také patrná orientace poslechového místa. Je zajímavé si všimnout, že poslechové místo se nachází velmi blízko okna s poměrně velkou plochou. Z hlediska zvukového vlnění můžeme považovat toto okno za téměř absolutně odraznou plochu a může tedy způsobit změnu zvukového pole v místě posluchače. Jeho význam bude diskutován dále.



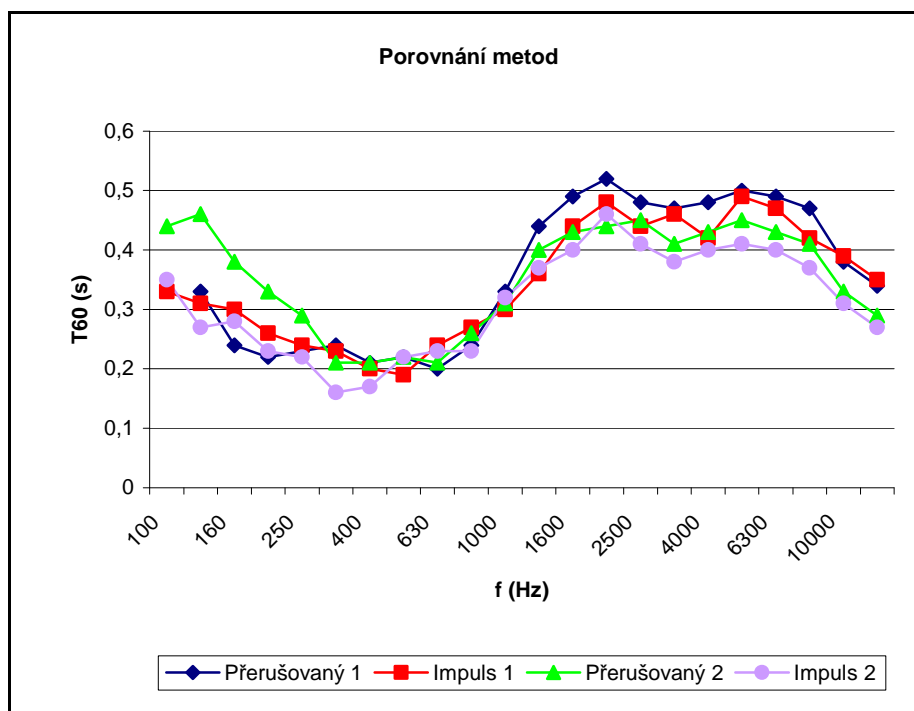
Obr 3.1 Plán poslechové místnosti



Obr 3.2 Poslechová místnost - současný stav (na obrázku jsou vidět kmitající panely a štěrbinové rezonátory)

Nezanedbatelné odrazy mohou vzniknout i od podlahy a stropu, proto byl na podlahu aplikován koberec JEKOR s velkým tlumením středních frekvencí. Na stropě jsou umístěny sádrové stropní podhledy.

V současnosti je místnost vybavena několika stoly a množstvím technického zařízení. V tomto stavu již byla několikrát měřena doba dozvuku. Všechna měření se shodují a splňují výše zmíněné rozmezí (0,2 - 0,5) s. Graf na Obr. 3.3 převzatý z [13] ukazuje dobu dozvuku pro rozsah frekvencí (100 Hz - 12,5) kHz. Měření bylo provedeno dvěma metodami - metodou přerušovaného šumu a metodou integrované impulsové odezvy. Kvůli posouzení stability výsledků bylo měření provedeno dvakrát v rozmezí jednoho týdne.



Obr. 3.3 Doba dozvuku [13]

3.4 Simulace rozložení zvukového pole

Jak již bylo zmíněno, analýza akustických vlastností reálných místnosti je výpočetně náročná. Je však možné usnadnit si práci použitím některého ze simulačních programů specializovaných na akustiku. Takovýchto programů je mnoho, avšak většina z nich používá pokročilé modely zahrnující nejrůznější vlivy prostředí, a tomu odpovídá i jejich cena.

Vzhledem k nedostupnosti těchto komerčních programů byl použit podstatně jednodušší, avšak „freewareový“ program **Room Mode Calculator**.

V tomto programu je možné zadat pouze rozměry kvádrového prostoru, souřadnice umístění monitorů a posluchače. Pro první přiblížení a vytvoření představy o možných módech vznikajících v místnosti bude tento model stačit. Oproti výpočtům v kapitole 3.2 přidává RMC do rovnic reflexní koeficienty ohraničujících ploch.

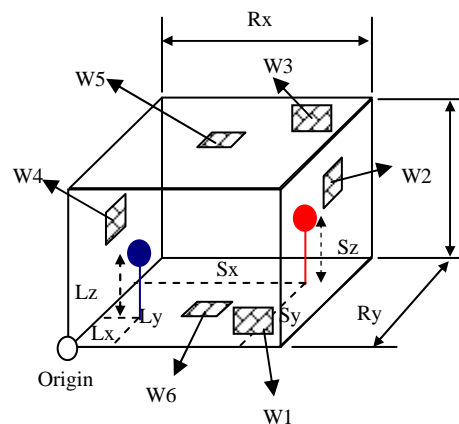
Reflexní koeficient r popisuje schopnost materiálu odrážet dopadající vlnění (vyjadřuje tedy poměr mezi celkovou energií dopadající na plochu a energií odraženou). Jedná se o koeficient, který je bezrozměrný. Nabývá hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$, přičemž hodnota 1 značí bezztrátový odraz, naopak hodnota 0 odpovídá úplnému pohlcení dopadajícího vlnění.

V praxi se často používá absorpční koeficient α . Ten naopak vyjadřuje schopnost materiálu dopadající vlnění pohlcovat, je také bezrozměrný a nabývá hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Přepočty mezi reflexním a absorpčním koeficientem lze provádět dle [1] podle vztahu:

$$\alpha = 1 - r^2 \quad (3.5)$$

Nejprve je simulována kvádrová místnost o rozměrech poslechové místnosti Škoda Auto a.s.. Pro ucelenou představu jsou simulovány tři situace. První dvě odpovídají mezním hodnotám reflexního koeficientu, tedy všechny stěny mají r buď nulový nebo roven jedné. V třetí simulaci jsou dosazeny reflexní koeficienty materiálů, které jsou v poslechové místnosti skutečně použity. Poslechové místo je v pozici dle Obr 3.1. Zobrazeno je frekvenční pásmo (20 – 400) Hz. Podstatná je oblast nízkých frekvencí do 100 Hz, kde se dá očekávat významný vznik stojatého vlnění viz kapitola 3.2. Počet násobných odrazů je omezen na 10.

	Lx	Ly	Lz
Poslechové místo	0,8	1,95	1,1
	Sx	Sy	Sz
Umístění monitoru 1	0,3	1,45	0,9
	Sx	Sy	Sz
Umístění monitoru 2	0,3	2,45	0,9
	Rx	Ry	Rz
Rozměry místnosti	5,6	6,27	2,8
	W1	W2	W3
Reflexní koeficienty	0,96	0,26	0,26
	W4	W5	W6
	0,26	0,78	0,96



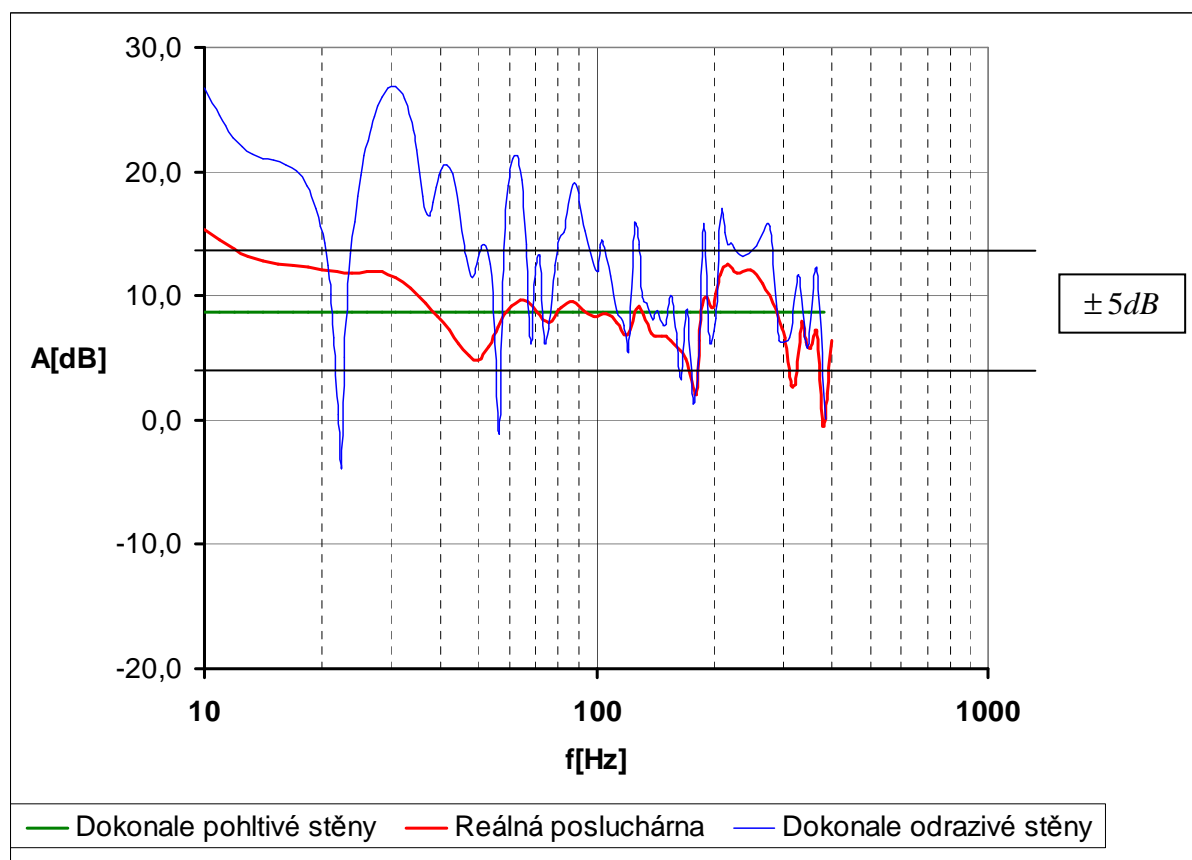
Obr. 3.4 Zadání parametrů v programu **Room Mode Calculator** [16]

Z tabulky absorpčních koeficientů v příloze č.1 byly odečteny následující absorpční koeficienty jednotlivých ploch. Pro obvodové zdi se štěrbinovými rezonátory byla zvolena položka Rezonanční panel s absorpčním koeficientem 0,62; pro strop z akustického materiálu FEAL VAR byl odečten absorpční koeficient 0,70. Konečně pro podlahu (na Obr. 3.4 označena W6) pokrytou kobercem JEKOR byl odečten absorpční koeficient 0,08. Dosazením do vzorce (3.5) byly určeny reflexní koeficienty.

Příklad výpočtu reflexního koeficientu pro podlahu:

$$r = \sqrt{1 - \alpha} = \sqrt{1 - 0,08} = 0,96 \quad (3.6)$$

Následuje provedení samotné simulace a vyhodnocení výsledků.



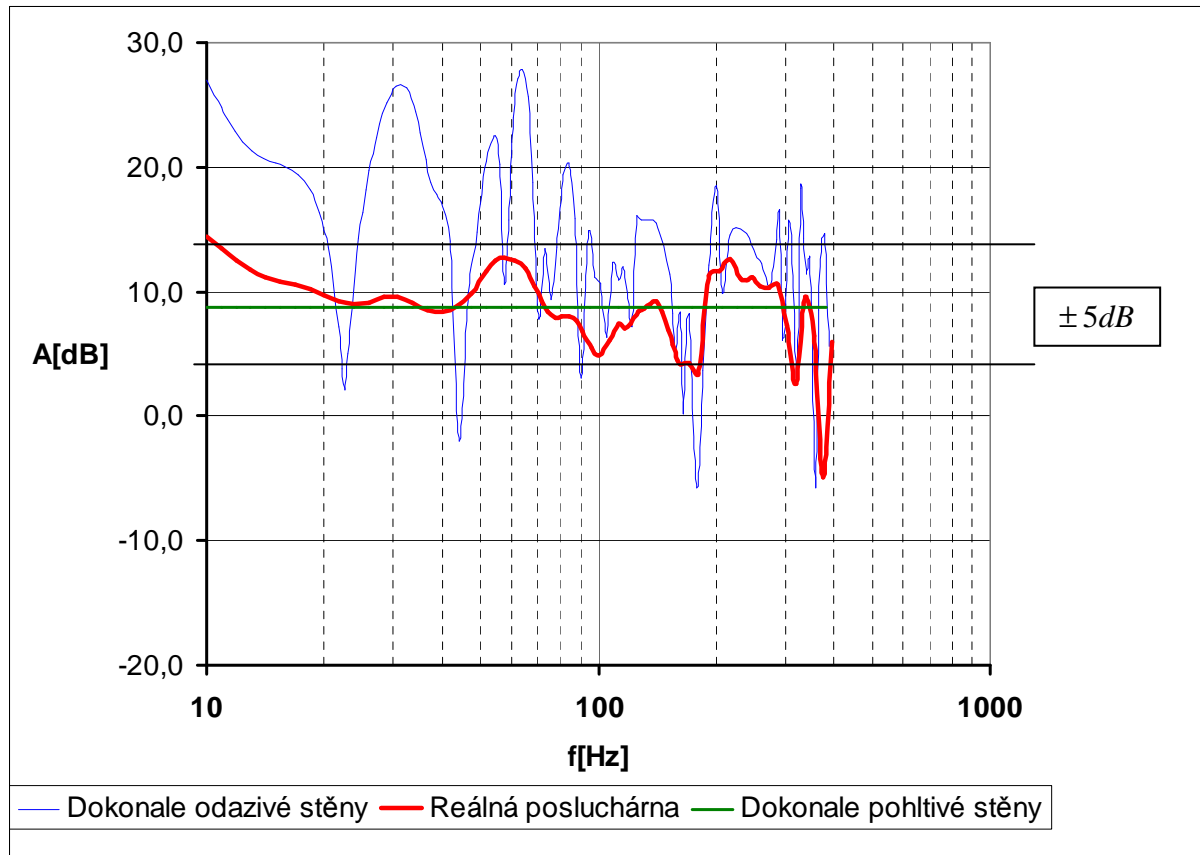
Obr. 3.5 Frekvenční charakteristika v současném poslechovém místě (roh u okna), vyznačena tolerance $\pm 5\text{dB}$

Z grafu na Obr. 3.5 je patrné, že v případě dokonale pohltivých stěn nedochází ke vzniku stojatého vlnění, frekvenční charakteristika je tedy vyrovnaná. Jedná se tedy o ideální případ, ke které je žádoucí se přiblížit. Nejhorší případ nastává v případě dokonale odrazivých stěn, kde můžeme vidět výrazné vrcholy na frekvencích 30, 42, 60 a 87 Hz. Také jsou patrné poklesy na frekvencích 22,5 Hz a 58 Hz.

Nejdůležitější je červená křivka zobrazující frekvenční charakteristiku místnosti blízkí se svými parametry naší reálné posluchárně. Ve frekvenčním pásmu (20 Hz – 400) Hz a je možné zaznamenat pouze tři poklesy na frekvencích 108 Hz, 182 Hz a 392 Hz, které nesplňují

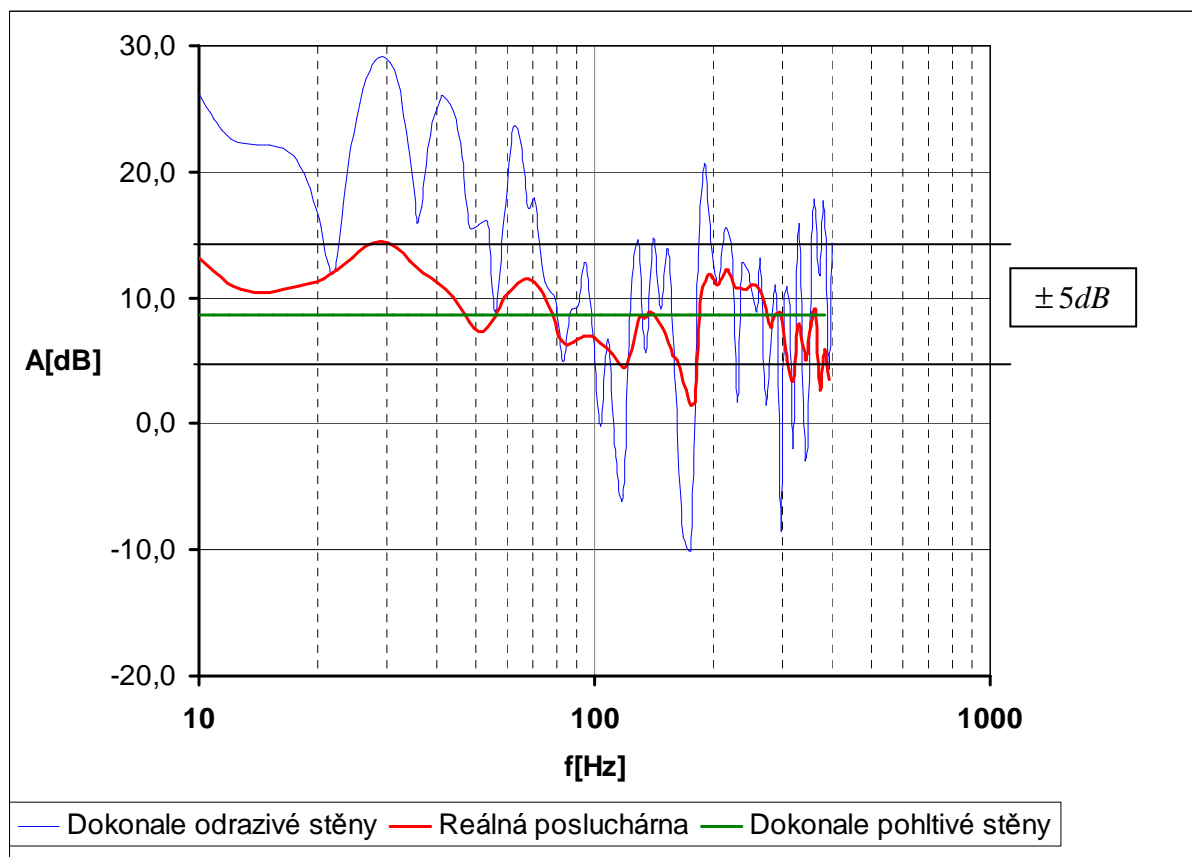
toleranci odchylky od ideální charakteristiky ± 5 dB (viz [1]). Lze tedy říci, že tato charakteristika je v rozmezí (20 – 100) Hz v toleranci, která byla stanovena.

Dále je na základě simulací diskutován vliv umístění poslechového místa na přenosovou frekvenční charakteristiku.



Obr. 3.6 Frekvenční charakteristika - reproduktory a poslechové místo uprostřed stěny W4, vyznačena tolerance ± 5 dB

Graf na Obr. 3.6 ukazuje frekvenční charakteristiku v případě umístění reproduktorů a poslechového místa ve středu stěny W4 (viz Obr. 3.4). Vzhledem k přibližné symetrii místnosti v tomto uspořádání by dle [1] mělo být toto uspořádání optimální a mohl by být omezen vliv okna, jako odrazivé plochy. Z grafu je patrné, že oproti předchozímu grafu zmizelo zesílení frekvencí v pásmu (20 – 35) Hz, ovšem přibyl vrchol se středem 58 Hz a propad na frekvenci 100 Hz. Tyto odchylky od ideální charakteristiky překračují toleranci maximálně o 1 dB. V tomto případě tedy není možné potvrdit vyrovnaní frekvenční charakteristiky vlivem posunu poslechového místa.



Obr. 3.7 Frekvenční charakteristika - poslechové místo v opačném rohu, vyznačena tolerance $\pm 5\text{dB}$

Pro úplnost je simulováno umístění reproduktorů a poslechového místa v rohu místnosti u stěny W4, vzdáleném od okna. Z výsledného grafu na Obr. 3.7 je patrné, že frekvenční charakteristika má vrchol překračující naši toleranci v pásmu frekvencí (28 – 32) Hz. Touto změnou také dle simulací nelze dosáhnout vylepšení frekvenční charakteristiky.

Dále byly simulovány další možné situace umístění posluchače vzhledem ke zdroji zvuku, a vzhledem k místnosti. Jejich výsledky již nejsou zmíněny, jelikož změny nepřinesly téměř žádný efekt, nebo je takové umístění v místnosti nemožné (poslechové místo uprostřed místnosti, posluchač vzdálený od zdroje atd.).

Přestože výsledky simulace neukazují jistý efekt akustiky místnosti na reprodukováný signál, je třeba pamatovat, že v tomto modelu bylo zanedbáno množství menších ploch (výklenky, vybavení místnosti atd.), od kterých se vlnění může odrážet. Stěny byly považovány za homogenní plochy s konstantním reflexním koeficientem, a tím celá situace značně zjednodušena. Abychom bylo dosaženo skutečně věrné simulace, musel by být použit některý komerční simulační program (např. EASE - Electronically Auralized Room Simulation), který umožňuje vytvořit přesný model místností včetně zařízení.

Nasimulovaná data je však možné prakticky ověřit měřením frekvenční charakteristiky reálného zdroje zvuku v poslechovém místě. V ideálním případě by měly hodnoty naměřené i simulované frekvenční charakteristiky ležet v rozmezí $\pm 5\text{ dB}$ od ideální konstantní frekvenční charakteristiky.

4 Stanovení vlivu akustických vlastností poslechové místnosti na reprodukci nahrávek měřením

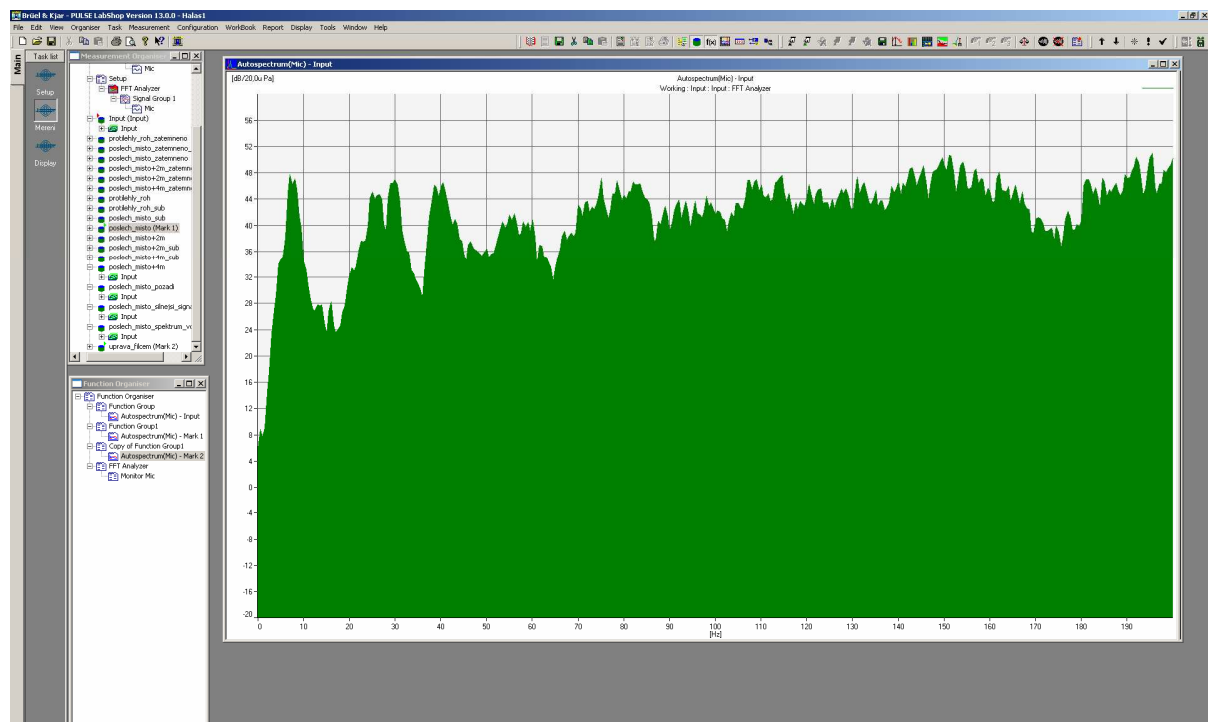
V této kapitole je popsáno měření akustických vlastností poslechové místnosti a následně jsou výsledky porovnávány s teoretickými simulacemi.

4.1 Popis měřicího vybavení a postup měření

K měření zvukového pole v poslechové místnosti bylo třeba toto pole nejprve vybudit. K tomu byl použit reprodukční řetězec v analogovém propojení viz kapitola 2. Na reproduktorech nebyly nastaveny žádné korekce.

Pro vybudění zvukového pole byl použit bílý šum nahraný na testovacím CD [17]. Tento šum byl přehráván přes reproduktory a vytvořil v místnosti zvukové pole, jež bylo zkoumáno. Vzhledem ke konstantnímu spektru šumu pak bylo možné snímat přenosovou charakteristiku prostředí v daném poslechovém místě, a z této charakteristiky určit frekvence, na kterých vzniká stojaté vlnění (poklesy či vrcholy frekvenční charakteristiky).

Ke snímání zvukového pole byl použit kondenzátorový mikrofon Rion UC-53A. Tento mikrofon byl připojen k jednotce sběru dat (běžně označovaná jako “frontend“) **Bruel&Kjaer 7537A** [III]. Jednotka sběru dat umožňuje propojení až šesti kanálů k běžnému PC prostřednictvím síťového kabelu a za použití programu Pulse Labshop tento počítač využít jako signálový analyzátor.



Obr. 4.1 Prostředí programu Pulse labshop (zobrazen příklad nevyhlazeného spektra)

Na úplném začátku měření bylo třeba aktivovat příslušný kanál frontendu a správně zkalibrovat mikrofon. Poté byl nastaven v programu Pulse kanál, na kterém byl mikrofon připojen, jako aktivní. Dále byl vytvořen panel, který provádí rychlou Fourierovu

transformaci (FFT) a zobrazuje na displeji spektrum vstupního signálu. Rozsah frekvenční analýzy byl určen v rozsahu (0 – 200) Hz. Toto rozpětí dostatečně pokrývá nízké frekvence módů prostoru a odpovídá rozpětí simulovaných charakteristik v kapitole 3. Počet čar byl nastaven na 400 (vzorky byly tedy od sebe vzdáleny o 0,5 Hz). Nakonec bylo zadáno lineární průměrování s počtem průměrů 30. To znamená, že program po 30 úsecích N vzorků (odpovídá časovému úseku 21,33 s) vypočítá průměrné spektrum těchto úseků.

Po počátečním nastavení byl mikrofon umístěn na stativ a postupně měněno jeho umístění. Jednotlivé polohy jsou na obrázku Obr. 4.2 označeny červenými čísly 1 až 4.

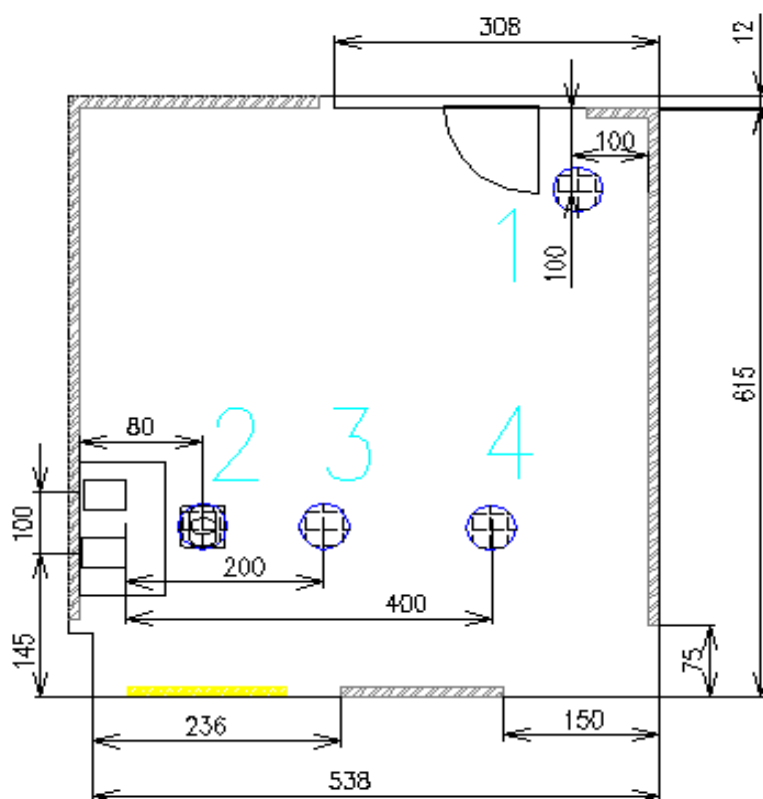
Poloha 1 byla zvolena tak, aby byl měřicí mikrofon umístěn mimo blízkého zvukového pole reproduktorů. Pokud v místnosti vznikají nějaké módy, měly by se v tomto postavení nejvíce projevit.

Poloha 2 zobrazuje současné umístění poslechového místa v ose reproduktorů ve vzdálenosti 0,8 m od reproduktorů. Tato konfigurace odpovídá dle výrobce [10] ideálnímu uspořádání poslechového místa – oba reproduktory a hlava posluchače (resp. měřicí mikrofon) tvoří rovnostranný trojúhelník. Frekvenční charakteristika by tedy neměla být závislá na akustických vlastnostech místnosti a měla by se blížit frekvenční charakteristice reproduktorů udávané výrobcem.

Poloha 3 je situována v ose reproduktorů, na hranici blízkého zvukového pole (ve vzdálenosti 2 m od reproduktorů). Na přenosové frekvenční charakteristice již může být patrný vliv akustiky poslechové místnosti.

Poloha 4 leží také v ose reproduktorů ve vzdálenosti 4 m mimo jejich blízké zvukové pole. Projevy akustiky prostoru by měly být znatelnější, než u polohy 3.

Jelikož bylo požadováno kromě zjištění módů místnosti i posouzení vlivu okna jako vysoce odrazivé plochy na akustiku místnosti, měření byla prováděna v každé poloze pro dvě varianty. První variantou byl současný stav, druhá varianta zahrnovala zakrytí okna filcovým materiálem, který se používá pro akustické tlumení při konstrukci automobilů.



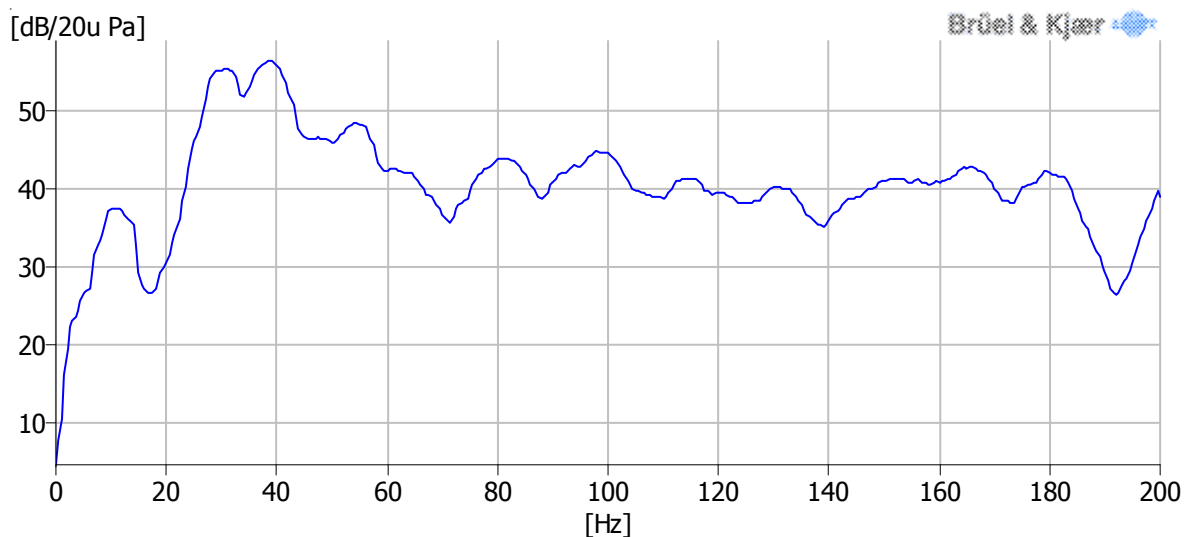
Obr. 4.2 Umístění měřicího zařízení v poslechové místnosti

4.2 Interpretace naměřených dat

Jako výstup programu Pulse byla nastavena frekvenční charakteristika. Jelikož byl frekvenční krok poměrně malý (0,5 Hz), byla by výsledná charakteristika zvlněná, a tedy obtížně vyhodnotitelná. Byla tedy použita funkce vyhlazování řádu 5, která aproximuje vypočítané body polynomem 5. stupně.

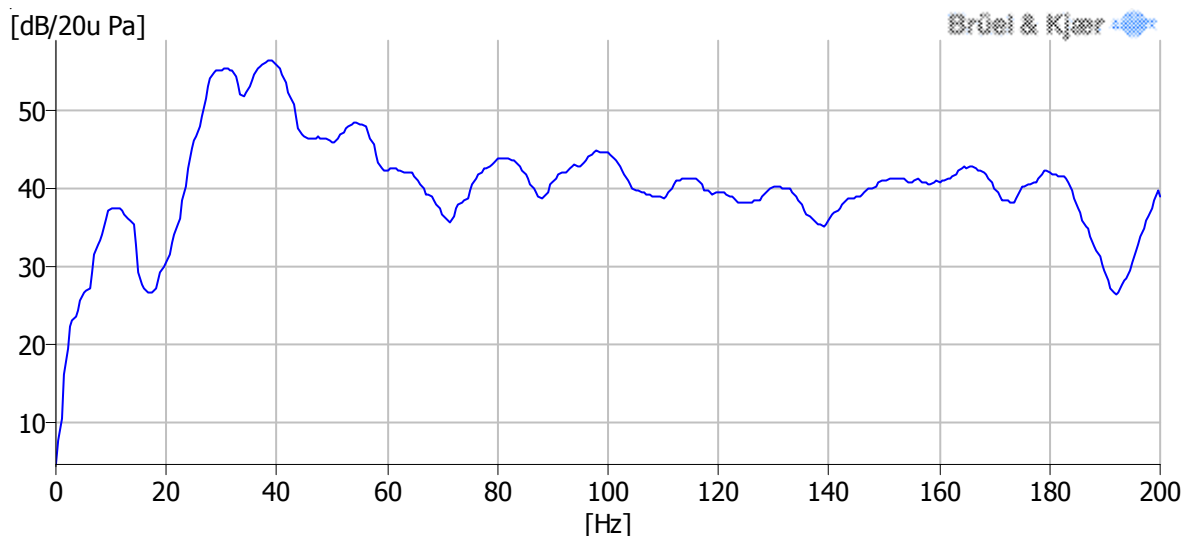
Výstupy programu Pulse lze včetně zdrojových dat exportovat do programu Microsoft Excel. Takto je možné prohlížet naměřené charakteristiky s využitím interaktivních kurzorů a zobrazení aktuálních hodnot na jakémkoliv počítači bez nutnosti instalace vlastního programu Pulse Labshop. Před započítím prohlížení je však třeba nainstalovat program PULSE Live Report, který je umístěný na příloženém CD, a v MS Excel povolit používání makra. Poté je již možné dvojitým klikem na charakteristiku přejít do módu interaktivního prohlížení. Všechny grafy získané v tomto měření jsou uloženy v souboru pulse_mereni.xls.

Nejprve je vyhodnoceno měření v první poloze, označené číslem 1, v rohu místnosti. Opět je uvažována velikost tolerančního pole ± 5 dB. V grafu na obrázku Obr. 4.3 lze vidět významné vrcholy v pásmu (25 – 57) Hz, a také propad na frekvenci 192 Hz. Zvláště vrcholy na velmi nízkých frekvencích mohou způsobovat dunivé zvuky při reprodukci nahrávek.



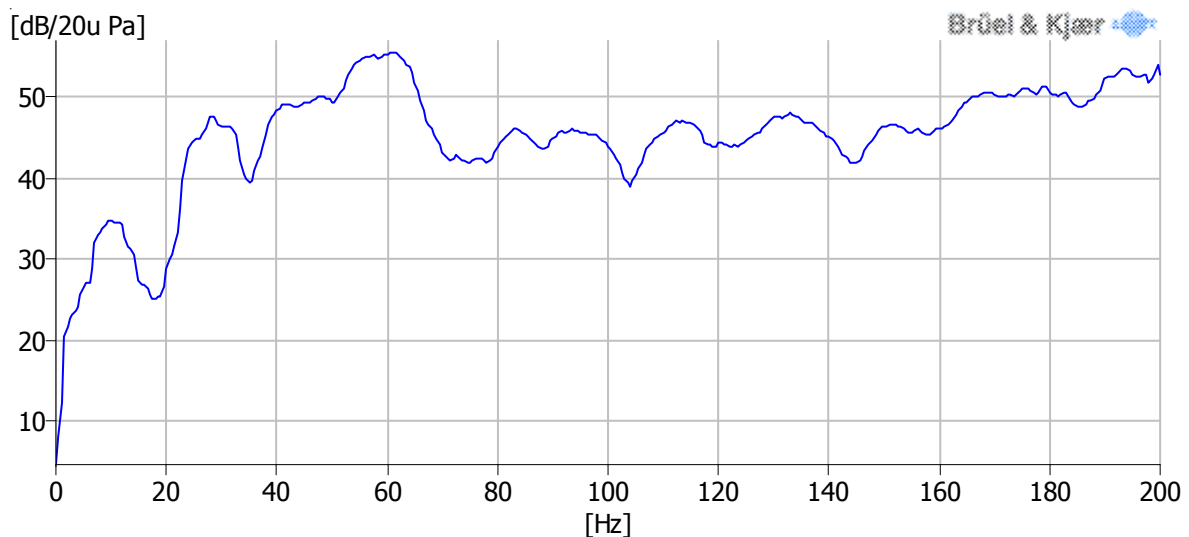
Obr. 4.3 Frekvenční charakteristika v bodě 1, SPL(f)

Na dalším grafu na obrázku Obr. 4.4 je zobrazena stejná situace jako předchozí, avšak okno je zakryto. Je patrné, že grafy jsou totožné, a v tomto případě rozkmity frekvenční charakteristiky nejsou způsobeny oknem jako vysoce odrazivou plochou. Vliv okna na akustiku místnosti je nepatrný i ve všech ostatních měřených polohách. Pro ostatní polohy již bude v této práci komentován pouze jeden graf s tím, že případ zakrytého okna je totožný.



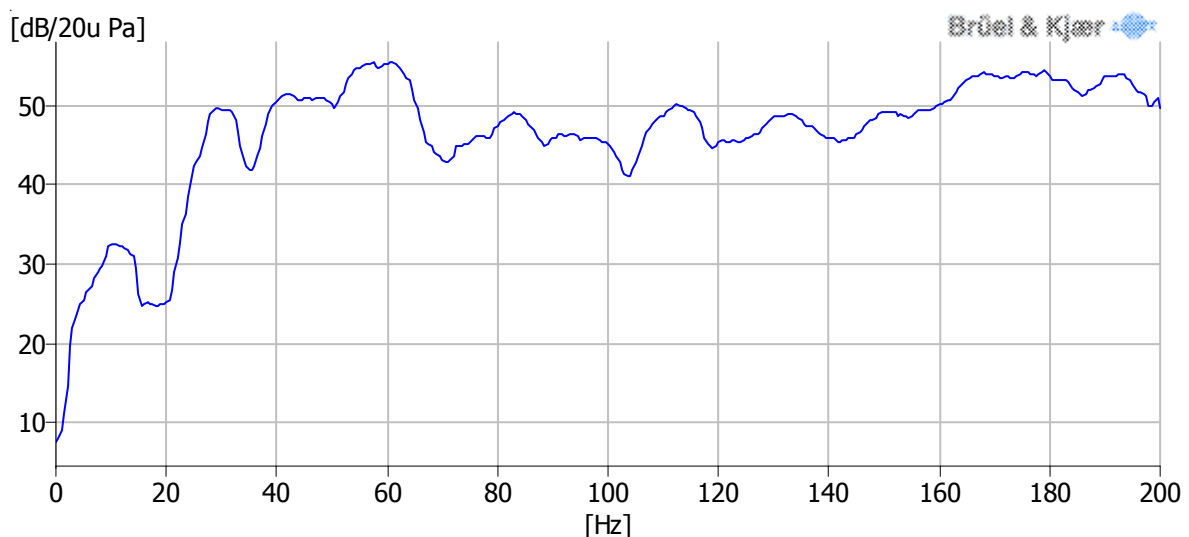
Obr. 4.4 Frekvenční charakteristika v bodě 1, zakryté okno, SPL(f)

Dále jsou hodnoceny výsledky měření v poloze označené číslem 2, tj. v současném poslechové místě. Mezi frekvencemi 40 Hz a 65 Hz je možné vidět zřetelný vrchol frekvenční charakteristiky překračující toleranční pásmo. Navíc i v pásmu frekvencí (160 – 200) Hz je viditelný vrchol. Tento vrchol odpovídá vrcholu z grafu na obrázku Obr. 4.5. V blízkém poli reproduktorů tedy také není frekvenční charakteristika vyrovnaná.



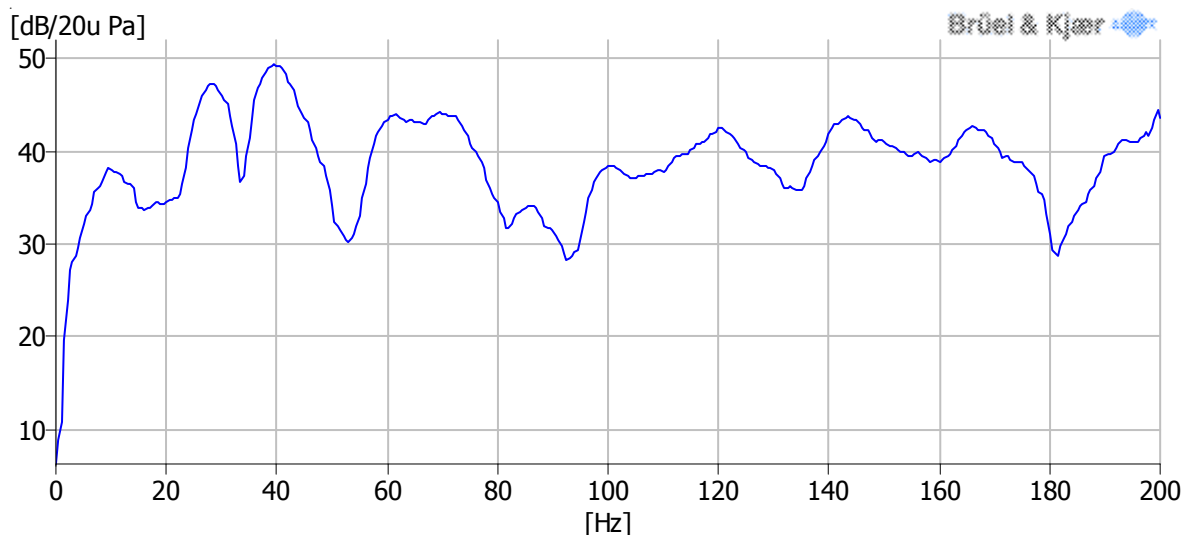
Obr. 4.5 Frekvenční charakteristika v současném poslechovém místě (poloha 2), SPL(f)

Přikročíme k interpretaci naměřených výsledků v poloze 3. Z grafu na Obr. 4.6 je opět patrný vrchol v rozmezí frekvencí 40 – 65 Hz a zesílení kmitočtů od 160 Hz. Jelikož je frekvenční charakteristika téměř totožná s tou v poloze 2, stále se jedná o oblast blízkého pole a frekvenční charakteristika je dána převážně vlastnostmi reproduktorů.



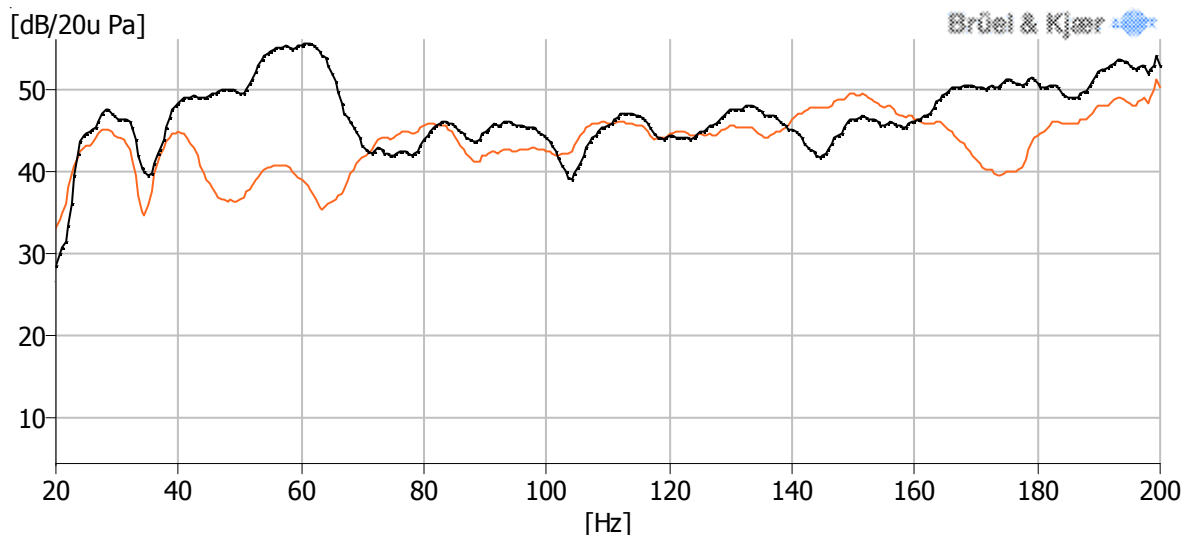
Obr. 4.6 Frekvenční charakteristika v poloze 3, SPL(f)

Zbývá vyhodnotit výsledky v poloze číslo 4 (Obr. 4.7). Frekvenční charakteristika obsahuje množství vrcholů (na frekvencích 28, 40, 60, 75, 145, 165, 200 Hz) a poklesů (na frekvencích 52, 81, 92, 181 Hz). Tato poloha se nachází mimo blízké pole reproduktorů a začíná převažovat vliv akustických vlastností poslechové místnosti. Takováto rozkolísaná charakteristika se velmi liší od ideální a můžeme z ní vyčíst, že je místnost z akustického hlediska nevhodně upravena. V místnosti vzniká stojaté vlnění, které degraduje poslech.



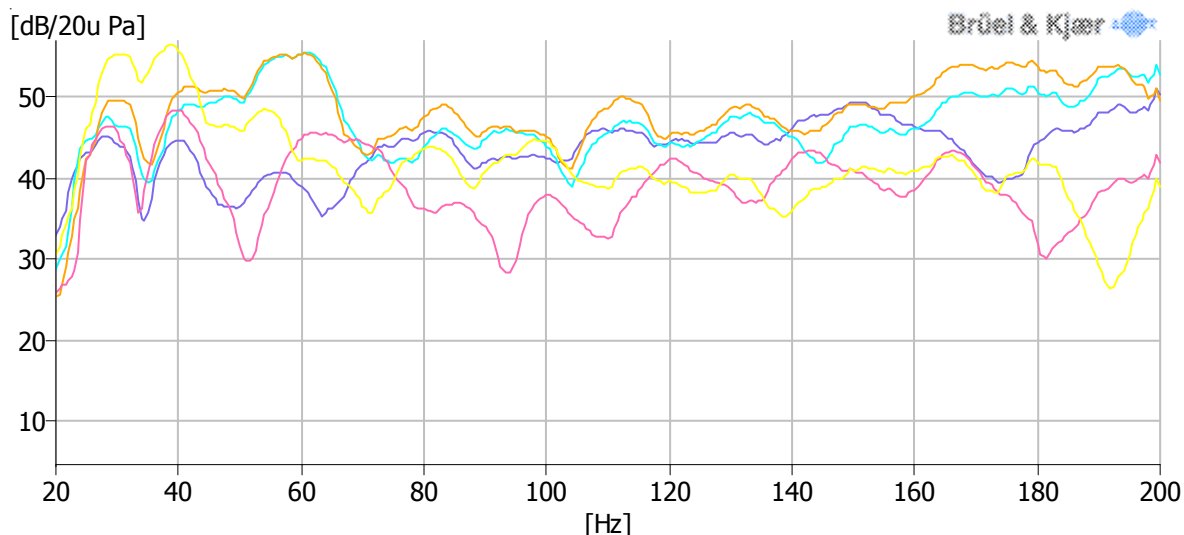
Obr. 4.7 Frekvenční charakteristika v poloze 4, $SPL(f)$

Během měření se projevil aspekt nevhodného umístění reproduktorů na stole v blízkosti zdi. V ideálním případě mají být umístěny na podstavcích tak, aby mohly vyzařovat energii do všech směrů. V současném uspořádání je však vlnění směřující dolů odraženo deskou stolu. To může způsobit vybudování vlastních kmitů desky. Kmity mohou způsobovat některé vrcholy na přenosové frekvenční charakteristice v poslechovém místě. Pro ověření této hypotézy byly reproduktory jednak posunuty až k přední hraně stolu, a také podloženy tlumícím materiálem. Podložení mělo zamezit přenosu mechanických kmitů z ozvučnice reproduktoru na desku stolu. Po vykonání těchto úprav byla opět změřena frekvenční charakteristika v poslechovém místě, tu můžeme vidět na Obr. 4.8. Úpravami bylo docíleno potlačení zesílení ve frekvenčním pásmu (20-50) Hz. Frekvenční charakteristika se vyrovnala a při subjektivním poslechu mírně ubylo zmiňované dunivosti.



Obr. 4.8 Porovnání frekvenční charakteristiky v poloze 2 před provedením úprav (černá křivka) a po jejich provedení (červená křivka), $SPL(f)$

Na obrázku Obr. 4.9 jsou porovnány charakteristiky získané ve všech měřených polohách.

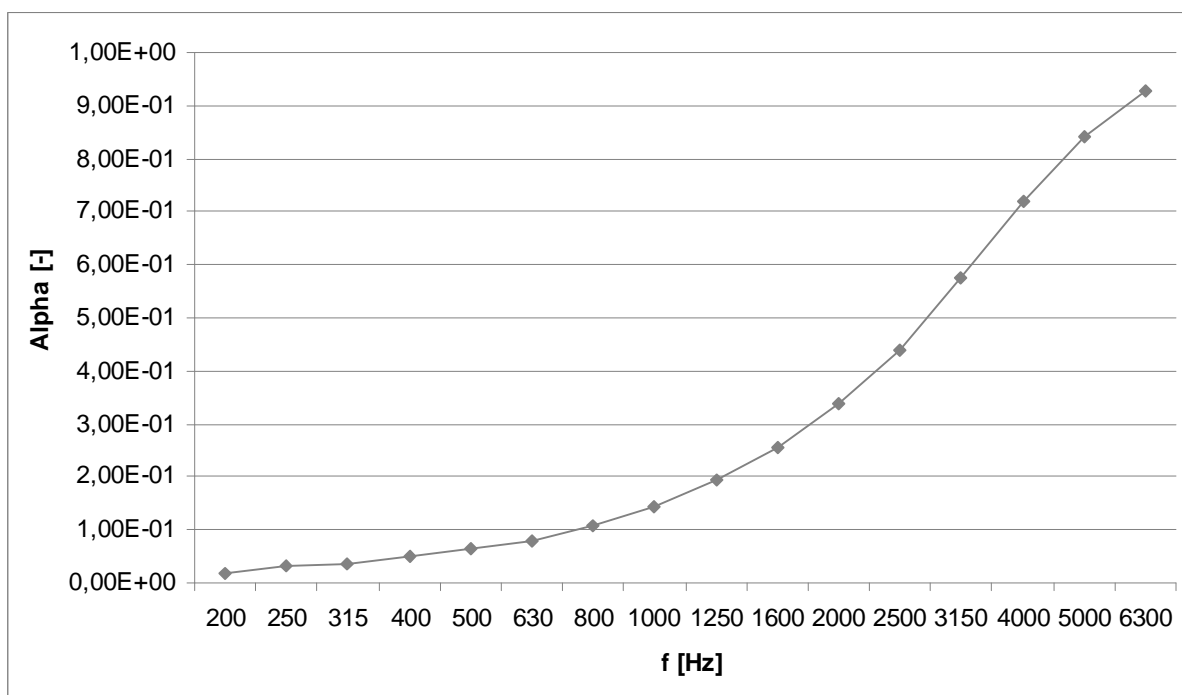


Obr. 4.9 Porovnání frekvenčních charakteristik ve všech měřených polohách (žlutá - poloha 1, světle modrá – poloha 2, oranžová – poloha 3, fialová – poloha 4, tmavě modrá – poloha 2 po úpravách), $SPL(f)$

Závěr výše popsaných měření bylo třeba posoudit měřením přenosu akustického vlnění z reproduktorů do desky stolu.

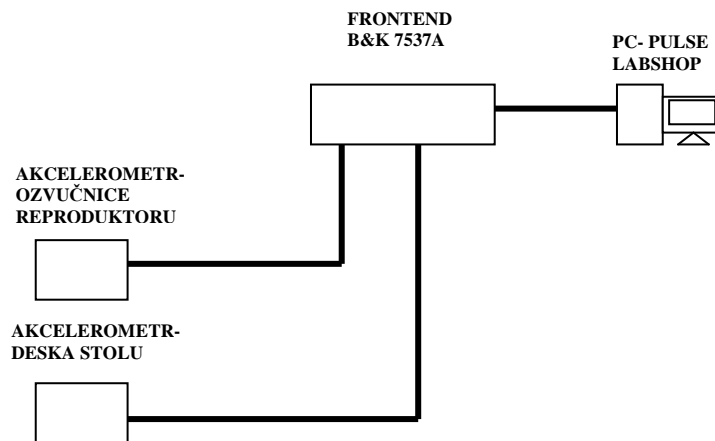
4.3 Měření vlivu desky stolu na reprodukci

Nejprve je nutné diskutovat vliv podložení reproduktorů tlumicím materiálem na reprodukci nahrávek. Ze závislosti absorpčního koeficientu na frekvenci (Obr. 4.10, získaný z databáze hlukové zkušebny společnosti Škoda Auto) je patrné, že tento materiál na nízkých frekvencích do 1 kHz téměř netlumí. Na vylepšení frekvenční charakteristiky měla hlavní podíl změna umístění reproduktorů a tím i změna rozložení zvukového pole.

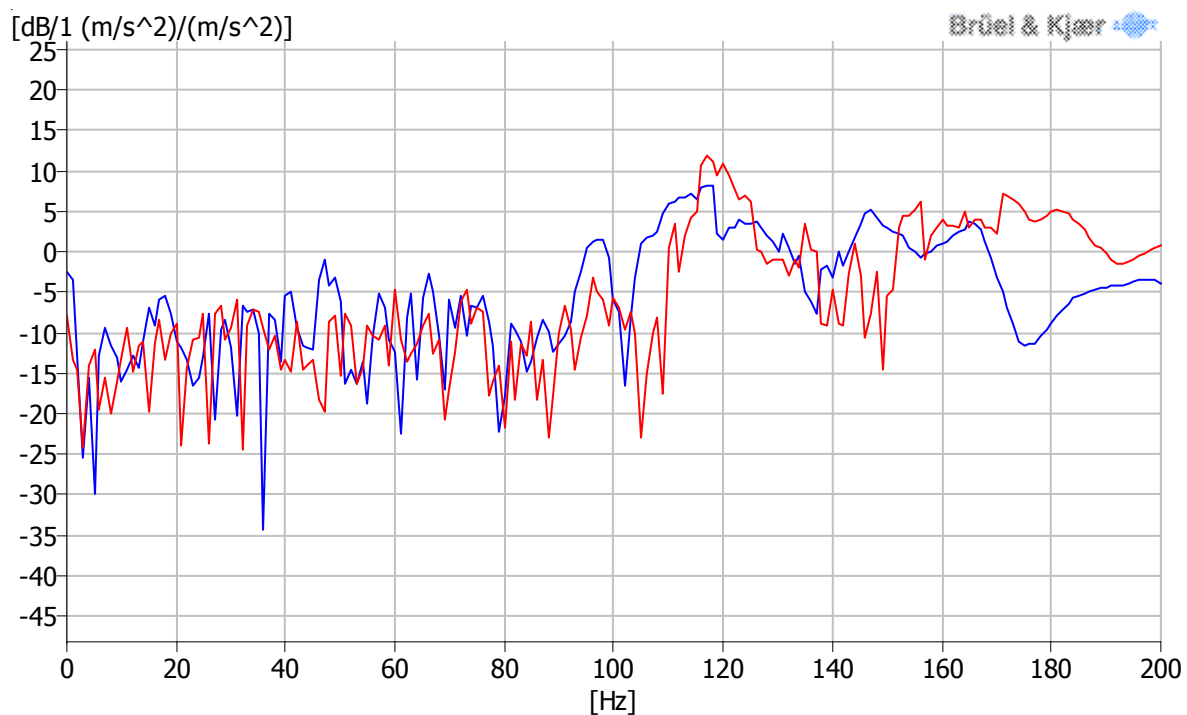


Obr. 4.10 Závislost absorpčního koeficientu tlumicího materiálu na frekvenci

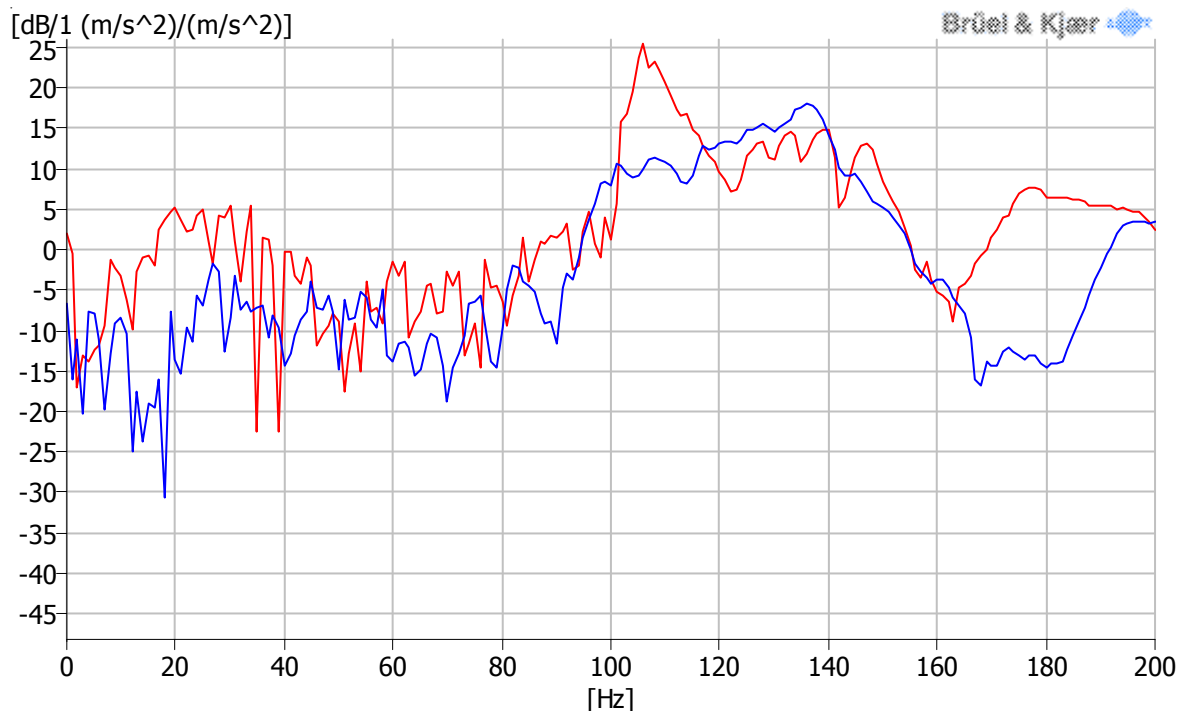
Tyto závěry byly ověřeny měřením s měřicí aparaturou zapojenou podle schématu na obrázku Obr. 4.11. Akcelerometr [VI] označený Acc_repro byl připevněn na ozvučnici reproduktoru a druhý akcelerometr označený Acc_stul [VII] na desku stolu. Aby byly vyloučeny vlivy umístění akcelerometrů na měření, měření bylo provedeno v několika kombinacích s akcelerometry a reproduktory v následujících polohách: Acc_repro (střed horní strany ozvučnice, pravý přední roh horní strany ozvučnice), Acc_stul (10 cm od reproduktoru v jeho ose, střed desky stolu, 20 cm od přední hrany), reproduktory (původní poloha, posunuty k přední hraně stolu).



Obr. 4.11 Schéma měřicí aparatury



Obr 4.12 Frekvenční charakteristika modulu přenosu reproduktor-deska stolu v současné umístění (modrá – s podložením, červená – bez podložení), $A(f)$



Obr 4.13 Frekvenční charakteristika přenosu reproduktor-deska stolu (**modrá** – s podložením, **červená** – bez podložení), $A(f)$

Po kalibraci akcelerometrů bylo provedeno samotné měření. Z CD přehrávače byl reprodukován bílý šum. Analýza byla provedena v programu Pulse Labshop-rychlá Fourierova transformace (FFT). Jelikož se výsledky měření přenosu podložených a nepodložených reproduktorů v různých polohách jen velmi málo odlišují (viz Obr 4.12), zahrnuty jsou pouze nejdůležitější naměřené závislosti. Obrázek Obr. 4.12 zobrazuje závislost modulu přenosu na frekvenci pro umístění akcelerometrů Acc_repro uprostřed horní strany ozvučnice a Acc_stul uprostřed desky stolu, s reproduktory v původní pozici. Z tohoto grafu je patrné, že na některých frekvencích je přenos naopak horší a nedá se hovořit o podstatném zlepšení díky podložení reproduktorů tlumícím materiálem.

Dále je na obrázku Obr 4.13 zachycena frekvenční závislost modulu přenosu pro případ umístění akcelerometrů Acc_repro doprostřed ozvučnice reproduktoru, Acc_stul doprostřed desky stolu a reproduktory posunutými k hraně stolu. Výsledky měření v dalších polohách jsou umístěny na příloženém CD v souboru Prenos_repro_stul.

Po vyhodnocení všech měření lze říci, že vliv podložení reproduktoru tlumícím materiálem je zanedbatelný. V některých případech byl dokonce přenos horší. Pokud budeme hodnotit vliv posunutí reproduktorů k přední hraně stolu, lze říci, že v tomto uspořádání se přenosová frekvenční charakteristika znatelně vylepší. Nejvíce patrné je potlačení vrcholu na frekvenci 108 Hz, který pravděpodobně odpovídá frekvenci vlastních kmitů desky. Tímto měřením byl vliv desky stolu na reprodukci potvrzen. Naměřené vyrovnání frekvenční charakteristiky zmíněné v kapitole 4.2 bylo tedy způsobeno převážně změnou rozložení zvukového pole v poslechovém místě a omezením přenosu mechanického vlnění do desky stolu.

4.4 Zhodnocení výsledků měření a porovnání se simulacemi

Z grafů komentovaných v předchozí kapitole je patrné, že akustické úpravy provedené v poslechové místnosti hlukové zkušebny Škoda Auto a.s. jsou nedostačující. V místnosti vznikají módy, které mohou být způsobeny jednak samotnou místností, ale také zařízením, které je zde umístěno (např. rozměrné stoly).

Dále také vyplynulo, že okno v blízkosti poslechového místa nemá podstatný vliv na rozložení zvukového pole. V souvislosti s tímto závěrem může být diskutována vhodnost zakrytí okna absorpčním materiálem při měření. Materiál, který byl k dispozici, tlumí na nízkých kmitočtech velmi málo. V budoucnu by bylo vhodné provést měření ještě jednou s vhodnou akustickou úpravou okna. Jak udává výrobce, v blízkém poli reproduktorů (tedy asi ve vzdálenosti do 2 m) frekvenční charakteristika závisí převážně na frekvenční charakteristice reproduktorů. I v blízkém poli jsou však patrné silné módy místnosti viz graf na Obr. 4.5.

Podložení reproduktorů tlumicím materiálem je vzhledem k jeho vlastnostem neúčinné. Posunutí reproduktorů k přední hraně se ukázalo účinným prostředkem k vyrovnání frekvenční charakteristiky. Bylo by tedy vhodné umístit reproduktory na zeď nebo na stojany tak, aby nedocházelo k odrazům od desky stolu.

Na závěr této kapitoly zbývá ještě porovnat naměřené a simulované výsledky. Jak bylo očekáváno, tyto grafy se značně liší. V sebedokonalejší simulaci totiž nemohou být zahrnuty všechny podmínky v době měření. Simulovaným prostorem byla idealizovaná místnost s homogenními stěnami, bez jakéhokoliv vybavení. Zdrojem zvuku byly reproduktory homogenně vyzařující energii do prostoru. Avšak v reálné poslechové místnosti se nacházelo množství technického vybavení a nábytku. Hlavním kritériem posouzení byly tedy výsledky získané měřením a simulované rozložení zvukového pole bylo využito spíše pro pochopení a ilustraci základů akustiky prostoru.

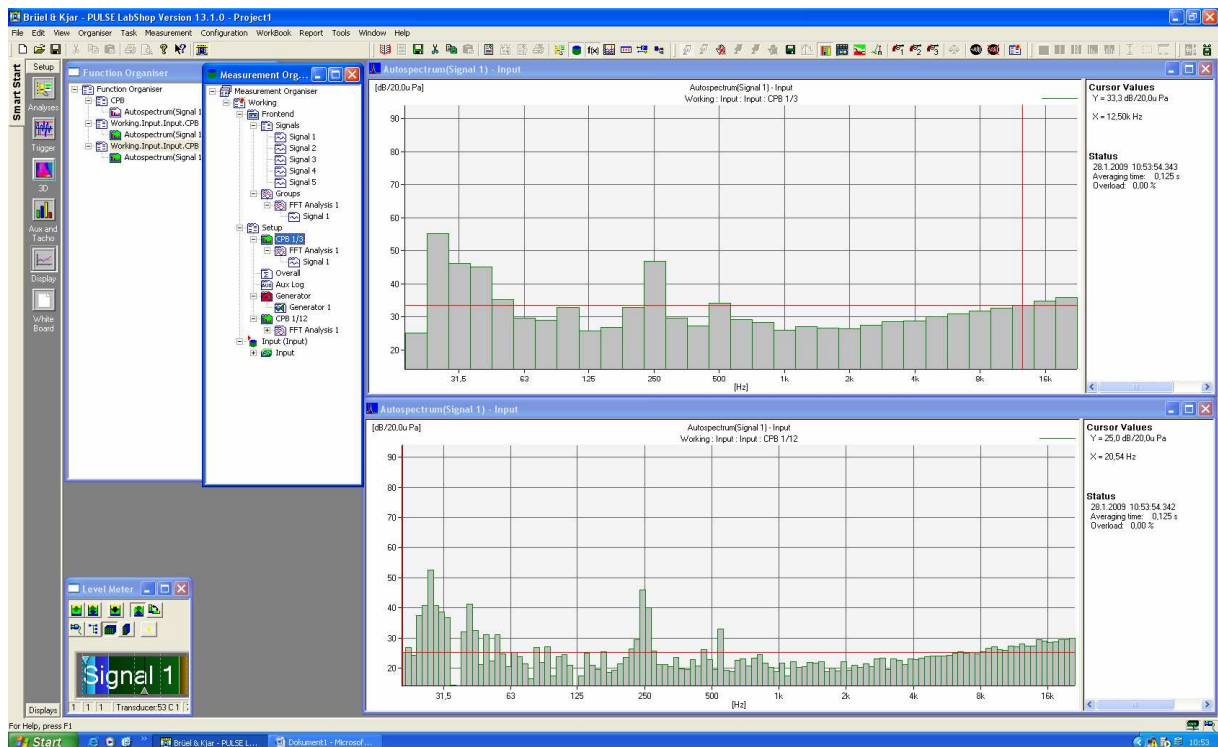
5 Nastavení reprodukčního řetězce

V předchozí kapitole byly měřeny přenosové frekvenční charakteristiky a prováděny úpravy z hlediska akustiky. Dalšího vylepšení frekvenční charakteristiky může být docíleno úpravou reprodukčního řetězce. Měření a sladění frekvenčních charakteristik a subwooferu je předmětem této kapitoly. Dále jsou porovnávány vlastnosti zvukových karet RME DIGI 96/8 a VX Pocket PRO.

5.1 Nastavení reproduktorů a subwooferu

Pro měření bylo použito stejné vybavení jako v předchozím případě a měřicí mikrofón [IV] byl umístěn v poloze 2. Nyní však byla snaha docílit vyrovnání přenosové frekvenční charakteristiky nastavením reproduktorů přepínači popsány v kapitole 2.1.3.

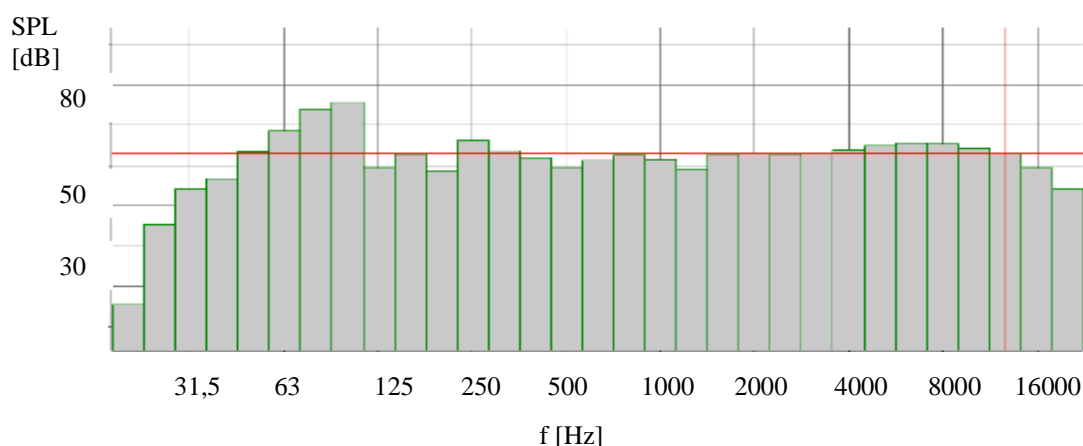
Jako výstup bylo v programu Pulse nastaveno spektrum s konstantní relativní šířkou pásma, CPB (Constant Percentage Bandwidth), třetinooktávové a dvanáctioktávové. Třetinooktávové spektrum se v průběhu měření ukázalo jako postačující. Jak už název CPB napovídá, zkoumaný frekvenční rozsah zobrazený v logaritmickém měřítku je rozdělen na rovnoměrná pásma, v nichž je zobrazena průměrná hladina akustického tlaku. Výsledky byly získány při buzení růžovým šumem. Jelikož se nejednalo o měření hodnot v daném okamžiku, ale o průběžné zobrazování změn frekvenční charakteristiky, v programu Pulse Labshop bylo nastaveno exponenciální průměrování, které toto umožňuje. Pokud by bylo použito nastavení průměrování s pevným oknem z předchozích měření, spektrum by bylo zobrazeno jednorázově jako průměr nastaveného počtu vzorků. Obrázky Obr. 5.1, Obr. 5.2, Obr. 5.3 ilustrují dílčí kroky procesu nastavování.



Obr. 5.1 Úroveň akustického tlaku pozadí v poloze 2, okno nastavení programu Pulse Labshop

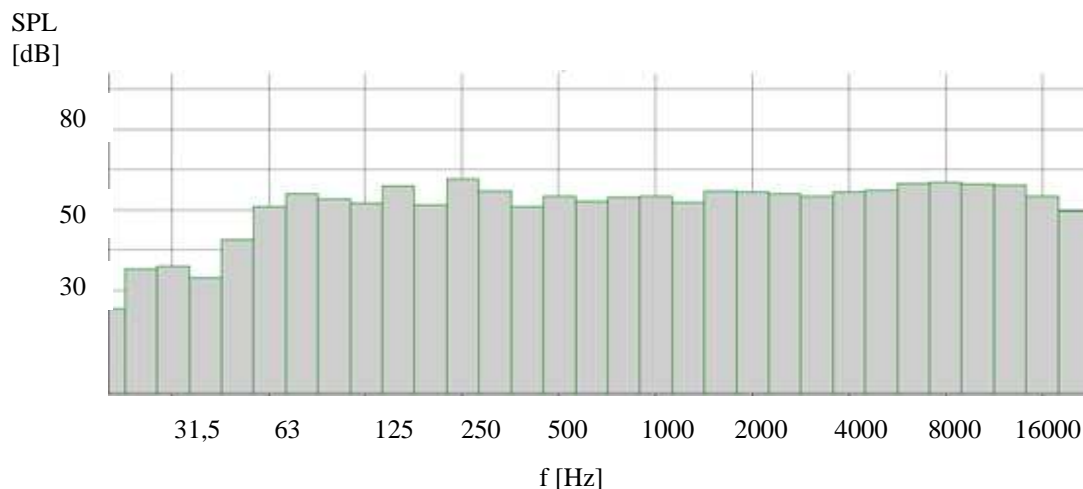
Z důvodu určení dostatečné úrovně reprodukováného šumu byla nejprve změřena úroveň akustického tlaku akustického pozadí místnosti (zvuky pronikající zvenčí, ventilátor PC, atd.) viz ilustrační obrázek Obr. 5.1. Maximální hladinu pozadí byla po opakovaném měření určena jako 50 dB. Aby nebyla výsledná charakteristika ovlivněna šumem pozadí bylo třeba reprodukovat signál alespoň o 10 dB silnější. Růžový šum byl tedy reprodukován na úrovni 60 dB. Zdrojem šumu byl jednak CD přehrávač (použito CD se zkušebními zvuky [17]) připojený do analogového reprodukcího řetězce viz Obr 2.5, a také zvuková karta v PC (použito totéž CD).

Nejprve byla měřena charakteristika reproduktorů a subwooferu v původním nastavení (všechny přepínače v poloze off). Tu můžeme vidět na obrázku Obr. 5.2. Od frekvence 125 Hz ji můžeme považovat za uspokojivou, avšak pod touto hranicí jsou jasně patrné zesílení nízkých kmitočtů.



Obr. 5.2 Frekvenční charakteristika v poloze 2, všechny přepínače vypnuty

Na úroveň tohoto pásma frekvencí má vliv převážně nastavení subwooferu. Přepínač 7 byl tedy přepnut do polohy *on* a trimmer útlumu nastaven na jeho maximální hodnotu. Výsledkem této úpravy bylo vyrovnaní frekvenční charakteristiky viz Obr. 5.3. Takováto charakteristika je již vyhovující. Pouze je ještě třeba vyzkoušet vliv přepínačů umístěných na reproduktorech. Podle předpokladu, vzhledem k naší toleranci ± 5 dB toto nastavení nemá podstatný vliv na frekvenční charakteristiku, jelikož je možné doladění pouze ± 2 dB.



Obr. 5.3 Frekvenční charakteristika v poloze 2, subwoofer zatlumen

Reprodukční řetězec v tomto uspořádání je tedy správně nastaven a připraven k použití. Zbývá ještě proměřit druhou zmiňovanou variantu, kdy je zdrojem zvuku zvuková karta RME DIGI 96/8 v PC.

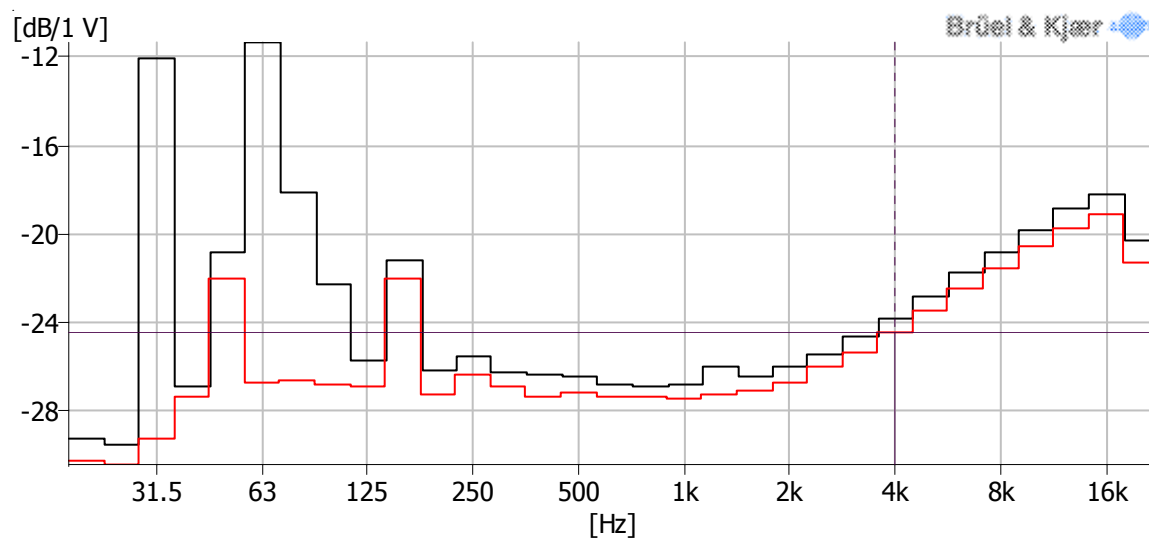
Již při prvním měření byl při subjektivním poslechu zaznamenán podstatný rozdíl v reprodukci růžového šumu. Přestože bylo použito totožné CD, jako v předchozím případě, k nahrávce se přidalo jasně slyšitelné dunění. Toto zesílení nízkých frekvencí bylo potvrzeno i ostatními pracovníky hlukové zkušebny. Jediným rozdílem oproti předchozímu měření bylo použití PC se zvukovou kartou jako zdroje šumu. To jasně ukazuje na problém se zvukovou kartou, charakter tohoto problému je určen v následující kapitole.

5.2 Porovnání zvukových karet RME DIGI 96/8 a VX Pocket PRO

Pro potvrzení vlivu zvukové karty na nekvalitní reprodukci nahrávky bylo provedeno porovnání spektra výstupního signálu (růžového šumu) současně používané RME DIGI 96/8 a další zvukové karty, která je kompatibilní s Automotive Sound Quality - VX Pocket Pro. Aby byl vyloučen vliv okolního prostředí na přenos, výstup zvukové karty byl propojen přímo se vstupem měřicí jednotky a analyzován programem Pulse Labshop.

Pro zobrazení spektra výstupního signálu byla využita třetinooktávová CPB transformace. Růžový šum má v případě CPB analýzy dle [2] spektrum konstantní. Měřenou hodnotou byla, na rozdíl od předchozích měření, napěťová úroveň výstupního signálu zvukové karty zobrazená v jednotkách dB/1V.

Pokud se v měřeném spektru růžového šumu reprodukováného přes některou zvukovou kartu vyskytne odchylka ± 5 dB od střední hodnoty, je již nevyhovující.



Obr. 5.4 Porovnání spektra výstupního signálu (použit růžový šum), červená-VX Pocket PRO, černá-RME DIGI 96/8, $U(f)$

Růžovým šum z CD [17] byl reprodukován pomocí obou zvukových karet. Na obrázku Obr. 5.4 můžeme vidět porovnání spektra snímaného signálu (červená-VX Pocket PRO, černá-RME DIGI). Zvláště patrný je rozdíl v rozmezí 20-200 Hz. Jestliže zvukovou kartu VX Pocket PRO lze označit vzhledem k nastavené toleranci za vyhovující, zvuková karta RME DIGI 96/8 naprosto nevyhovuje. Je rozhodně jednou z příčin nekvalitní reprodukce nahrávek pomocí programu SQ.

Závěrem lze tedy doporučit koupi nové zvukové karty, která nebude vykazovat takový šum a zkreslení jako RME DIGI 96/8. Pro program Automotive Sound Quality jsou dle [4] podporovány následující zvukové karty:

- Digigram VX pocket
- RME DIGI 96/8
- Lynx Studios LynxOne

5.3 Výběr zvukové karty a zesilovače

Výběr zvukové karty byl započat u firmy RME audio. Vzhledem k omezení vlivu rušení obvody zdroje PC a snadnému přístupu k I/O konektorům byla preferována karta externí. Z aktuální nabídky se jeví jako nejvhodnější rozhraní MULTIFACE II propojené buď s notebookem pomocí PCMCIA karty, popř. s PC přes PCI kartu. Toto propojení eliminuje výše zmiňované rušení. Je vybavena osmi vstupně/výstupními konektory. Tato zvuková karta je v podstatě externí a modernizovanou verzí RME DIGI 96/8, kterou chceme nahradit. Všechna tato fakta hovoří ve prospěch tohoto řešení, na druhou stranu negativní zkušenost s RME DIGI 96/8 radí porozhlédnout se v nabídce konkurenčních produktů.

Firma Digigram má ve své nabídce bohužel pouze interní zvukové karty. Žádná z těchto zvukových karet tedy není pro náš účel vhodná.

Posledním výrobcem podporovaným SQ je firma Lynx. Lynx také nenabízí externí kartu. Jedinou vhodnou variantou interní zvukové karty je Lynx 22(nástupce LynxOne).

Pro skupinový poslech přes sluchátka je dále nutné nahradit dva čtyřkanálové současně používané sluchátkové zesilovače, které přidávají k signálu slyšitelný šum. Nový sluchátkový zesilovač by měl být osmikanálový odstupem signálu od šumu alespoň 90 dB a harmonickým zkreslením menším než 0,01% pro 1 kHz, dle [14]. Jedním z mála zesilovačů dostupných na našem trhu a splňujících tyto požadavky je Behringer POWERPLAY PRO-8 HA8000. Dle výrobce [19] se jedná o vysoce výkonný zesilovač pro studiové užití. Obsahuje dva nezávislé stereofonní vstupy a osm nezávislých stereofonních výstupů. Odstup signálu od šumu i harmonické zkreslení udávané výrobcem splňují výše zmíněné požadavky. Vyrovnanost frekvenční charakteristiky ± 3 dB je zaručena v rozsahu 22 Hz – 22 kHz. Zesilovač je na českém trhu běžně dostupný a jeho cena se na českém trhu pohybuje kolem čtyř tisíc korun.

Pokud zůstaneme u firmy Behringer, nabízí se ještě použití dvou sřetězených čtyřkanálových zesilovačů. Konkrétním typem je Behringer POWERPLAY HA4700, který má stejné parametry, jako HA8000. Liší se však cenou HA4700 lze totiž pořídit v ceně okolo tří tisíc. Při potřebě dvou zesilovačů by se výsledná cena dostala na šest tisíc korun, což je o dvě třetiny víc, než pořizovací cena osmikanálového modelu. Jedinou výhodou HA 4700 zůstává možnost rozčlenění pracoviště na dvě závislé i nezávislé části.

Jedním z hlavních konkurentů Behringeru v oblasti profesionálních sluchátkových zesilovačů na českém trhu je firma PreSonus. Bohužel v současnosti v České Republice nenabízí osmikanálový sluchátkový zesilovač. Pokud bychom se spokojili s šestikanálovou verzí, je možné zvážít pořízení PreSonus HP 60 splňující zadané parametry s pořizovací cenou čtyři tisíce korun.

6 Měření pomocí umělé nahrávací hlavy, korekce

V této kapitole jsou objasněny základy snímání a nahrávání zvuku za použití umělé nahrávací hlavy. Dále jsou zmíněny všechny prvky ovlivňující výslednou přenosovou charakteristiku nahrávacího řetězce a možnosti korekcí. Nakonec je zdokumentován průběh kalibrace a výběru vhodné korekce v programu Automotive Sound Quality.

6.1 Měření pomocí umělé nahrávací hlavy

Jak již bylo zmíněno, jednotlivé části automobilu (motor a na něj navázané součásti, kola, tvar karoserie, ale i motorky stěračů, směrové ukazatele atd.) způsobují při svém provozu hluk. Pro zachování komfortu posádky i při delší jízdě je třeba tyto hluky co nejvíce eliminovat, popř. nastavit jejich optimální hlasitost a barvu zvuku. Vzhledem k reálným omezením (neideálnost absorpčních materiálů, finanční náročnost úprav) však nelze interiér odhlučnit stoprocentně. Je třeba jednotlivé hluky nahrát a analyzovat. Lidský sluch má totiž různou citlivost pro různé frekvence zvukového vlnění. V praxi se tedy hluky nahrají a pomocí specializovaného softwaru se vypočítá jejich frekvenční spektrum. Pokud se ve spektru nachází některé nežádoucí frekvenční složky (např. vysoké frekvence v případě skřípavých zvuků), musí se provést změna uložení nebo celé konstrukce měřeného bloku.

Lidský sluch je velmi složitý. Navíc je vnímání zvuku značně individuální, závisí na věku, momentálním psychickém stavu, a také na vrozených vlastnostech sluchu každého jedince. Vhodným kritériem pro posuzování zvuků je tzv. „jury evaluation“, tedy subjektivní posuzování skupinou k tomu účelu vybraných lidí. V ideálním případě by měli všichni posluchači označit zvuk za uspokojivý i po delším poslechu. Jelikož by bylo nemožné dostat celou skupinu do automobilu, a i za těchto podmínek by nebylo docíleno stejného vjemu všemi cestujícími (nacházeli by se v různých částech interiéru, a tedy v různých částech zvukového pole), využívá se pro snímání umělých nahrávacích hlav. Výhodou nahrávací hlavy oproti mikrofonu je zachování směrových vlastností. Posluchač je pak schopen určit původní umístění zdroje zvuku v měřeném prostoru.

6.2 Reprodukce nahrávek a jejich korekce

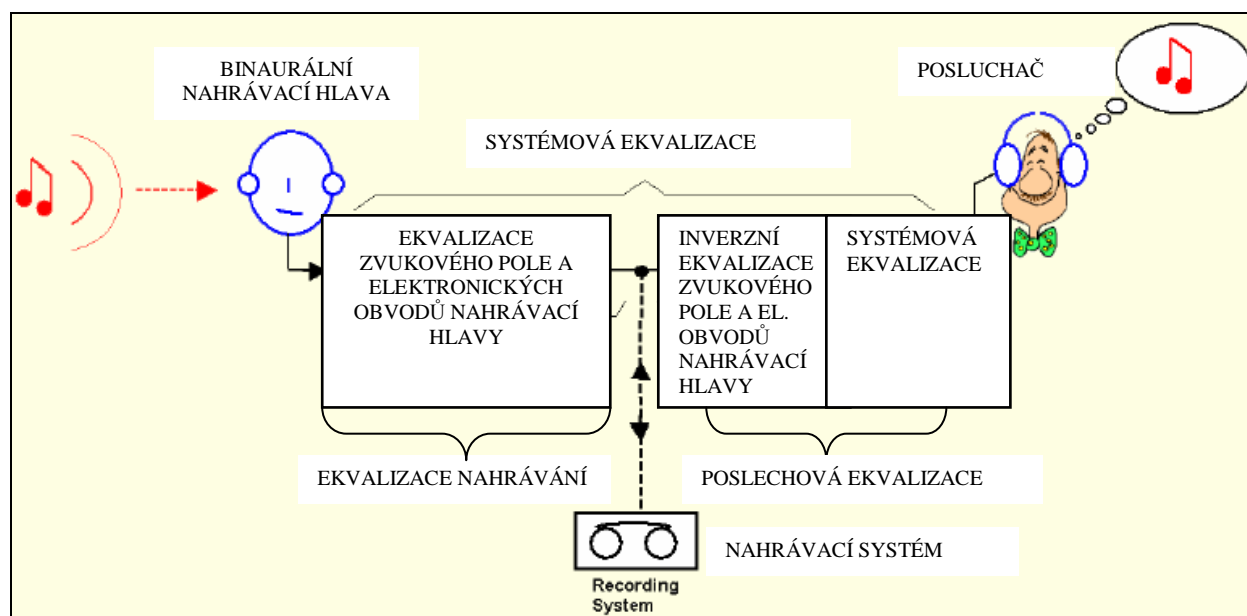
Každý předmět vložený do difúzního zvukového pole toto pole nějakým způsobem deformuje. Nejinak je tomu i u umělé nahrávací hlavy. Aby bylo možné porovnávat nahrávky pořízené různými systémy, používá se při nahrávání korekce na příslušné zvukové pole. Signál uložený na záznamovém médiu pak dle [7] odpovídá signálu samotného mikrofonu v daném zvukovém poli.

Firma Cortex používá pro svou umělou nahrávací hlavu dle [7] následující korekce pro difúzní pole:

- L0 – označuje lineární korekci, v podstatě se tedy jedná o nahrávání bez korekce na zvukové pole
- DC – korekce na difúzní pole podle firmy Cortex
- IH – korekce na difúzní pole firmy Head Acoustics, jedná se o doporučenou korekci kvůli kompatibilitě v rámci koncernu VW

Na obrázku Obr 6.1 převzatém z [7] můžeme vidět schéma korekčních bloků použitých při nahrávání a následné reprodukci zvuků. Dalším rozdílem mezi poslechem nahrávky a přímým poslechem je různá cesta signálu. V případě poslechu nahrávky se do cesty kromě lidského zvukovodu přidávají její elektronické obvody a sluchátka. Všechny tyto prvky musejí být při reprodukci kompenzovány blokem označeným na obrázku System Equalization. Pro reálný vjem je ještě třeba provést inverzní korekci ke korekci na zvukové pole (na obrázku označena Inverse Interface Equalization).

Pokud posloucháme nahrávku přes sluchátka přímo z nahrávací hlavy, na tomto výstupu je již automaticky aplikována inverzní korekce. Pokud však přehrajeme záznam z pásky DAT pomocí programu Sound Quality do počítače, je třeba aplikovat inverzní korekci, kterou získáme provedením binaurální kalibrace viz kapitola 6.3.

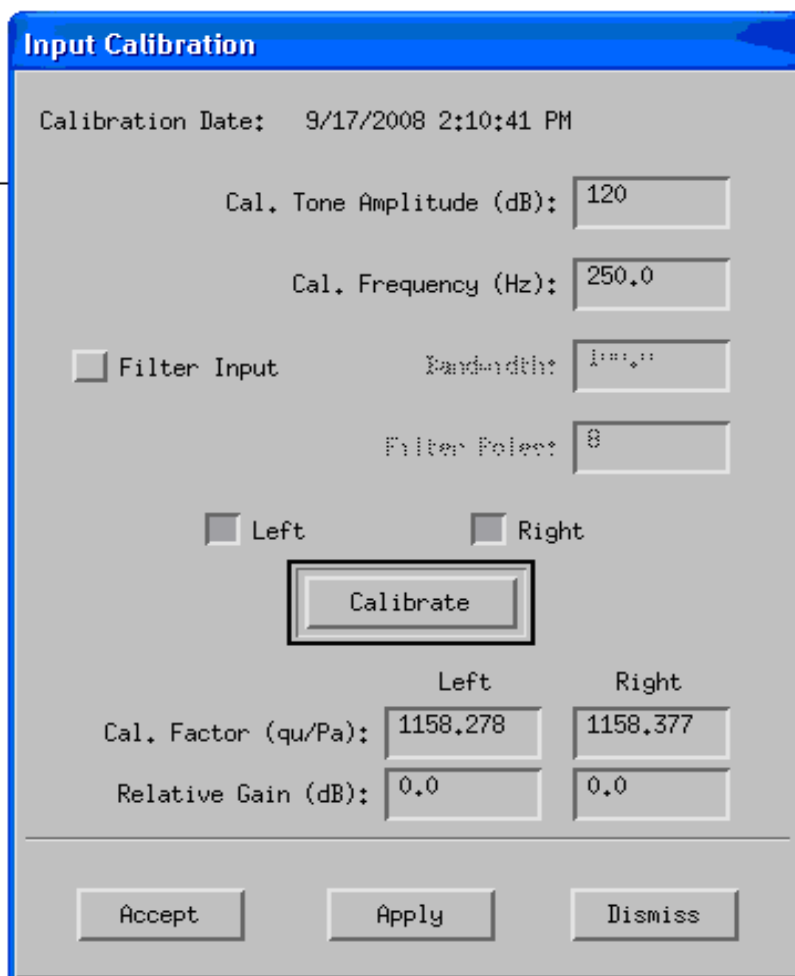


Obr. 6.1 Schéma korekcí nahrávacího a reprodukčního řetězce[4]

6.3 Kalibrace programu Automotive Sound Quality

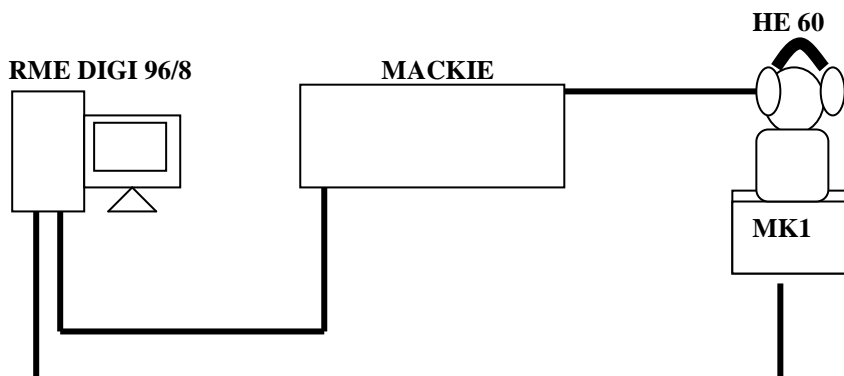
Správná kalibrace je hlavním předpokladem pro kvalitní reprodukci nahrávek. Jelikož sluchový vjem, frekvenční a časové maskování velmi závisí na úrovni signálu, je třeba zajistit reprodukci nahrávek s původní zvukovou hladinou.

Proto byla dle [4] provedena vstupní kalibrace následujícím způsobem. Nejprve byl digitální výstup nahrávací hlavy SPDIF připojen k digitálnímu vstupu zvukové karty RME DIGI. V programu Sound Quality byla zvolena položka Input Calibration. V nově otevřeném okně byla zadána úroveň kalibračního tónu 90 dB a frekvence 1 kHz. Dále byly zadány pomocí dálkového ovládání stejné parametry do nastavení generátoru vestavěného v nahrávací hlavě. Po stisknutí tlačítka „Kalibrovat“, vypočítá program pro dynamický rozsah 110 dB kalibrační faktory 1158 pro levý i pravý kanál. Obrázek Obr. 6.2 ilustruje nastavení generátoru pro vstupní kalibraci (v tomto případě byl generátor nastaven na harmonický signál o frekvenci 250 Hz a dynamickém rozsahu 120 dB).



Obr. 6.2 Nastavení vstupní kalibrace

Dále byla provedena kalibrace výstupní. Cílem bylo určit kalibrační faktor tak, aby byl signál na výstupu (v našem případě sluchátka) reprodukován se stejnou úrovní, jako u původní nahrávky. K tomuto účelu bylo vytvořeno tzv. „Closed loop“ propojení viz obrázek Obr. 6.3.



Obr. 6.3 Blokové schéma výstupní kalibrace

Po realizaci výše zmíněného propojení byla nastavena úroveň kalibračního signálu na 90 dB a frekvence 1 kHz. Při optimálním průběhu by program vypočítal kalibrační faktor, který by dále aplikoval při přehrávání. Avšak během prvních pokusů o provedení výstupní kalibrace docházelo k občasným problémům s kalibračním generátorem. Za naprosto totožných podmínek program generoval odlišné kalibrační faktory a někdy program ani kalibraci nedokončil.

Po konzultaci byl tento problém nakonec vyřešen změnou nastavení položky *Místní a jazykové prostředí* operačního systému Windows. Problém pravděpodobně způsobovala kolize nastavení desetinné tečky programu Sound Quality a desetinné čárky v prostředí operačního systému. Po tomto nastavení se již problém s kalibračním generátorem neobjevil.

Posledním bodem kalibrace bylo vykonání tzv. binaurální kalibrace. Jejím účelem je změřit přenosovou frekvenční charakteristiku celé uzavřené smyčky ze schématu na Obr. 6.2. K této charakteristice pak program vypočítá charakteristiku inverzní, kterou dále aplikuje na reprodukované nahrávky. Výsledkem by pak měla být vyrovnaná frekvenční charakteristika celého řetězce.

V případě binaurální kalibrace byly vytvořeny korekční charakteristiky pro různé nastavení korekcí zvukového pole. Jejich tvorba, průběh testování a hodnocení výsledků je sepsáno v dalších kapitolách.

6.4 Vytvoření testovacích nahrávek

Pro hodnocení kvality úprav reprodukcího řetězce a následný výběr vhodné korekční charakteristiky binaurální kalibrace bylo pořízeno pomocí umělé nahrávací hlavy dvanáct jednodominutových nahrávek.

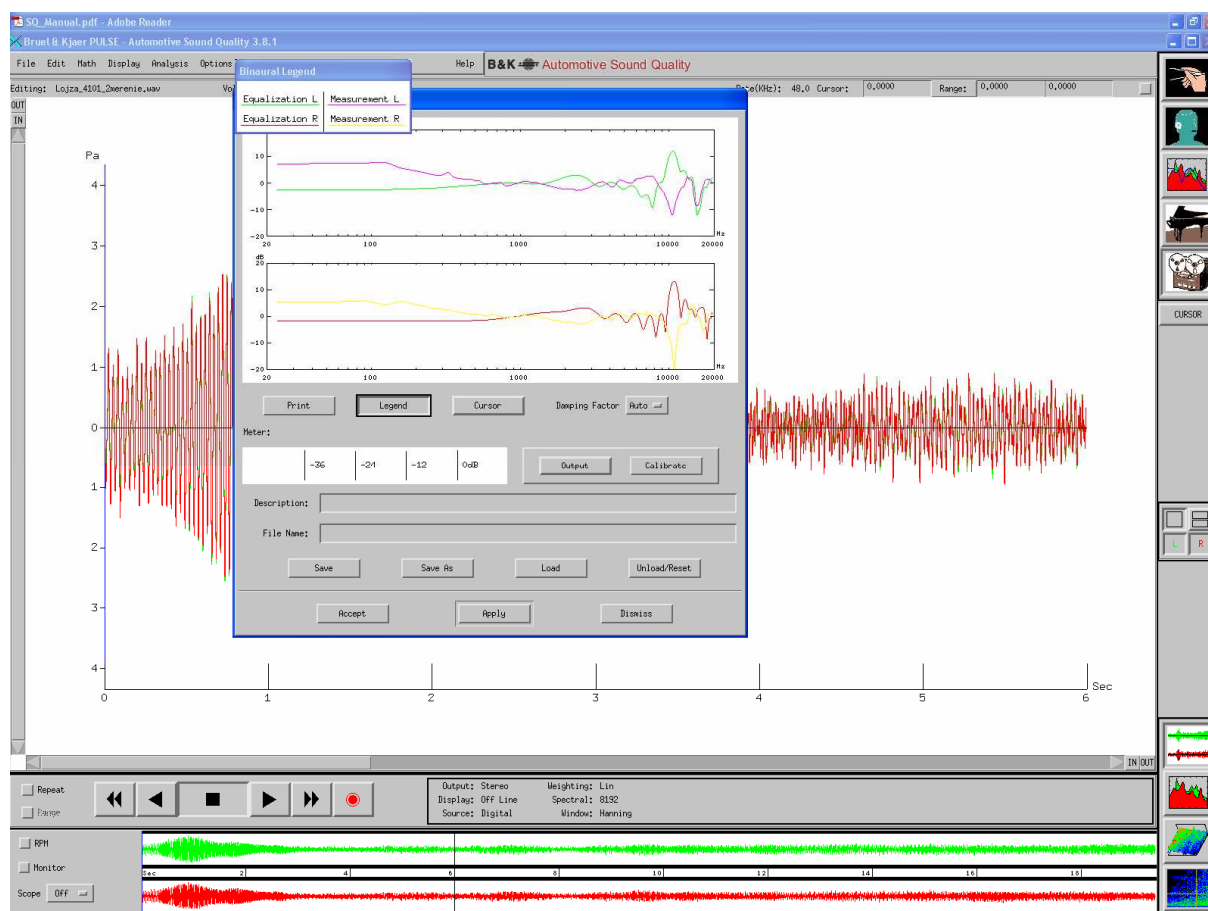
Nahrávání bylo provedeno ve vozidle Škoda Fabia s pravostranným řízením. Nahrávací hlava byla umístěna na sedadle spolujezdce (levém), které bylo posunuto do krajní zadní polohy. V průběhu nahrávání se obsluha nacházela na sedadle řidiče.

Jelikož bylo cílem získat nahrávky obsahující nízké, střední i vyšší frekvence, byly postupně nahrávány následující zvuky:

- motor ve volnoběžném chodu (tlumené hučení, převážně nízké frekvence)
- akustická signalizace blikačů (jasně ohraničené zvukové impulsy, vyšší frekvence)
- motorky stěračů (střední frekvence, po dosažení dorazu krajní polohy nižší frekvence)
- motorky stahovačů oken (frekvenčně podobné jako motorky stěračů, hlasitější)

Každý z výše popsaných zvuků byl snímán ve třech variantách. Na měřicí hlavě bylo postupně přepínáno nastavení korekcí na zvukové pole L0, IH a DC. Tyto nahrávky byly uloženy na pásek DAT, z kterého byly převedeny prostřednictvím programu Automotive Sound Quality do PC a uloženy pod názvy identifikujícími druh použité korekce.

Dále byla provedena binaurální kalibrace se všemi třemi nastaveními korekcí. Jelikož je nahrávací hlava součástí „Closed loop“ propojení, pomocí dálkového ovládání byly nastaveny po řadě L0, IH a DC. Průběh naměřených frekvenčních charakteristik a jejich korekcí je zobrazen na obrázku Obr. 6.4.



Obr. 6.4 Dialogové okno binaurální korekce (fialová a žlutá křivka odpovídají naměřeným charakteristikám a zelená a červená křivka jsou jejich vypočítané korekce)

Všechny vygenerované korekční křivky byly uloženy a pojmenovány tak, aby bylo zřejmé nastavení vstupní, výstupní kalibrace a korekce na zvukové pole např. bincal_90dB_1kHz_L0.beq.

6.5 Subjektivní porovnávání jednotlivých korekcí

Po vytvoření nahrávek bylo provedeno jejich subjektivní hodnocení pracovníky hlukové zkušebny. Kvalita reprodukce nahrávek zpracovaných programem Sound Quality a uložených v PC byla porovnávána s kvalitou reprodukce originálních nahrávek pořízených umělou hlavou (záznam na páse DAT). Subjektivně byl hodnocen vliv korekce na zvukové pole (L0, IH, DC) a její inverzní korekce v programu SQ. Postupně tedy byly přes nastavený reprodukční řetězec do sluchátek přehrávány nahrávky za použití správné křivky binaurální kalibrace a bez ní.

V případě korekce L0, tedy lineární, se nahrávky s podílem vyšších frekvencí jeví příliš jasné. Nahrávka volnoběžného chodu motoru přibližně odpovídala originální nahrávce. V případě nepoužití inverzní korekční křivky se kvalita reprodukce podstatně zhoršila.

Druhá zkoumaná korekce byla IH. Přestože se jedná o doporučenou korekci v rámci koncernu Volkswagen Group a.s., žádná z nahrávek se nepřibližovala originálu.

Poslední posuzovanou korekcí byla DC. V tomto případě byla kvalita reprodukce nahrávek s podílem nižších frekvencí velmi blízká kvalitě originálních nahrávek. Kvalita reprodukce nahrávek s větším podílem středních a vyšších frekvencí již nebyla tak vysoká, přesto uspokojující.

Výsledky tohoto posuzování lze tedy shrnout jako následující:

- K dané korekci na zvukové pole je třeba pro správnou reprodukci použít odpovídající inverzní korekci (např. pro korekci DC použít binaurální kalibraci provedenou pro DC). V případě nepoužití inverzní korekce se kvalita znatelně snižuje.
- Při nahrávání využívat korekci na zvukové pole DC firmy Cortex.

Na závěr této kapitoly je třeba ještě zmínit jev, který se objevoval v průběhu výše popsaného posuzování. Po použití binaurální korekce byl totiž zesílen šum, který k nahrávce přidávají obvody zvukové karta. I přes tento jev se jeví vhodnější binaurální korekci použít. Až bude k dispozici nová zvuková karta, výsledky mohou být revidovány.

7 Závěr

Cílem tohoto projektu bylo převážně seznámit se s technikou používanou pro nahrávání, reprodukci a posuzování zvuků vznikajících při užívání automobilu a na základě těchto znalostí správně nastavit reprodukční řetězec.

Nedílnou a časově náročnou součástí bylo zvládnutí obsluhy programů pro měření zvuku Automotive Sound Quality a B&K Pulse Labshop.

S využitím internetu a materiálů Škoda Auto a.s. byl vytvořen soubor technické dokumentace k jednotlivým prvkům reprodukčního řetězce. Tato dokumentace je k projektu přiložena a bude sloužit pro snadnou orientaci pracovníků hlukové zkušebny v případě změny zapojení. V dalším kroku byly vytvořeny a zdokumentovány dvě možnosti zapojení. Jedno analogové a druhé digitální, to bylo využito pouze jako reference pro porovnávání vlastností obou zapojení.

Na základě provedených simulací byly posouzeny akustické vlastnosti poslechové místnosti jako vyhovující. Teoreticky byl vyloučen vliv umístění poslechového místa a okna jako vysoce odrazivé plochy na přenosovou charakteristiku. Podle výpočtů není nutné poslechové místo přesouvat, ani jinak upravovat akustiku místnosti.

Praktická měření však vyvrátila výsledky předchozích simulací. Dle měření jsou akustické úpravy v poslechové místnosti nevyhovující. V prostoru vzniká velké množství módů. I v blízkém poli reproduktorů byl patrný jejich vliv na reprodukci nahrávek. Měřením byl potvrzen vliv desky stolu na výslednou reprodukci v pásmu nízkých frekvencí do 200 Hz. Posun reproduktorů k přední hraně stolu se projevil zejména v potlačení vrcholu odpovídajícímu frekvenci vlastních kmitů desky. I v jiných částech frekvenčního rozsahu se tato úprava projevila příznivě. Je tedy třeba reproduktory umístit na stojany nebo připevnit na zeď tak, aby bylo docíleno vhodného rozložení zvukového pole v poslechovém místě a přenosová charakteristika nebyla ovlivňována odrazy zvukového vlnění od desky stolu.

S pomocí měření změny frekvenční charakteristiky růžového šumu v poslechovém místě bylo provedeno správné nastavení korekcí a zesílení reproduktorů a subwooferu. Toto nastavení přispělo k vyrovnání přenosové charakteristiky v poslechovém místě na úroveň blízkou stanovené toleranci ± 5 dB. Vylepšení reprodukce bylo zaznamenáno i subjektivním poslechem. V druhé fázi měření byl zjištěn problém se zvukovou kartou RME DIGI 96/8. Zvuková karta má značně rozkolísanou frekvenční charakteristiku, která spolu se špatnou akustikou místnosti způsobuje nekvalitní reprodukci nahrávek z PC (programu Automotive Sound Quality).

Tento závěr byl potvrzen i porovnáním s reprodukcí přes zvukovou kartu VX Pocket PRO. Ta byla na základě měření označena jako vyhovující. Naproti tomu současně používaná zvuková karta RME DIGI 96/8 se ukázala pro poslechové testy jako nepoužitelná. Z předchozího tedy vyplynula potřeba pořízení nové zvukové karty. Na základě potřeb zadavatele byla doporučena externí zvuková karta RME MULTIFACE II s umožňující připojení pomocí rozhraní jak k PC, tak i k laptopu. Pro skupinový poslech přes sluchátka bylo doporučeno zakoupení profesionálního osmikanálového sluchátkového zesilovače Behringer POWERPLAY PRO-8 HA8000, který splňuje všechny technické požadavky zadavatele (frekvenční charakteristika, odstup signál – šum, počet kanálů) a zároveň je dostupný na českém trhu s nejvýhodnější pořizovací cenou

Dále byly shrnuty základní poznatky o snímání zvuků pomocí umělé nahrávací hlavy. Za účelem posuzování kvality reprodukce byly v měřeném vozidle pořízeny testovací nahrávky s různými korekcemi na difúzní zvukové pole. Pro jednotlivé korekce byly vytvořeny pomocí binaurální kalibrace soubory inverzních korekčních křivek generovaných programem Automotive Sound Quality. Nakonec byl subjektivním poslechem testován vliv použití korekce na zvukové pole při nahrávání a inverzní korekce při přehrávání z PC.

Jako nejvhodnější korekce difúzního pole pro nahrávání byla hodnocena korekce DC firmy Cortex. Při použití korekce na difúzní zvukové pole je třeba při reprodukci použít příslušnou inverzní korekci, jinak je kvalita reprodukované nahrávky horší.

V průběhu práce na tomto projektu byl postup dokumentován. Veškeré dokumentace, schémata a výsledky měření jsou uloženy na přiloženém CD. Později mohou být využity pracovníky hlukové zkušebny při úpravě propojení či přidání nových prvků do reprodukčního řetězce.

Všechny cíle vytyčené v zadání tohoto projektu byly splněny. V optimalizaci reprodukčního řetězce lze však nadále pokračovat. Jako další kroky vedoucí ke zlepšení reprodukce navrhuji profesionálně upravit akustiku místnosti tak, aby se zamezilo projevu rozložení zvukového pole v poslechovém místě nebo přemístit poslechové místo do nově vytvořené, patřičně upravené místnosti (s akustickými absorbéry na stěnách, bez oken, vhodné rozměry). Reprodukory by měly být připevněny na zdi nebo na stojanech tvořící s poslechovým místem rovnostranný trojúhelník. Navíc je třeba s novou zvukovou kartou a sluchátkovým zesilovačem dle postupu v kapitole 6 tohoto textu nebo v [4] správně zkalibrovat celý reprodukční řetězec.

Seznam použité literatury a programového vybavení (položky [15]-[18])

- [1] Geist, B. Jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: Muzikus, 2005. 273 s. ISBN 80 – 86253 – 31 – 7
- [2] Zwicker, E., Fastl, H. Psychoacoustics: Facts and Models. Heidelberg: Springer, 1999. 326 s. ISBN 0 – 387 – 52600 – 5
- [3] Syrový, V. Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. 258 s. ISBN 978 – 80 – 7331 – 127 - 8
- [4] Automotive Sound Quality, User Manual [online]. Brüel & Kjaer Sound and Vibration Measurement A/S, 2007. Dostupné na WWW: <<http://www.bksv.com/Support/Downloads/AutomotiveSoundQualityDownloads/>>
- [5] Automotive Sound Quality, Audio Setup [online]. Brüel & Kjaer Sound and Vibration Measurement A/S, 2006. Dostupné na WWW: <<http://www.bksv.com/Support/Downloads/AutomotiveSoundQualityDownloads/>>
- [6] Automotive Sound Quality, Release 3.8 [online]. Brüel & Kjaer Sound and Vibration Measurement A/S, 2007. Dostupné na WWW: <<http://www.bksv.com/Support/Downloads/AutomotiveSoundQualityDownloads/>>
- [7] Pelant, P. Návod k obsluze umělé hlavy Cortex MANIKIN MK1. Pracovní návod. Mladá Boleslav: Škoda Auto a.s., 1995. 48 s.
- [8] Cortex Manikin: The perfect binaural recording [online]. Chemin des Ormeaux: NetdB, 2006. Dostupné na WWW: < <http://www.01db-metravib.com/fileadmin/pdf/> >
- [9] Mackie 1604-VLZ Pro 16-channel Mic/Line Mixer Owner's Manual [online]. Woodinville: Mackie, 2004. Dostupné na WWW: <<http://www.mackie.com/products/1604vlz3/>>
- [10] LSR Studio Monitor System Owner's Manual [online]. Northridge: JBL, 1999. Dostupné na WWW: < <http://www.jblpro.com/catalog/general/technicallibrary>>
- [11] HE 60 Headphones Instructions for Use [online]. Wedemark: Sennheiser Elektronik KG, 1993. Dostupné na WWW: < http://www.sennheiser.com/sennheiser/home_de.nsf/root/service_download/>
- [12] RME DIGI 96/8 professional sound card Manual [online]. Mittweida: RME Audio, 2000. Dostupné na WWW: < http://www.rme-audio.de/en_downloads_manuals/>
- [13] Hudec, L. Změřená doba dozvuku poslechové místnosti pracoviště psychoakustiky Škoda Mladá Boleslav. Diplomová práce. Praha: FEL ČVUT v Praze, 2000. 88 s.

- [14] Wirsum, S. Abeceda NF techniky. Praha: BEN, 2003. 190 s. ISBN 80 – 86056 – 26 – 0
- [15] Automotive Sound Quality, Bruel & Kjaer, verze 3.8.1, distribuce: Spectris Praha spol. s.r.o.
- [16] Room Mode Calculator, Yavuz Aksan, www.acoustics.com, verze 0.6d
- [17] Damave, P., Damave, G., CD testing sounds. Rotterdam: Red Bullet International C.V., 2000. Stopa 34 – růžový šum. Stopa 32 – bílý šum.
- [18] B&K Pulse Labshop, verze 13.3.1, distribuce: Spectris Praha spol. s.r.o.
- [19] Behringer POWERPLAY PRO-8 HA8000 Technical specification [online], Willich: BEHRINGER Spezielle Audiotechnik GmbH, 2003. Dostupné na WWW: <<http://www.behringerdownload.de/HA8000/>>

Přílohy

Příloha č.1 – Tabulka koeficientů akustické pohltivosti různých materiálů (položky využité pro výpočty jsou uvedeny tučně)

Název	Koeficient
Akulit EC 10	0,32
Akulit ED 10	0,53
Akuplat 3	0,19
Beton s hladkým povrchem	0,01
AL ITAVER hliníková folie na líci i rubu desky	0,11
AL ITAVER hliníková folie uprostřed vzorku	0,14
AUDIOTEC - S 001 - 1230x615x30 mm	0,12
MONOGLAS - nástřík 25 mm	0,09
NOBAFON	0,38
NOBAMIN - tloušťka 22 mm	0,17
ORSIL-L tloušťka 60 mm, 50 kg.m-3	0,21
SONASPRAY K-13 - tloušťka 76 mm	0,70
TATRATEx 1100	0,01
VISTEMAT 250	0,14
VISTEMAT 350	0,07
CIHAL 8-14	0,46
S-BLOK 4/R - bez vložky	0,20
S-BLOK 4/R - s vložkou	0,60
SOUNDBLOX-B	0,29
SOUNDBLOX-C/b, bez omítky	0,70
Akustické dřevěné obklady DC a DS Akustik	0,18
Akustické dřevěné obklady DC a DS Akustik	0,26
Akustické dřevěné obklady DC a DS Akustik	0,63
Akustické dřevěné obklady ED10, ES 10	0,45
Akustické dřevěné obklady ED10, ES 10	0,47
Rezonanční panel - RP 2 RP 2	0,62
Rezonující panel RP 1200 RP 1200	0,46
Tvárníkový akustický rezonátor TAR 30/25	0,76
Tvárníkový akustický rezonátor TAR 45/20	0,59
Tvárníkový akustický rezonátor TAR 60/15	0,69
Drátěný panel - DR 3 - Itaver	0,10
Drátěný panel - DR 3 - Itaver v PE fólii	0,04
FEAL VAR	0,70
Hluchý panel - HDP	0,25
Kmitající panel KP 6, KP 10, KP 13	0,52
Kmitající panel KP 6, KP 10, KP 13	0,48
Kmitající panel KP 6, KP 10, KP 13	0,35
Montážní systém SW60	0,60
Odrazivý panel kosý - OPK	0,63
Panel prvkové stavebnice MP 5	0,68
Pohltivý panel E3, E6 Pohltivý panel E3	0,10
SONEX W, vzduch. polštáře d = 0	0,22
AMF - Freinfresko, tloušťka 15 mm, vzduch. polštář	0,63
ROCKFON Fibral CS a Polar se vzduch. polštářem	0,38

ROCKFON - hygienické panely	0,38
Knauf GK - SK pravidelné děrované desky	0,24
Sedící žena v letních šatech	0,05
PVC d = 2 mm na plstěné podložce	0,05
Korková podlaha, tloušťka 20 mm	0,04
Linoleum	0,02
Gumová podlaha, tloušťka 5 mm na betonu	0,04
Koberec Velur, tloušťka 8 mm	0,03
Koberec JEKOR	0,05
Mramor	0,01
Betonová mazanina	0,02
Izolační podlahovina na textilní podložce	0,05
Záclony zavěšené	0,00
Plst 0,75 kg.m-2, 150 mm od stěny	0,15
Okno jednoduché	0,08
Okno zdvojené	0,02
Difúzní panely ORBIS typ I	0,35
Difúzní panely ORBIS typ II	0,35

Příloha č.2 – Obsah přiloženého CD

1) **BP_Halas_Rostislav.pdf** (Text bakalářské práce)

2) Složka souborů *manualy*:

- **Behringer_HA8000** (technická specifikace doporučeného sluchátkového zesilovače)
- **LSR28P.pdf** (návod k reproduktorům)
- **MACKIE.pdf** (návod a uživatelská příručka k mixážnímu pultu)
- **RME_DIGI96.pdf** (technická dokumentace zvukové karty)
- **SQ_AudioSetup.pdf** (pokyny k nastavení vstupních a výstupních zařízení programu Sound Quality)
- **SQ_Manual** (Návod k programu Sound Quality)
- **SQ_ReleaseNotes** (Pokyny k vydání dané verze programu Sound Quality)
- **MK1_manual.doc** (Technická dokumentace nahrávací hlavy a základní údaje o nahrávání umělou hlavou)
- **HE60.pdf** (Technická dokumentace ke sluchátkům Sennheiser HE 60)
- **HD580.pdf** (Technická dokumentace ke sluchátkům Sennheiser HD 580)

3) Složka souborů *mereni*:

- **Alpha_tlum.xls** (Frekvenční charakteristika tlumicího materiálu)
- **Mer_pomucky.xls** (Seznam měřicích pomůcek)
- **Prenos_repro_stul.xls** (Data získaná měřením přenosu reproduktor - deska stolu)
- **Zvukovky_porovnani.xls** (Data získaná měřením frekvenčních charakteristik zvukových karet)
- **Akusticke_vl.xls** (Data získaná měřením akustických vlastností poslechové místnosti)
- **tabulka_aborpcnich_koef.xls** (Tabulka akustických absorpčních koeficientů vybraných materiálů)

4) **roomsim.xls** (Program Room Mode Simulator)

5) **PULSELiveReport.zip** (Program umožňující interaktivní prohlížení grafů)

Příloha č.3 – Seznam měřicích pomůcek

[I] **Notebook Toshiba TECRA S10-10E**, operační systém Microsoft Windows XP (SP3), Pulse Labshop verze 13.1.0

[II] **Notebook Dell precision M4300**, operační systém Microsoft Windows XP, (SP3), pro přehrávání použit Windows Media PLayer verze 11.0.5721.5260

[III] **Zařízení sběru dat (Frontend) Bruel&Kjaer 7537A**, sériové číslo: 8002 3310

[IV] **Mikrofon Bruel &Kjaer 1490**, sériové číslo: 2286616

[V] **CD s testovacími zvuky** Pieter Damave, Guus Damave, Red Bullet International C.V., Nizozemí, stopa:

[VI] **Akcelerometr Bruel&Kjaer DeltaTron**, typ: 4508 001, sériové číslo: 2337127, citlivost 1mV/ms^{-2} , kalibrační frekvence 159,2 Hz

[VII] **Akcelerometr Bruel&Kjaer DeltaTron**, typ: 4508 001, sériové číslo: 2318840, citlivost 1mV/ms^{-2} , kalibrační frekvence 159,2 Hz

[VIII] **Kalibrátor Bruel&Kjaer**, typ: 4294, kalibrační frekvence: 159,2 Hz

Příloha č.4 – Návod na interaktivní čtení grafů z programu Pulse Labshop

Z příloženého CD spusťte soubor s názvem *PULSELiveReport*. Po dearchivaci proběhne instalace programu. Dále už je možné interaktivně prohlížet grafy získané měřením programem Pulse Labshop. Ty jsou exportované do sešitu aplikace Microsoft Excel (např. soubor *Prenos_repro_stul* na příloženém CD). Po dvojitým kliknutí na příslušný graf se objekt převede do režimu prohlížení. Stisknutím pravého tlačítka myši se objeví menu vlastností umožňující následující nastavení:

- Čtení hodnot (Readout) – možnost nastavení, které hodnoty kurzoru mají být zobrazovány
- Legend – zobrazení legendy, nastavení popisek
- Anotace (Annotation) – text, který se zobrazí po postavení kurzoru na graf
- Možnosti (Options) – využívá se pro vložení celého objektu do schránky, možné opětovné vložení pomocí Vložit ->Vložit jinak
- Osa X,Y,Z (X,Y,Z axis) – nastavení měřítka(lineární, logaritmické, decibelová stupnice), maxima, minima, kroku, viditelnosti jednotlivých os
- Kurzory (Cursors) – nastavení zobrazení kurzorů, main-zobrazení absolutních hodnot, delta-zobrazení rozdílu kurzorů
- Funkce (Functions) – nastavení jednotlivých křivek v grafu-viditelnost, barva, styl čáry, váhování
- Úprava dat (Data edit) – umožňuje změnit hodnotu dat zobrazených v grafu
- Toleranční křivka (Tolerance curve) – možnost zobrazit toleranční křivku definovanou body, popř. funkcí
- Vyhlazování (Curve smoothing)- nastavení vyhlazování funkce

Kliknutím mimo graf se vrátíme zpátky do statického módu.