



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektroakustická měření s využitím analyzátoru EASERA

Autor práce: Martin Dráb  
Vedoucí práce: Ing. Jiří Stifter, Ph.D.

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin DRÁB**  
Osobní číslo: **E11B0193P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Elektroakustická měření s využitím analyzátoru EASERA**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

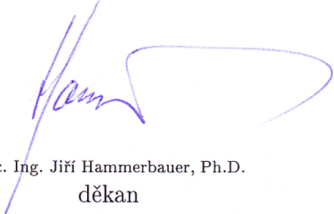
1. Popište možnosti SW analyzátoru EASERA, jeho implementované měřicí funkce a možnosti jejich využití při elektroakustických měřeních.
2. Navrhněte a prakticky zrealizujte vhodné laboratorní úlohy s využitím analyzátoru EASERA a vhodného měřicího HW, které by bylo možné využít při elektroakustických měřeních.
3. K laboratorním úlohám vytvořte návody pro studenty včetně nezbytného teoretického popisu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Stifter, Ph.D.**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

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



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

# Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje funkce softwarového analyzátoru EASERA. Jedná se o měřicí software pro akustická měření. Cílem této bakalářské práce je popsat implementované měřicí funkce a jednotlivé výstupní charakteristiky analyzátoru. V praktické části jsou sestaveny vybrané úlohy akustických měření, měření impulsní charakteristiky, frekvenční charakteristiky, nelineárního zkreslení a měření indexu přenosu řeči. Pro některé z těchto měření jsou v třetí kapitole sestaveny měřicí úlohy.

## Klíčová slova

softwarový analyzátor EASERA, impulsní charakteristika, frekvenční charakteristika, nelineární zkreslení

# Abstract

Dráb, Martin. *Electroacoustic measurements with the analyzer EASERA* [*Elektroakustická měření s využitím analyzátoru EASERA*]. Pilsen, 2015. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jiří Stifter

---

This bachelor thesis describes the functions of the software analyzer EASERA. This is a software for acoustic measurements. The aim of this work is to describe the functions implemented and measuring the individual output characteristics analyzer. In the practical part are assembled selected jobs acoustics measurements, impulse response, frequency response, distortion and speech transmission index. For some of these measurements are compiled in the third chapter of measurement tasks.

## Keywords

software analyzer EASERA, impulse response, frequency response, harmonic distortion

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 8. června 2015

Martin Dráb

.....

Podpis

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vii</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Analyzátor EASERA a jeho využití při akustických měřeních</b>	<b>2</b>
2.1 Časové výstupní charakteristiky analyzátoru . . . . .	2
2.1.1 Měření impulsní charakteristiky (Impuls response) . . . . .	2
2.1.2 Měření energetické časové křivky (Energy time curve) . . . . .	3
2.1.3 Měření Schroederova integrálu . . . . .	3
2.1.4 Měření přechodové charakteristiky (Step Response) . . . . .	3
2.1.5 Suma energie (Sum energy) . . . . .	3
2.1.6 Ozvěna pro řeč a hudbu (Echo speech and music) . . . . .	3
2.2 Frekvenční výstupní charakteristiky analyzátoru . . . . .	4
2.2.1 Frekvenční charakteristika (Frequency response) . . . . .	4
2.2.2 Skupinové zpoždění (Group delay) . . . . .	4
2.2.3 Reálné a imaginární složky signálu (Real and imaginary parts) . . . . .	5
2.3 Akustické parametry dopočítávané analyzátořem . . . . .	5
2.3.1 Doba před příchodem a vzdálenost po průchodu signálu (Arrival and distance) . . . . .	5
2.3.2 Míra jasnosti a zřetelnosti . . . . .	5
2.3.3 Čas těžiště impulsní odezvy (Center time) . . . . .	6
2.3.4 Doby dozvuku (Reverberation Time, Early Decay Time, T10, T15, T30) . . . . .	7
2.3.5 Index přenosu řeči (Speech Transmission Index) . . . . .	7
2.3.6 Interaurální vzájemná korelace (InterAural Cross correlation Coefficient) . . . . .	7
2.3.7 Celkové harmonické zkreslení (Total Harmonic Distortion) . . . . .	7
2.4 Ostatní výstupní charakteristiky charakteristiky z měření . . . . .	8
2.4.1 3D zobrazení frekvenční charakteristiky (Waterfall) . . . . .	8
2.4.2 Spektrogram . . . . .	8
2.5 Zvuková analýza v reálném čase (Real time analysis) . . . . .	8
2.6 Analyzátor zvukových souborů (FILE analysis) . . . . .	8

<b>3</b>	<b>Akustická měření</b>	<b>9</b>
3.1	Potřebné komponenty pro měření akustického systému . . . . .	9
3.2	Kalibrace měřícího systému . . . . .	11
3.3	Signály pro měření (Stimulus) . . . . .	12
3.3.1	Rozmítaný signál (Sweep signal) . . . . .	12
3.3.2	Šumový signál (Noise signal) . . . . .	12
3.3.3	MLS signál (Maximum Length Sequence) . . . . .	12
3.3.4	Možnost váhování měřících signálů (Frequency Weighting) . . . . .	12
3.4	Měření impulsní odezvy . . . . .	13
3.4.1	Měření v bezdozvukové komoře . . . . .	13
3.4.2	Měření v běžné poslechové místnosti . . . . .	14
3.5	Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika reproduktorové soustavy .	15
3.5.1	Měření v otevřeném poloprostoru . . . . .	15
3.5.2	Měření v běžné poslechové místnosti . . . . .	16
3.6	Nelineární zkreslení reproduktorové soustavy . . . . .	19
3.7	Měření indexu přenosu řeči . . . . .	20
3.8	Měření šumového pozadí v místnosti . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Laboratorní úlohy s využitím analyzátoru EASERA</b>	<b>22</b>
4.1	Měření impulsní a frekvenční charakteristiky pomocí MLS signálu . . . . .	22
4.1.1	Zadání a cíl úlohy . . . . .	22
4.1.2	Teorie k úloze . . . . .	22
4.1.3	Potřebné komponenty pro měření . . . . .	23
4.1.4	Základní nastavení analyzátoru a provedení kalibrace . . . . .	24
4.1.5	Blokové schéma zapojení měření . . . . .	26
4.1.6	Postup zapojení měřící soustavy . . . . .	26
4.2	Měření frekvenční charakteristiky pomocí více měřících signálů a měření nelineárního zkreslení . . . . .	29
4.2.1	Zadání a cíl úlohy . . . . .	29
4.2.2	Teorie k úloze . . . . .	29
4.2.3	Potřebné komponenty pro měření . . . . .	29
4.2.4	Základní nastavení analyzátoru a provedení kalibrace . . . . .	30
4.2.5	Blokové schéma zapojení měření . . . . .	32
4.2.6	Postup zapojení měřící soustavy . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>35</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>36</b>



# Seznam obrázků

2.1	Frekvenční charakteristika reproboxu Tesla V6804 pro různé poměry vyhlazení . . . . .	4
2.2	Zobrazení parametrů C7,C50,C80 . . . . .	6
3.1	Blokové schéma zapojení měřicího řetězce pro akustická měření . . . . .	10
3.2	Kalibrace mikrofону v EASERA . . . . .	11
3.3	Váhovací křivka EASERA. Modrá křivka je pro případ bílý (white) signál, zelená pro růžový (pink) a červená je váhovaná (weighted) křivka. . . . .	13
3.4	Impulsní odezva akustické soustavy Tesla V6804 měřená ve volném prostoru	14
3.5	Impulsní odezva akustické soustavy Tesla V6804 v učebně EK705 . . . . .	14
3.6	Frekvenční charakteristika měřená v poloprostoru při příkonu 1W. Modrá křivka je nevyhlazená charakteristika, červená je vyhlazená 1/48. . . . .	16
3.7	Frekvenční charakteristika měřená v poloprostoru při příkonu 4W. Modrá křivka je nevyhlazená charakteristika, červená je vyhlazená 1/48. . . . .	16
3.8	Umístění měřicí soustavy v učebně EK705 . . . . .	17
3.9	Frekvenční charakteristika měřená v EK705 při příkonu 1W. Modrá křivka je nevyhlazená charakteristika, červená je vyhlazená 1/48. . . . .	17
3.10	Měřená akustická soustava Tesla V6804, výrobní číslo: 309487 . . . . .	17
3.11	Schéma postupu měření jednotlivých výškových reproduktorů . . . . .	18
3.12	Frekvenční charakteristika jednotlivých výškových reproduktorů soustavy Tesla V6804 . . . . .	18
3.13	Frekvenční charakteristika výškového reproduktoru Tesla udávaná výrobcem	18
3.14	Nelineární zkreslení soustavy Tesla V6804 měřené v poloprostoru. . . . .	19
3.15	Zkreslení vyšších harmonických soustavy Tesla V6804 měřené v poloprostoru	19
3.16	Index přenosu řeči v poloprostoru . . . . .	20
3.17	Index přenosu řeči v učebně EK705 . . . . .	20
3.18	Šumové pozadí místnosti v klidu . . . . .	21
3.19	Šumové pozadí místnosti během rozhovoru . . . . .	21
4.1	Impulsní charakteristika měřená v otevřeném prostoru (bez odrazů) . . . . .	23
4.2	Výběr zvukové karty v EASERA . . . . .	24
4.3	Výběr vstupu v EASERA . . . . .	24

4.4	Kalibrace mikrofonu v EASERA . . . . .	25
4.5	Kalibrace vstupu v EASERA . . . . .	25
4.6	Kalibrace výstupu v EASERA . . . . .	26
4.7	Schema zapojení měřicího řetězce pro akustická měření . . . . .	26
4.8	Umístění měřicí soustavy v učebně EK705 . . . . .	27
4.9	Spouštěcí okno pro měření EASERA . . . . .	28
4.10	Frekvenční charakteristika měřená v EK705. Modrá křivka je nevyhlazená charakteristika, červená je vyhlazená 1/48. . . . .	28
4.11	Výběr zvukové karty v EASERA . . . . .	30
4.12	Výběr vstupu v EASERA . . . . .	30
4.13	Kalibrace mikrofonu v EASERA . . . . .	31
4.14	Kalibrace vstupu v EASERA . . . . .	31
4.15	Kalibrace výstupu v EASERA . . . . .	32
4.16	Schema zapojení měřicího řetězce pro akustická měření . . . . .	32
4.17	Umístění měřicí soustavy v učebně EK705 . . . . .	33
4.18	Poslední nastavení před měřením EASERA . . . . .	33
4.19	Porovnání jednotlivých měřících signálů. Červená křivka pro MLS sig- nál. Modrá pro Šumový signál. Zelená pro rozmítaný signál. . . . .	34
4.20	Nelineární zkreslení soustavy Tesla V6804 měřené v poloprostoru. . . . .	34

# 1

## Úvod

Elektroakustická měření jsou nedílnou součástí všech oborů které souvisí s akustikou. Pro akustická měření se používají softwarové analyzátory. Tato práce popisuje možnosti softwarového elektroakustického analyzátoru EASERA. Tento analyzátor umožňuje měřit akustické parametry prostorů a elektroakustických soustav.

V první kapitole jsou popsány jeho měřící funkce, vysvětleny výstupní charakteristiky a měřené parametry.

Další kapitola pojednává o způsobu zapojení měřícího hardwaru a kalibraci celého měřícího řetězce. V této kapitole jsou teoreticky popsána a prakticky ověřena následující měření: měření impulsní charakteristiky, měření frekvenční charakteristiky, měření nelineárního zkreslení, měření indexu přenosu řeči. Dále jsou zde porovnána měření těchto parametrů uvnitř poslechového prostoru s parametry měřenými venku. Také jsou zde uvedeny možnosti využití měření parametrů poslechových místností a měření reproduktorových soustav.

V poslední části této práce jsou z vybraných měření předchozí kapitoly sestaveny zadání laboratorních úloh pro studenty. Tyto zadání obsahují potřebnou teoretickou část, podrobný postup pro kalibraci analyzátoru a zapojení celého měřícího řetězce.

## 2

# Analyzátor EASERA a jeho využití při akustických měřeních

EASERA je softwarový analyzátor pro měření a vyhodnocování signálů obvykle v akustickém poli. Tento analyzátor je vydáván ve dvou verzích EASERA a EASERA Pro. V této práci je použita verze EASERA Pro, ta na rozdíl od základní verze EASERA umožňuje pracovat s MLS signály a s více než dvěma vstupními kanály. Také je schopna analýzy v reálném čase. Abychom mohli s analyzátozem měřit, je nutné mít zvukovou kartu. EASERA podporuje všechny běžné zvukové karty. Umožňuje pracovat až s 32 vstupními kanály s 32 bitovou hloubkou kvantizace o vzorkovací frekvenci do 192kHz. EASERA generuje všechny běžně používané stimulační signály pro měření jako je MLS sekvence, rozmítaný signál i šumové signály. Výstupem z analyzátoru je mnoho výstupních charakteristik jako impulsní odezva, frekvenční charakteristika nebo Schroederův integrál. Dále analyzátor dopočítává mnoho akustických parametrů, které budou v této kapitole podrobně představeny.

## 2.1 Časové výstupní charakteristiky analyzátoru

První skupinou výstupních charakteristik z analyzátoru EASERA jsou časové výstupní charakteristiky. Jedná se o charakteristiky, které jsou zobrazeny v závislosti na čase.

### 2.1.1 Měření impulsní charakteristiky (Impuls response)

Impulsní odezva systému je definována jako výstupní signál, který nastane, když na vstup systému přivedeme Diracův impuls, který nabývá v  $t = 0$  maximální amplitudy. Časovou odezvu na výstupu testovaného systému získáme pomocí konvolučního teorému, který nám říká, že odezvu na libovolný budící signál získáme konvolucí tohoto signálu a impulsní odezvy. Diskrétní konvolucí se myslí rozložení vstupního signálu na součet zmenšených a časově posunutých pulsů [1] viz rov. 2.1, kde  $p(t)$  je výstupní cyklický signál,  $u(r)$  je budící signál a  $h(r)$  je impulsní odezva systému.

$$p(t) = \int_0^{\infty} u(r)h(t-r)dr \quad (2.1)$$

### 2.1.2 Měření energetické časové křivky (Energy time curve)

Energetická časová křivka znázorňuje hodnotu hladiny akustického tlaku v dB v místě měření v závislosti na čase. V akustických měřeních nám tato křivka umožňuje zjistit polohu odrazů v místnosti. Jednotlivé odrazy jsou v křivce znázorněny jako propady úrovně akustického tlaku[2].

### 2.1.3 Měření Schroederova integrálu

Schroederův integrál podle rov.2.2 se vypočítá zpětně z impulsní odezvy a používá se pro získání rozpadu zvukové energie v místnosti. Z výsledku tohoto integrálu můžeme určit vlastnosti poslechové místnosti, neboť zobrazuje průběh doznívání v prostoru viz rov.2.2, kde  $p(t)$  je impulsní odezva a  $S(t)$  je výsledný schroederův integrál.

$$S(t) = \int_t^{\infty} p^2(t)dt \quad (2.2)$$

### 2.1.4 Měření přechodové charakteristiky (Step Response)

Přechodová charakteristika je odezva systému na jednotkový skok na vstupu. Jednotkový skok je funkce, která má do času  $t = 0$  nulovou hodnotu a v čase  $t = 0$  je změněna na konstantní hodnotu[4]. Z praktického hlediska nám ukazuje, jak celý systém reaguje na náhlé změny vstupu. Tento parametr nám poskytuje informaci o stabilitě systému a jeho schopnosti dosáhnou co nejrychleji změny z jednoho ustáleného stavu do druhého.

### 2.1.5 Suma energie (Sum energy)

Jedná se o integrál signálu zobrazený na logaritmické stupnici. Suma energie se používá pro charakteristiku přechodové odezvy místností. Její hodnota rychle narůstá po příchodu prvního impulsu do systému a pak se ustálí. Pro místnosti vhodné na řeč chceme, aby se hodnota ustálila co nejrychleji, pro místnosti vhodné pro hudbu by mělo být ustálení pomalejší.

### 2.1.6 Ozvěna pro řeč a hudbu (Echo speech and music)

Jedná se o impulsní odezvu prostoru s přihlédnutím na prostorový dojem posluchače. Tento parametr se používá při návrhu hal, v ideálním prostoru by měla být tato charakteristika v celém poslechovém prostoru konstantní tedy rovná 1. Posluchač vnímá tento parametr jako ozvěnu, pokud je maximální ozvěna měřeného prostoru  $E_k \max$  větší než limitní ozvěna prostoru  $E_k \text{ limit}$  (u řeči je  $E_k \text{ limit}$  50 ms, pro hudbu je doporučeno

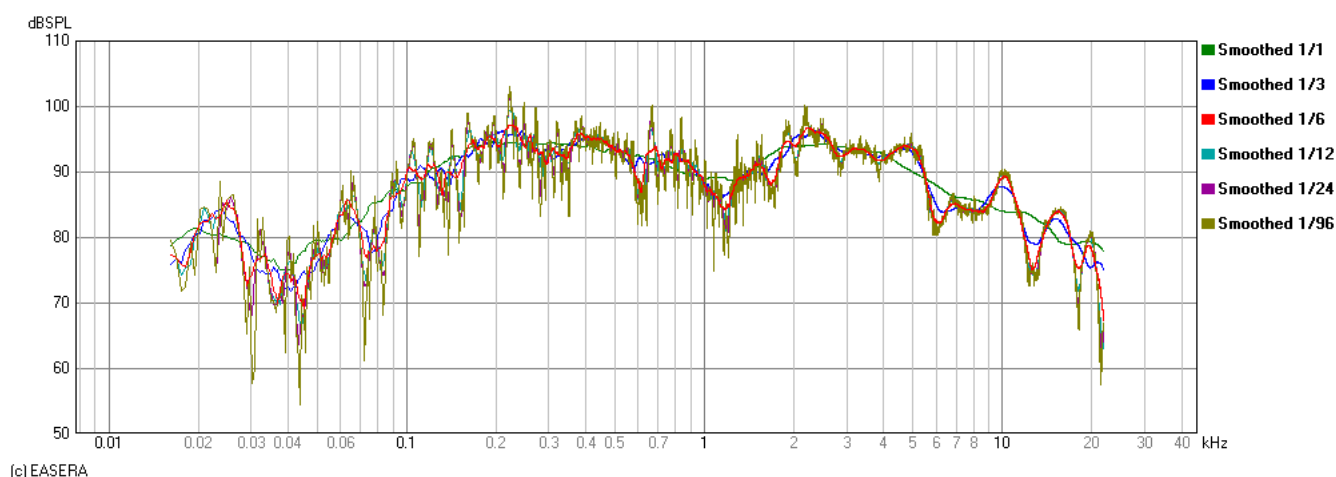
80 nebo 100 ms dle hudebního žánru). Ozvěna způsobuje zvětšení prostorového vjemu posluchače a v některých případech může být i přínosem pro celkové vnímání koncertů.

## 2.2 Frekvenční výstupní charakteristiky analyzátoru

Druhou skupinou výstupních charakteristik jsou frekvenční charakteristiky. Frekvenční charakteristiky v akustických měřeních reproduktorů popisují závislost poměru amplitudy výstupního akustického tlaku ku vstupnímu a jejich fázový posun v závislosti na frekvenci.

### 2.2.1 Frekvenční charakteristika (Frequency response)

Frekvenční charakteristika je závislost hladiny akustického tlaku nebo napětí na frekvenci v určitém bodě měření při konstantním napětí na reproduktoru. Díky ní můžeme určit šířku frekvenčního pásma daného systému. EASERA nám umožňuje více možností práce s touto charakteristikou, a to nejen přesné stanovení hodnoty akustického tlaku v námi zvoleném bodě charakteristiky, ale také exponenciální vyhlazení v poměrech 1/96 až 1/1 oktávy viz obr.2.1.



Obr. 2.1: Frekvenční charakteristika reproboxu Tesla V6804 pro různé poměry vyhlazení

### 2.2.2 Skupinové zpoždění (Group delay)

Představuje zpoždění signálu při průchodu akustickou soustavou v závislosti na frekvenci. Některé složky signálu mohou být při průchodu akustickou soustavou více či méně zpožděny, větší zpoždění těchto složek způsobí zkreslení signálu [7]. V akustice je důležité znát práh slyšitelnosti tohoto zpoždění, protože při překročení tohoto prahu není zvuk věrně reprodukován například, například u 1kHz je práh 2ms [8].

### 2.2.3 Reálné a imaginární složky signálu (Real and imaginary parts)

Každý signál kmitočtové charakteristiky je tvořen modulem a fází. Tato charakteristika nám v EASERA umožňuje vidět zobrazení těchto složek signálu v závislosti na frekvenci. Graf nám může ukázat fázová zkruslení způsobená průchodem systémem [4]. Tato charakteristika je v EASERA odvozena z impulsní odezvy.

## 2.3 Akustické parametry dpočítávané analyzátořem

### 2.3.1 Doba před příchodem a vzdálenost po průchodu signálu (Arrival and distance)

Arrival je doba od začátku měření do doby příchodu signálu. Příchod signálu představuje čas, kdy se hodnota signálu dostane nad úroveň šumového pozadí prostředí. Hodnotu šumového pozadí daného prostředí, ve kterém měříme, si můžeme v EASERA nastavit. Distance je vzdálenost vypočítávaná z hodnoty arrival při teplotě 20 stupňů. Určuje vzdálenost mezi měřenou soustavou a měřícím mikrofonem.

### 2.3.2 Míra jasnosti a zřetelnosti

C50 je označení pro míru jasnosti a C80 pro míru zřetelnosti. C50 je poměr mezi energií, která přichází během prvních 50 ms od doby začátku měření a energií po této době. Čím je tato hodnota vyšší, tím je větší srozumitelnost (kvalita přenosu řeči směrem k posluchači). V praxi by měl tento parametr mít hodnotu, která bude nižší než -2dB, aby neklesla srozumitelnost pod 80 %. Pro dobré vnímání celých vět by však měla být srozumitelnost 90 %, a proto se bere hodnota -2 dB jako spodní mez tohoto parametru. Hodnota nižší než spodní mez je většinou způsobena odrazy v prostoru viz rov.2.3, kde  $p(t)$  je výstupní cyklický signál[4].

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [dB] \quad (2.3)$$

C80 udává akustické kritérium tzv. jasnosti hudby (časového rozložení tónů v rychlé hudební pasáži) viz rov.2.4, kde  $p(t)$  je výstupní cyklický signál. Toto kritérium je odlišné pro různé hudební styly. Ideální hodnoty tohoto parametru jsou 1dB +/- 2dB. Hodnota by neměla být vyšší než +8dB[4].

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [dB] \quad (2.4)$$

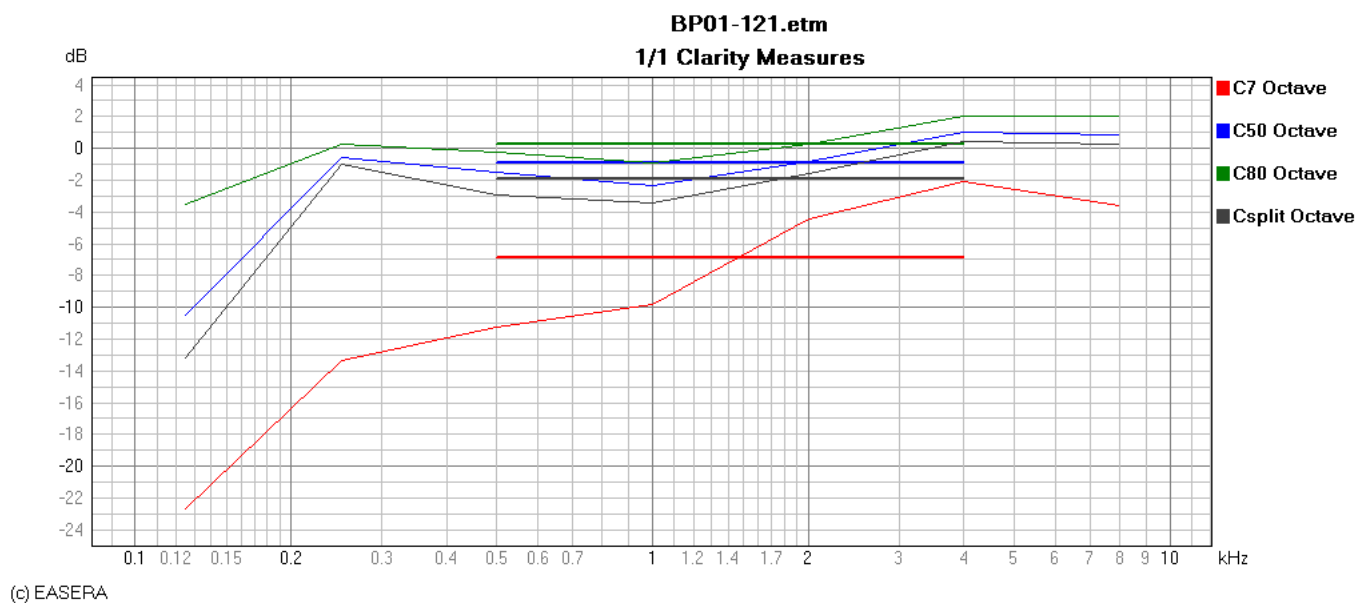
D50 popisuje poměr mezi energií prvních 50ms a mezi celkovou energií. D50 je ekvivalentem parametru C80, určuje tedy zřetelnost zvuku viz rov.2.5, kde  $p(t)$  je výstupní cyklický signál.

$$D_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.5)$$

C7 je poměr mezi energií, která přichází v prvních 7ms od začátku měření a energií po této době. Hodnota by ve vztahu k vzdálenosti zdroj zvuku - posluchač neměla klesnout pod rozmezí -10 až -15 dB. Čím více se hodnoty blíží 0, tím je lokalizace zdroje zvuku přesnější.

$$C_7 = 10 \log \frac{\int_0^{7ms} p^2(t) dt}{\int_{7ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [dB] \quad (2.6)$$

Graf porovnání jednotlivých parametrů C7, C50 a C80 obr.2.2



Obr. 2.2: Zobrazení parametrů C7, C50, C80

### 2.3.3 Čas těžiště impulsní odezvy (Center time)

Tato hodnota popisuje prostorový dojem pro daný poslechový prostor podobně jako parametr C80. Pro hudbu by měl tento čas nabývat hodnoty 70-150 ms v oktávním pásmu 1000 Hz a pro řeč ve čtyřech oktávách mezi 500-4000 Hz by měla být hodnota 60-80 ms. Čím je tato hodnota vyšší, tím je posluchačův vnímaný prostorový dojem větší. EASERA umožňuje grafické zobrazení tohoto parametru v závislosti na frekvenci [6].

$$t_s = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (2.7)$$



### 2.3.4 Doby dozvuku (Reverberation Time, Early Decay Time, T10, T15, T30)

Doba dozvuku (RT) nebo také hodnota T30 je čas, který uplyne po vypnutí akustického zdroje, kdy se hladina energie sníží na 1/1 000 000 počáteční hodnoty nebo hladina akustického tlaku na 1/1000, tj. o 60 dB. Definovaný pokles hladiny akustického tlaku 60dB odpovídá dynamickému rozsahu velkého orchestru. Tento parametr je závislý na úrovni budícího akustického tlaku. Pro požadovaný dynamický rozsah hodnocení je obtížné dosáhnout objektivního měření a to hlavně v oblasti nízkých kmitočtů. Z tohoto důvodu se měří čas rozpadu hladiny akustického tlaku z -5 do -35dB, výsledkem je hodnota T30. Z ní pak vychází počáteční doba dozvuku T15 od -5 do -20dB a doba rozpadu ETC (T10) 0 až -10dB. Tyto hodnoty jsou v souladu se subjektivním vnímáním délky dozvuku.

### 2.3.5 Index přenosu řeči (Speech Transmission Index)

Index přenosu řeči definuje úroveň slyšitelnosti a srozumitelnosti řeči v místnosti. STI měří fyzikální vlastnosti přenosového kanálu, kterým myslíme místnost, elektroakustická zařízení nebo telefonní linku, a vyjadřuje schopnost kanálu přenášet řeč. STI nám říká, jak ovlivní přenosový kanál srozumitelnost řeči v porovnání s normou pro řeč IEC 60268-16. Hodnota STI je v rozmezí od 0 do 1. Hodnota 1 znamená, že je řeč dokonale srozumitelná.

### 2.3.6 Interaurální vzájemná korelace (InterAural Cross correlation Coefficient)

Proces slyšení je binaurální. Subjektivní studie poslechových prostorů ukázaly, že činitelé interaurální vzájemné korelace, měřené za pomoci reálného posluchače, kde v ušních boltcích jsou umístěny mikrofony, dobře korelují se subjektivní kvalitou dojmu prostoru v sálu. Normalizovaná funkce interaurální vzájemné korelace IACC je definována vzorcem viz rov.2.8, kde  $p_l(t)$  je impulsní odezva na vstup do levého ucha a  $p_r(t)$  do pravého[6].

$$IACC_{t_1, t_2}(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}} \quad (2.8)$$

Pro "IIAC(early)" je časová konstanta  $t(1)=0\text{ms}$  a  $t(2)=80\text{ms}$ . Hodnoty IACC by se měly v jednotlivých oktávových pásmech 500, 1000 a 2000 Hz pohybovat v rozmezí 0,4 až 1, kde hodnota 1 znamená maximální rozdílnost zvukových signálů na obou uších.

### 2.3.7 Celkové harmonické zkreslení (Total Harmonic Distortion)

Zkreslení zvukového systému je udáváno pomocí činitele harmonického zkreslení (THD). THD vyjadřuje procentní podíl zastoupení vyšších harmonických k celému signálu. De-

finujeme je jako poměr součtu všech výkonů harmonických ku základní harmonické. V akustice je žádoucí, aby byl tento parametr co nejnižší.

## 2.4 Ostatní výstupní charakteristiky charakteristiky z měření

### 2.4.1 3D zobrazení frekvenční charakteristiky (Waterfall)

Jedná se o graf frekvenční charakteristiky rozšířený o třetí osu, kterou je čas. Graf zobrazuje, jak se mění frekvenční charakteristika v závislosti na čase po dobu měření.

### 2.4.2 Spektrogram

Spektrogram znázorňuje intenzitu kmitočtů zvukového signálu a jejich proměny v čase. Frekvence je na svislé ose a intenzita je zobrazena zbarvením daného bodu. Z tohoto grafu je možné poznat charakter zvuku (zda jde o řeč, hudbu či hudbu se zpěvem).

## 2.5 Zvuková analýza v reálném čase (Real time analysis)

V ESERA můžeme také využít funkci "real time", kde vidíme frekvenční charakteristiku a spektrogram měnící se v čase. Můžeme také použít vyhlazovací filtry. Funkce "real time" je velmi užitečná pro zvukaře při živých koncertech. Díky této funkci zvukař vidí frekvenční charakteristiku v reálném čase a může snáze odfiltrovat nežádoucí frekvence způsobené například odrazy v sále.

## 2.6 Analyzátor zvukových souborů (FILE analysis )

Analyzátor zvukových souborů je nástroj k analýze zvukového záznamu ve formátu wav. Zobrazí nám nejen frekvenční charakteristiku nahrávky, ale také parametry přenosu řeči STI a další výše uvedené. Také je možné zobrazit spektrogram tohoto záznamu.

# 3

## Akustická měření

Akustická měření provádíme, abychom získali základní parametry jakékoliv akustické soustavy (reproduktorů), nebo akustické parametry místnosti. Bez těchto měření nejsme schopni akustickou soustavu popsat. Akustická měření jsou velmi důležitá nejen při návrhu reproduktorových soustav, ale i při stavbě poslucháren nebo koncertních sálů. Díky těmto měřením jsme schopni analyzovat nežádoucí frekvenční složky signálu, ale i signály, které vznikly například odrazem v prostoru, a tím zvýšit kvalitu poslechu. Základním akustickým měřením je měření impulsní odezvy. Z impulsní odezvy dané akustické soustavy analyzátor dopočítává ostatní měřené parametry uvedené v teoretické části, proto budeme tímto měřením začínat.

### 3.1 Potřebné komponenty pro měření akustického systému

Abychom akustická měření mohli provést, neobejdeme se bez kvalitních elektroakustických měničů (mikrofon) a bez digitálně analogových převodníků (zvuková karta). Nejvyšší požadavky jsou kladeny na měřicí mikrofon, který by měl mít co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiku, co nejkratší impulsní odezvu a měl by být velmi stabilní s ohledem na teplotu prostředí. Zvuková karta by měla mít co nejvyšší hloubku kvantizace (počet použitých úrovní v každém kroku). Tato hodnota se udává jako počet bitů na vzorek a standardně se používá 8, 16 nebo 24 bitů.

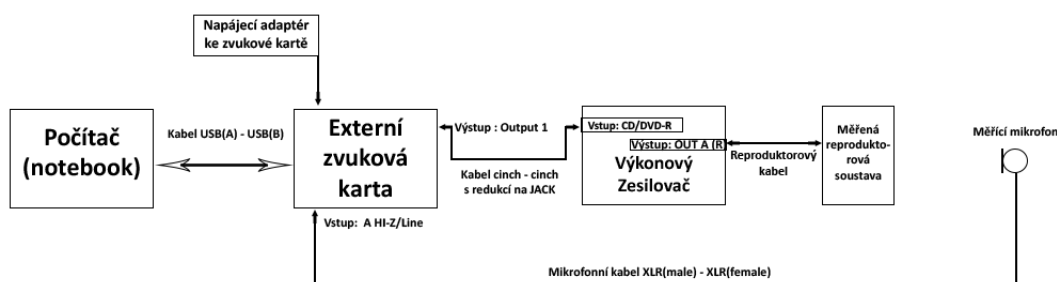
Seznam potřebných komponentů pro měření impulsní odezvy akustického systému:

- Kvalitní zvukový analogově-digitální převodník (externí zvuková karta)
- Měřicí mikrofon
- Počítač
- Mikrofonní kabel s konektory XLR

- Mikrofonní stojan
- Výkonový zesilovač
- Měřená elektroakustická soustava (reproduktory)

V našem případě byla pro všechna měření použita zvuková karta E-MU 4040, měřící mikrofon Earthworks M50, zesilovač YAMAHA AX-496 a měřená akustická soustava Tesla V6804, výrobní číslo 309487.

Blokové schéma zapojení obr.3.1. :



**Obr. 3.1:** Blokové schéma zapojení měřícího řetězce pro akustická měření

Po spuštění analyzátoru je nutné projít několik základních nastavení pomocí programového průvodce:

- Připojení měřícího mikrofону a reproduktorů ke zvukové kartě EASERA umožňuje pracovat s jakýmkoli vstupním i výstupním analogově digitálním převodníkem. Tento převodník (zvukovou kartu) je nutné připojit před spuštěním EASERA.
- Nastavení prostředí. Pomocí programového průvodce vybereme možnost "Room Acoustic Measurement" a zde z předem určených možností vybereme parametry prostředí jako je velikost místnosti a intenzita okolního hluku.
- Výběr zvukové karty. Nejprve vybereme námi zvolenou zvukovou kartu. V dalším kroku je nutné vybrat způsob zapojení. Mezi možnostmi zapojení je klasické zapojení, jeden vstup a jeden výstup, používané pro běžná akustická měření, ale také možnost porovnávat dva vstupy. Toto zapojení je vhodné pro měření útlumu neprůzvučných materiálů nebo pro porovnání akustického tlaku ve dvou různých místech prostoru. Další z možností je propojení vstupu s výstupem, díky čemuž lze provést elektronickou kalibraci jednoho z nich, ovšem tuto možnost můžeme použít pouze, pokud již máme jednu část měřícího řetězce zkalibrovanou. Pro základní akustická měření vystačíme s nastavením jeden vstup a jeden výstup.

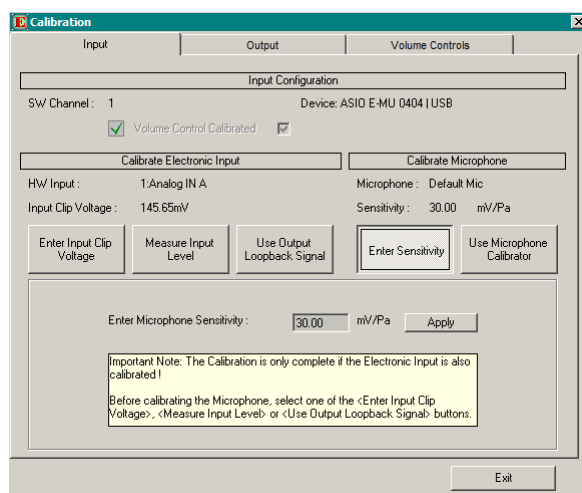
Po základním nastavení analyzátoru je potřeba provést kalibraci měřícího systému.

## 3.2 Kalibrace měřicího systému

Aby bylo zajištěno, že naměřené hodnoty analyzátoru EASERA odpovídají skutečným hodnotám, je potřebné kalibrovat všechny elektroakustické převodníky včetně všech elektronických komponentů. Kalibrace je soubor úkonů, který stanoví vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím systémem a skutečnými hodnotami. Proto je nutné kalibrovat nejen vstupní parametry, jako je citlivost mikrofону a vstupní citlivost analogově digitálního převodníku, ale také výstup převodníku.

Postup při kalibraci:

- Kalibrace mikrofону: Pro přesnou kalibraci mikrofону musíme znát jeho vstupní citlivost, kterou vyčteme z technických specifikací, udávané výrobcem mikrofону. Tato hodnota se udává v mV/Pa. Vyčtenou hodnotu zadáme do pole "Enter Microphone Sensitivity" viz obr.3.2.



Obr. 3.2: Kalibrace mikrofону v EASERA

- Kalibrace vstupu zvukové karty: Na vstup zvukové karty připojíme generátor, na kterém si nastavíme sinusový signál o amplitudě 100mV. Tuto hodnotu zadáme do pole "Enter voltage of generator signal" a poté spustíme tlačítkem start kalibraci. Program EASERA kalibrační poměr dopočítá sám.
- Kalibrace výstupu zvukové karty: Vzhledem k tomu, že již máme zkalibrovaný vstup, můžeme použít automatický kalibrátor EASERA. Pouze propojíme vstup s výstupem symetrickým mikrofonním kabelem a klikneme na tlačítko "Use loopback to input". Program EASERA sám spustí vnitřní generátor a pomocí vstupu indikuje výstupní napětí.

Po úspěšné kalibraci vybereme měřicí signál.

## 3.3 Signály pro měření (Stimulus)

EASERA nám umožňuje výběr mezi všemi signály používanými pro akustická měření. Každý z nich je vhodný pro jiný druh měření. Máme na výběr mezi analogovými šumovými signály, MLS sekvencí a postupně generovaným spojitým signálem.

### 3.3.1 Rozmítaný signál (Sweep signal)

Spojitý lineárně nebo logaritmicky přeladovaný sinusový signál obsahuje všechny frekvence v námi zvoleném frekvenčním rozsahu, pro zvolenou dobu měření. Tento signál se používá nejvíce k měření elektroakustických soustav. Není příliš vhodný pro měření prostorů, protože je velmi citlivý na interferenční jevy prostoru. Proto se v EASERA tímto signálem harmonické zkreslení měří.

### 3.3.2 Šumový signál (Noise signal)

Bílý šum (White noise) je signál, který pokrývá celý rozsah slyšitelných frekvencí, z nichž všechny disponují stejnou intenzitou. Růžový šum (Pink noise) nebo-li  $1/f$  šum je signál, který také pokrývá celý rozsah slyšitelných frekvencí, ale jeho výkon je nepřímo úměrný k frekvenci signálu. Výkon v kmitočtových pásmech s dvojnásobně rostoucí šířkou je u toho signálu konstantní. Šumové signály se začaly používat pro měření elektroakustických soustav s nástupem výpočetní techniky, dnes se více používá MLS sekvence, protože je méně náchylná na rušení.

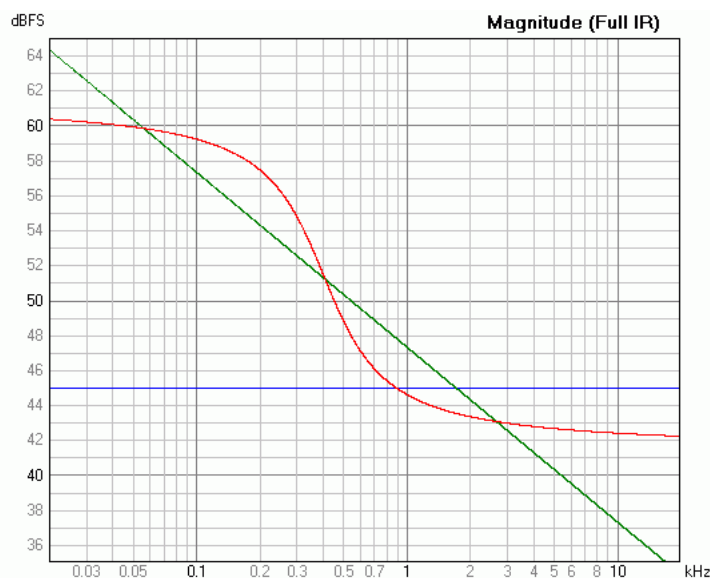
### 3.3.3 MLS signál (Maximum Length Sequence)

Signál je tvořen z řady bitů s logickou úrovní 0 a 1, kde 0 je záporná hodnota napětí a 1 je kladná hodnota. Posloupnost je generována tak, aby měl výsledný signál stejnosměrnou složku blízkou 0. Signál je generován jako periodická pseudonáhodná sekvence řadou posuvných registrů se zavedenou zpětnou vazbou. Je velmi odolný vůči šumu, který vzniká při měřicím procesu, proto je nevhodnější k měření akustických parametrů prostorů.

### 3.3.4 Možnost váhování měřicích signálů (Frequency Weighting)

Při měření reproduktorové soustavy není tato funkce nutná, ovšem pokud bychom chtěli změřit pouze některé reproduktory, například vysokotónové, mohlo by dojít k jejich poškození a je tedy nutné omezit výkon měřicího signálu v nízkých kmitočtech. U některých softwarových analyzátorů si můžeme váhovací křivku přizpůsobit potřebám měření, ale EASERA má bohužel váhovací křivku u jednotlivých signálů pevně danou a nelze ji upravit obr.3.3.

Po výběru signálu můžeme spustit tlačítkem "GO" měření.



**Obr. 3.3:** Váhovací křivka EASERA. Modrá křivka je pro případ bílý (white) signál, zelená pro růžový (pink) a červená je váhovaná (weighted) křivka.

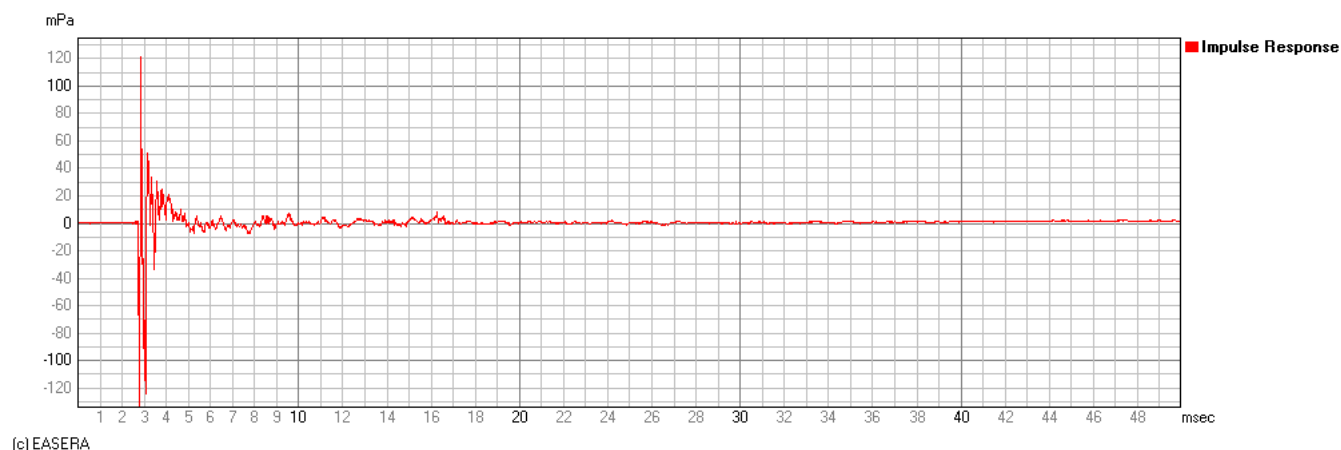
### 3.4 Měření impulsní odezvy

Poslechový prostor definujeme jako prostor, ve kterém dochází k produkci nebo reprodukci zvukových signálů. Reprodukce zvukových signálů je však spojena nejen s fyzickým poslechovým prostorem, ale také s celým elektroakustickým řetězcem, který má zásadní vliv na kvalitu reprodukce. Výchozí charakteristikou takového systému je impulsní odezva. Impulsní odezvu dostaneme, když na vstup soustavy přivedeme cyklický pseudonáhodný signál MLS, který touto soustavou prochází. Na výstupu dostaneme cyklický signál. Výsledná impulsní odezva je pak vypočítána ze vzájemné korelační funkce vstupního signálu a odezvy na výstupu soustavy. Z impulsní charakteristiky se vypočítávají i další parametry soustavy: časová obálka soustavy (křivka rozložení energie v čase) a kmitočtová charakteristika. Výsledná impulsní charakteristika by v ideálním případě měla obsahovat pouze jeden impuls, který má maximální amplitudu signálu. Ovšem při reálném měření v místnostech dochází k mnoha odrazům, které se nám v charakteristice projeví jako špičky. Při měření je nutné vyloučit vznik nelinearit během měřicího procesu, tzn. pracovat v úrovni takového akustického tlaku, který je měřená reproduktorová soustava schopna vyzářit bez vzniku nelineárního zkreslení.

#### 3.4.1 Měření v bezdozvukové komoře

Bezdozvuková komora je takový akustický prostor, v němž nedochází k odrazům akustických vln. Každá vlna, která vznikne uvnitř, je absorbována stěnami, a díky tomu nedochází k odrazům. Reproduktor je systém, který nepřenáší velmi nízké kmitočty nebo stejnosměrný signál, a proto by jeho reakce na impuls měla reprezentovat jeden výkmit s maximální strmostí a druhý (kompenzační) výkmit s opačnou výchylkou, který je ideálně

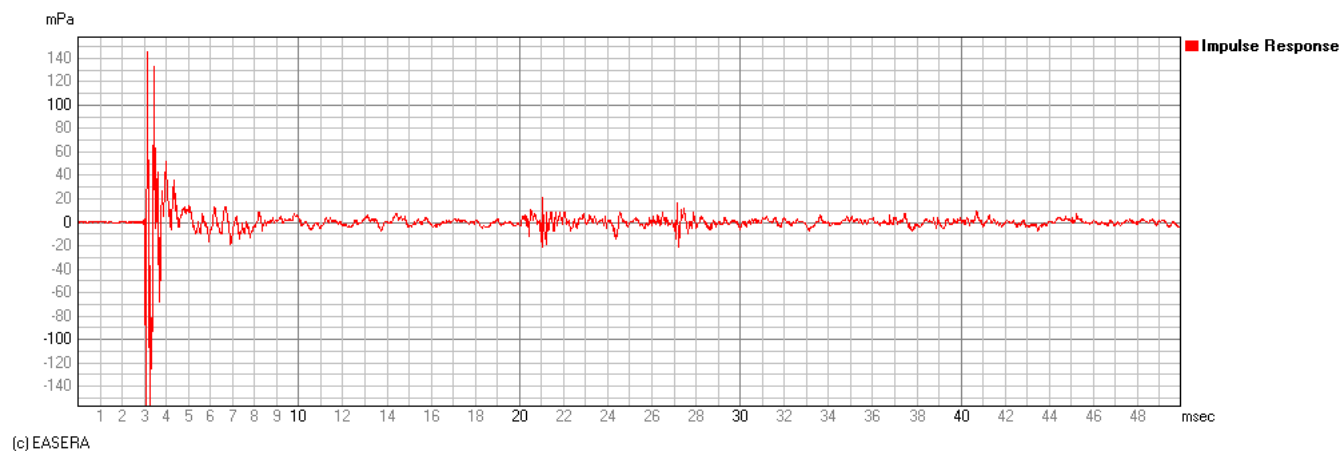
taktéž strmý. Bohužel průběh impulsní charakteristiky není ani zdaleka ideální. Vliv na ni má celý měřicí řetězec. Při použití kvalitních měřících komponentů má největší vliv reproduktor, protože má pomalejší průběh překmitu, který je dán rychlostí membrány [3]. Důsledkem je omezená kmitočtová charakteristika reproduktoru. Vzhledem k absenci možnosti měření v bezdozvukové komoře bereme jako referenční hodnotu měření ve volném prostoru, kde by nemělo docházet k žádným odrazům viz obr.3.4.



**Obr. 3.4:** Impulsní odezva akustické soustavy Tesla V6804 měřená ve volném prostoru

### 3.4.2 Měření v běžné poslechové místnosti

Pokud nemáme k dispozici bezdozvukovou komoru ani možnost měřit soustavu ve volném prostoru, je dobré měřenou soustavu umístit uprostřed místnosti, aby všechny odrazové plochy byly ve stejné vzdálenosti od měřené soustavy a projevíly se nám jako jedna špička nejdále od prvního pulsu. Impulsní odezva naměřená v učebně EK705 uprostřed v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1m od reproduktorové soustavy je znázorněna viz obr.3.5.



**Obr. 3.5:** Impulsní odezva akustické soustavy Tesla V6804 v učebně EK705



V impulsní odezvě obr. 3.5 jsou patrné 2 odrazy při 21ms a při 27ms. Tyto odrazy jsou způsobeny netlumenými zdmi a stropem v místnosti učebny. Rychlost zvuku je v běžné místnosti při 20 stupních 340 m/s. Z výsledné charakteristiky viz obr.3.5 je jasné, že první impuls přišel až ve 3ms, a proto musíme pro přesný výpočet vzdálenosti překážek tento čas odečíst. První odraz odpovídá vzdálenosti přibližně 3 m a druhý přibližně 4,6 m. Výpočet viz rov.3.1, kde  $t(n)$  je doba návratu,  $l(p)$  je vzdálenost překážky a  $c$  je rychlost zvuku ve vzduchu.

$$t_n = \frac{2l_p}{c} \quad (3.1)$$

### 3.5 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika reproduktorové soustavy

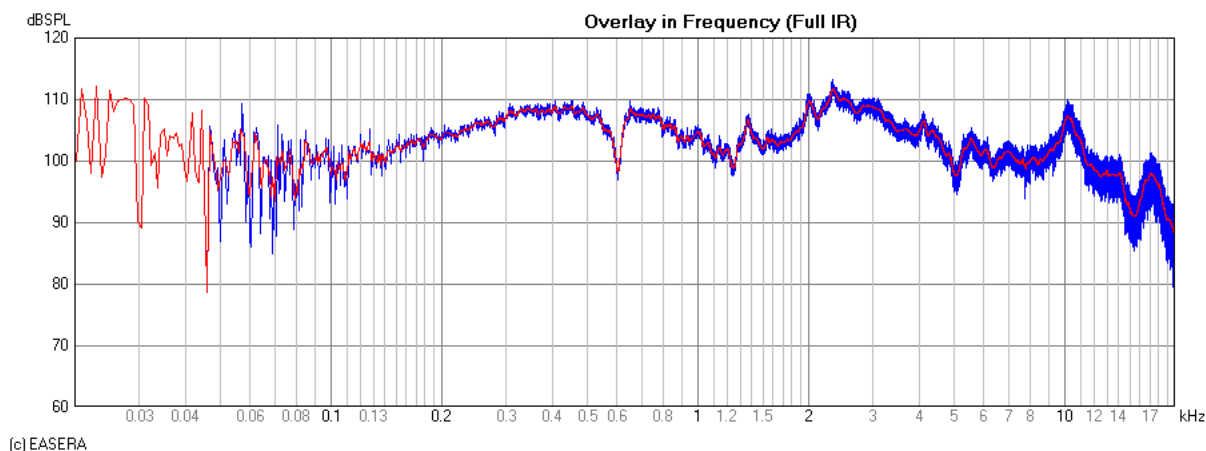
Amplitudová frekvenční charakteristika soustavy je závislost hladiny akustického tlaku soustavy na frekvenci. Měla by být co možná nejvyrovnanější. Umožňuje nám stanovit frekvenční rozsah reproduktorů. Frekvenční charakteristiku je ideální měřit v bezdozvukové komoře stejně jako impulsní odezvu. Pokud tuto možnost nemáme, je vhodné měřit soustavu ve volném prostoru, kde se projeví jen odraz od země. Další možností je měření v poloprostoru, kdy reproduktor položíme na zem směrem vzhůru, čímž se částečně zbavíme odrazu od země. Odrazu se bohužel nezbavíme úplně. Nejméně vhodné je měření v poslechovém prostoru, protože každá místnost má rezonance při různých frekvencích. Tyto rezonance způsobují velké vrcholy a poklesy v frekvenční charakteristice. Při měření frekvenční charakteristiky je velmi důležitá směrovost reproduktoru. Pro referenční výsledky musí být mikrofon umístěn v ose reproduktorů, ve vzdálenosti 1m od měřené reproduktorové soustavy a musí být dodáván výkon 1W. Výkon zesilovače snadno změříme voltmetrem za použití rovnice pro přepočítání viz rov. 3.2. Pro soustavu Tesla V6804 platí, že impedance soustavy  $Z$  je 4 ohmy. Napětí musí být tedy 2V. Pro měření charakteristiky se nejčastěji používá růžový šum (pink noise) nebo MLS sekvence, která je více odolná proti okolnímu rušení.

$$U = \sqrt{PZ} \quad (3.2)$$

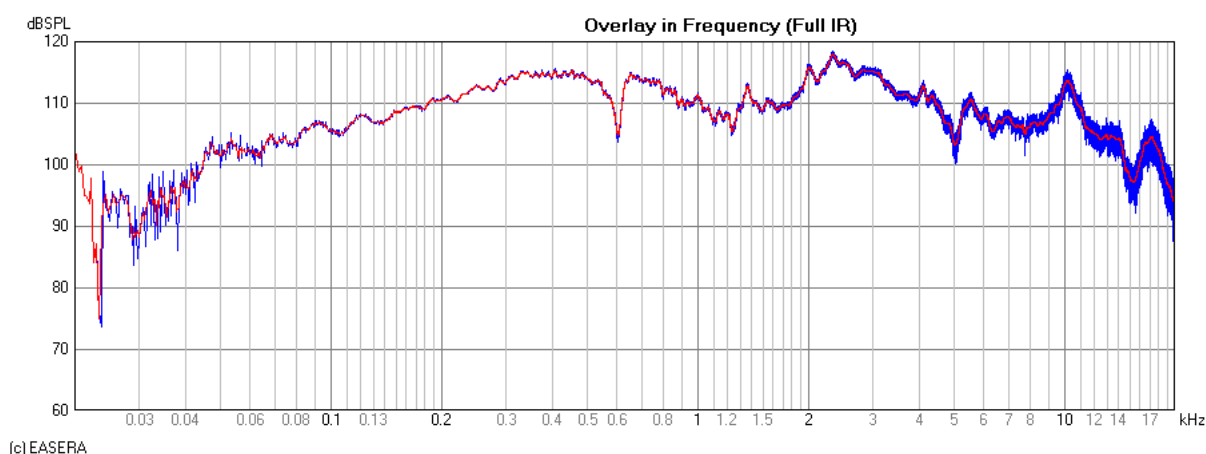
#### 3.5.1 Měření v otevřeném poloprostoru

Pokud nemůžeme použít bezdozvukovou komoru, použijeme měření v otevřeném prostoru. Abychom co nejvíce eliminovali jakýkoliv odraz, položíme měřenou akustickou soustavu (Tesla V6804) na zem, aby vyzařovala vzhůru. Tímto opatřením se zbavíme téměř veškerých odrazů a vlivů ploch a zdí. Výsledná frekvenční charakteristika je v dolním frekvenčním pásmu zatížena chybou při měření, která je způsobena špatnými povětrnostními podmínkami ale také tlakovým navýšením na nízkých kmitočtech vlivem vyzařování do

poloprostoru viz obr. 3.6. Abychom tyto chyby snížili, přidáme výkon dodávaný do soustavy z původního 1W na 4W viz obr. 3.7.



**Obr. 3.6:** Frekvenční charakteristika měřená v poloprostoru při příkonu 1W. Modrá křivka je nevyhlazená charakteristika, červená je vyhlazená 1/48.

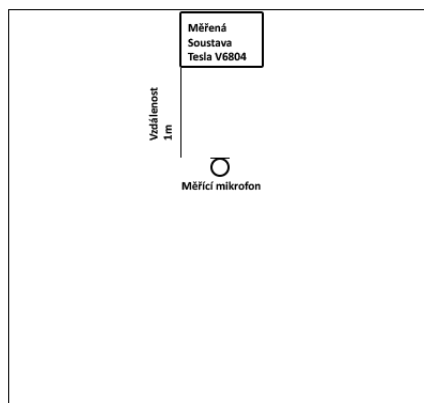


**Obr. 3.7:** Frekvenční charakteristika měřená v poloprostoru při příkonu 4W. Modrá křivka je nevyhlazená charakteristika, červená je vyhlazená 1/48.

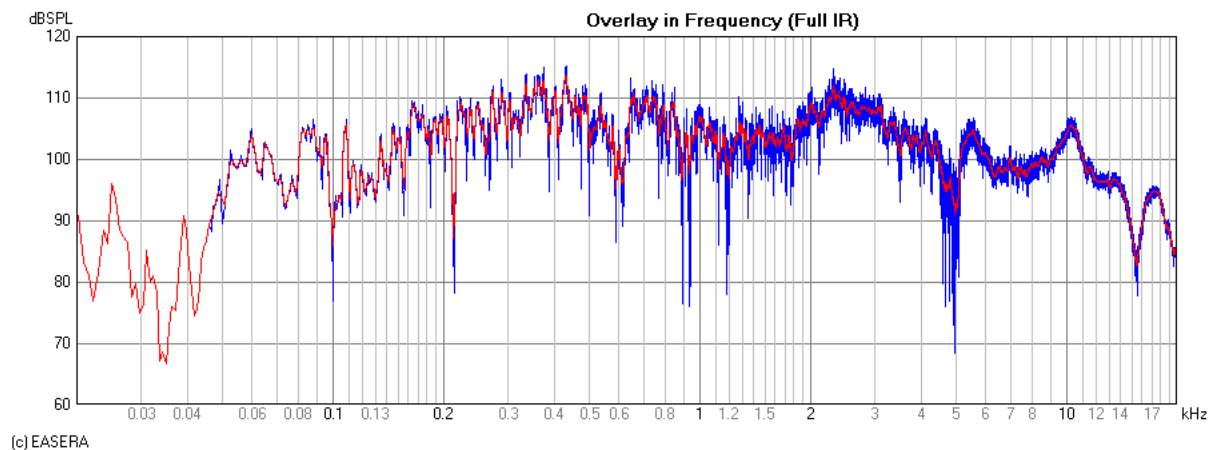
### 3.5.2 Měření v běžné poslechové místnosti

Pokud není možné měřit charakteristiku ani v bezdozvukové komoře ani v poloprostoru, přichází na řadu měření v běžné poslechové místnosti. Pro potřeby této bakalářské práce byla využita učebna EK705. Měřená soustava byla umístěna na kratší stěně uprostřed viz obr. 3.8. Z výsledné charakteristiky viz. obr. 3.9 je patrné, že oproti měření v poloprostoru dochází k velkému zvlnění frekvenční charakteristiky a to v celém pásmu. Toto zvlnění je způsobené odrazy v místnosti.

Měřený reprobox Tesla se skládá z jednoho 15 palcového středo-basového reproduktoru (ARO9408). a z šesti 3 palcových výškových reproduktorů (ARV168) obr.3.10.



**Obr. 3.8:** Umístění měřící soustavy v učebně EK705

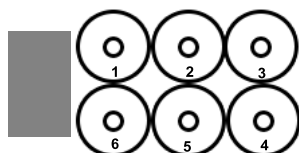


**Obr. 3.9:** Frekvenční charakteristika měřená v EK705 při příkonu 1W. Modrá křivka je nevyhlazená charakteristika, červená je vyhlazená 1/48.

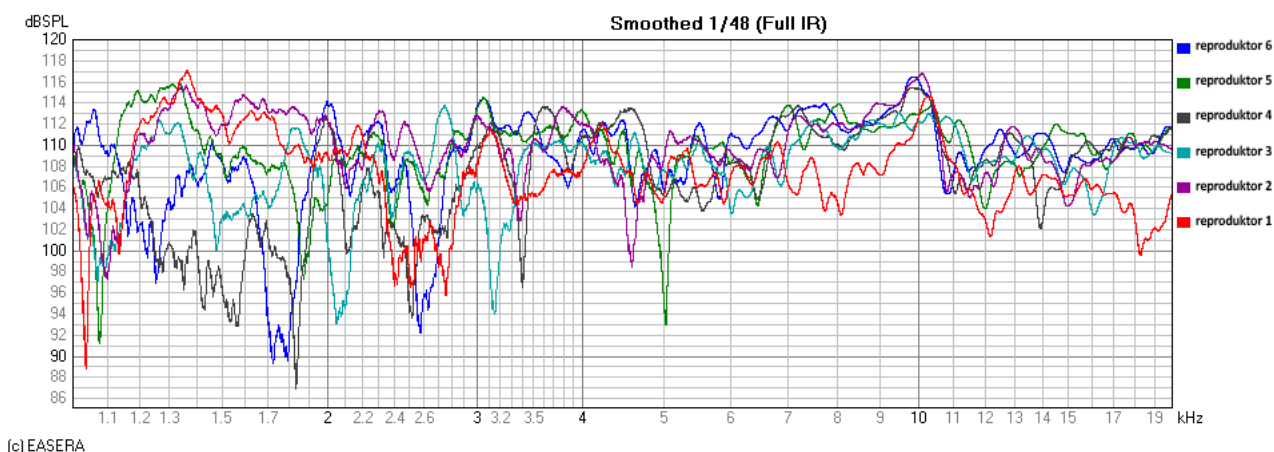


**Obr. 3.10:** Měřená akustická soustava Tesla V6804, výrobní číslo: 309487

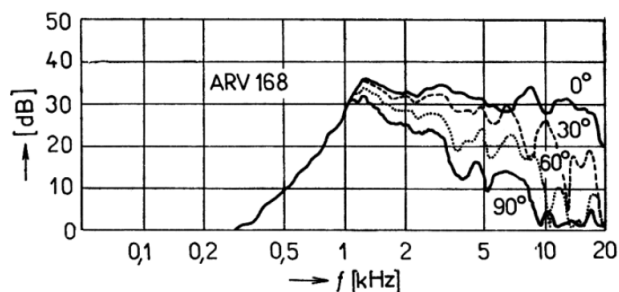
Vzhledem k tomu, že je výškový systém složen z 6 stejných reproduktorů, bylo by vhodné změřit frekvenční charakteristiky jednotlivých reproduktorů soustavy. Abychom co nejvíce eliminovali interference mezi jednotlivými reproduktory, musíme jejich charakteristiky měřit ve vzdálenosti 4 cm od membrány reproduktoru a ostatní reproduktory zakrýt kousky kartonu. Jednotlivé reproduktory jsme měřili v pořadí viz obr.3.11. EASERA umožňuje vykreslovat více měření do jednoho grafu, a proto můžeme díky barevnému odlišení porovnat charakteristiky všech 6 vysokotónových reproduktorů obr.3.12.



**Obr. 3.11:** Schéma postupu měření jednotlivých výškových reproduktorů



**Obr. 3.12:** Frekvenční charakteristika jednotlivých výškových reproduktorů soustavy Tesla V6804

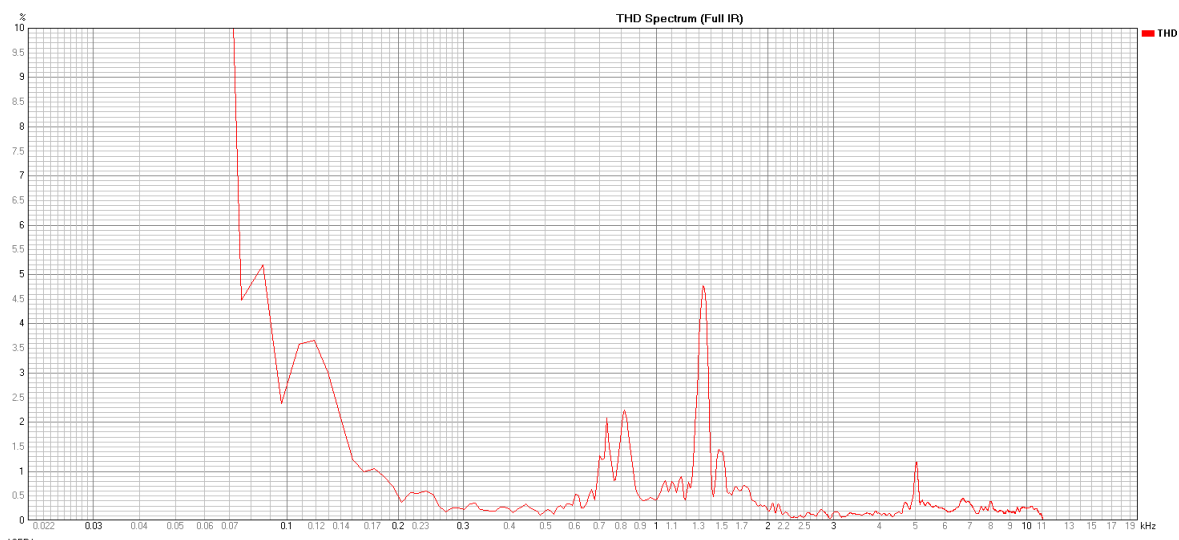


**Obr. 3.13:** Frekvenční charakteristika výškového reproduktoru Tesla udávaná výrobcem

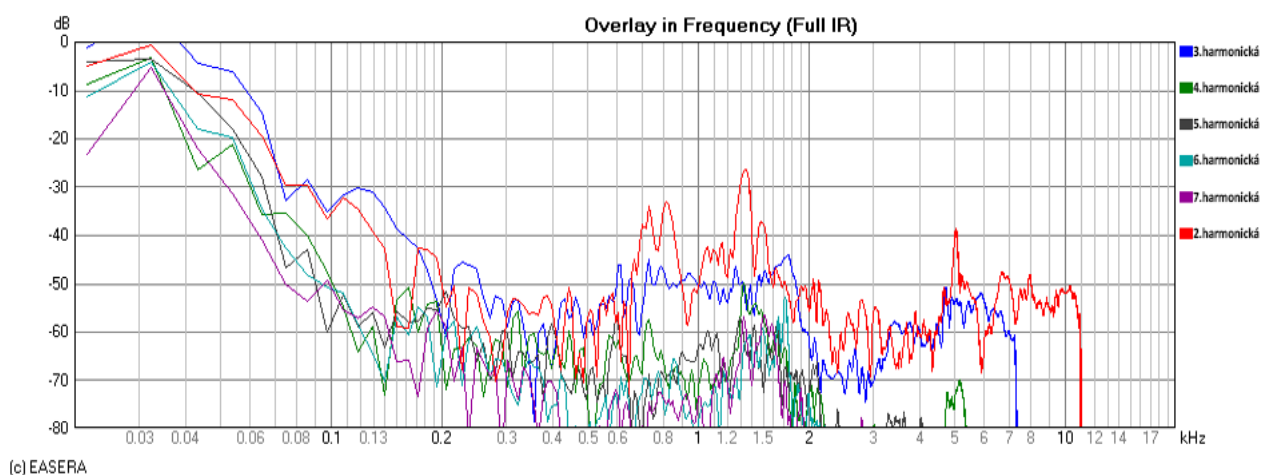
Z grafu je zřejmé, že všechny reproduktory nemají stejnou charakteristiku.

### 3.6 Nelineární zkreslení reproduktorové soustavy

Jedním z nejdůležitějších parametrů každé akustické soustavy je zkreslení. V EASERA je tento parametr uveden celkovým činitelem harmonického zkreslení THD (Total Harmonic Distortion). THD se vyjadřuje v procentech. Abychom mohli zkreslení v EASERA změřit, je nutné použít logaritmicky rozmítaný signál (Log-Sweep). Měření není možné provádět v učebně EK705, a musí tedy být provedeno v poloprostoru. Z výsledné charakteristiky obr.3.14 je patrné velké zkreslení na frekvenci 1,3 kHz způsobené reproduktory. Další charakteristikou je zkreslení vyššími harmonickými. EASERA zobrazuje zkreslení až do sedmé harmonické obr.3.15, pro bližší představu zkreslení -80dB odpovídá hodnotě přibližně 0,01% THD [4].



Obr. 3.14: Nelineární zkreslení soustavy Tesla V6804 měřené v poloprostoru.

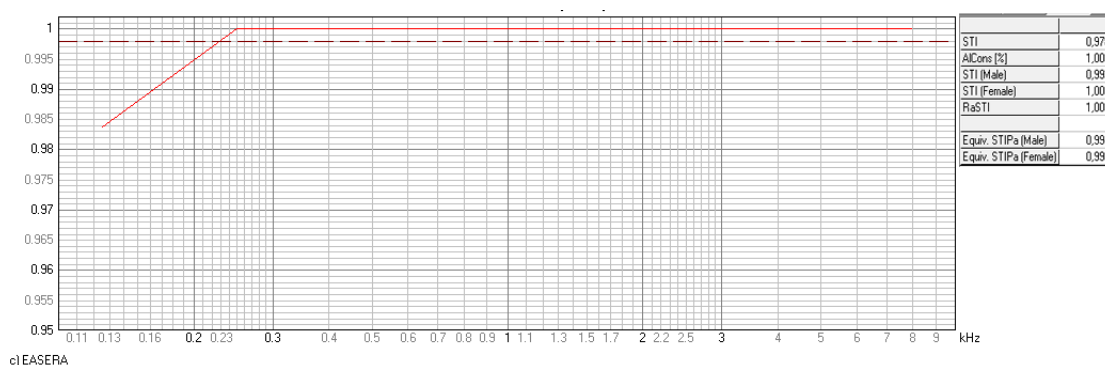


(c) EASERA

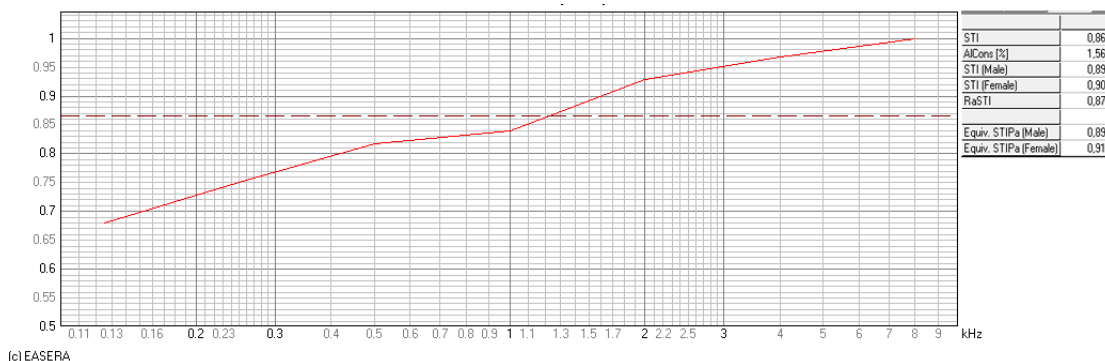
Obr. 3.15: Zkreslení vyšších harmonických soustavy Tesla V6804 měřené v poloprostoru

### 3.7 Měření indexu přenosu řeči

Tento parametr nám ukazuje, jak prostor ovlivňuje srozumitelnost řeči. Nabývá hodnot od 0 do 1. Hodnota 1 znamená, že řeč je dokonale srozumitelná. Výstupem z analyzátoru je nejen hodnota STI pro muže (male) a pro ženy (female), ale také graf srozumitelnosti v jednotlivých pásmech. Abychom získali referenční měření, změřili jsme tento parametr nejprve v poloprostoru. Z charakteristiky viz obr.3.16, ale i z hodnot měření je jasné, že není problém s přenosem mužské ani ženské řeči. Nepatrný pokles srozumitelnosti je pouze v frekvenčním pásmu 125Hz. Tento pokles je způsoben povětrnostními podmínkami během měření. Oproti tomu měření STI v učebně EK705 za stejných podmínek jako měření frekvenční charakteristiky ukázalo, že dochází k poklesu srozumitelnosti nižších kmitočtů obr.3.17, a tudíž i ke snížení celkové srozumitelnosti.



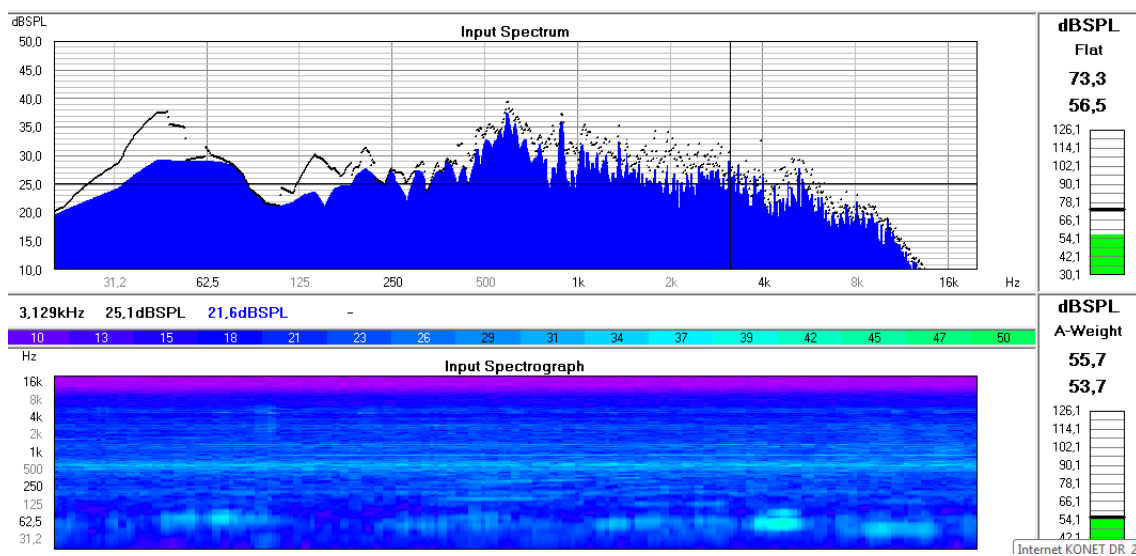
Obr. 3.16: Index přenosu řeči v poloprostoru



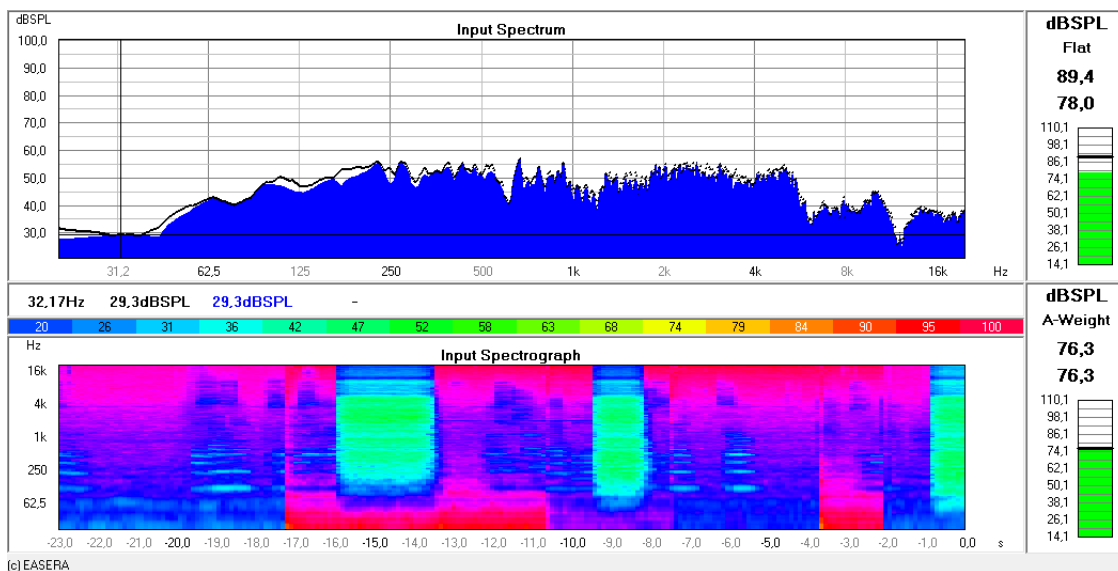
Obr. 3.17: Index přenosu řeči v učebně EK705

### 3.8 Měření šumového pozadí v místnosti

Pro měření šumového pozadí v místnosti použijeme funkci "Real time Analysis" (měření v reálném čase), která nám zobrazuje frekvenční spektrum šumového pozadí, hladinu akustického tlaku dB SPL nebo dBFS, ale také spektrogram. Obr. 3.18 ukazuje měření v tiché místnosti a obr. 3.19 znázorňuje měření během rozhovoru.



Obr. 3.18: Šumové pozadí místnosti v klidu



Obr. 3.19: Šumové pozadí místnosti během rozhovoru

# 4

## Laboratorní úlohy s využitím analyzátoru EASERA

### 4.1 Měření impulsní a frekvenční charakteristiky pomocí MLS signálu

Cílem této úlohy je změřit frekvenční charakteristiku dané reproduktorové soustavy a její impulsní odezvu, dále stanovit frekvenční rozsah měřené soustavy, seznámit se se softwarovým analyzátozem EASERA, s postupem při kalibraci měřícího řetězce a dopočítat vzdálenost jednotlivých odrazných ploch z impulsní charakteristiky.

#### 4.1.1 Zadání a cíl úlohy

- 1) Seznamte se s analyzátozem EASERA s jeho základními měřícími funkcemi.
- 2) Zapojte měřící řetězec pro akustická měření. Proveďte kalibraci celého měřícího řetězce. Pro kalibraci použijte parametry jednotlivých prvků měřícího řetězce které jsou udávány výrobcem.
- 3) Změřte impulsní odezvu dané soustavy pomocí MLS sekvence a vysvětlete její průběh.
- 4) V impulsní odezvě dopočítejte vzdálenost jednotlivých odrazů.
- 5) Změřte frekvenční charakteristiku.

#### 4.1.2 Teorie k úloze

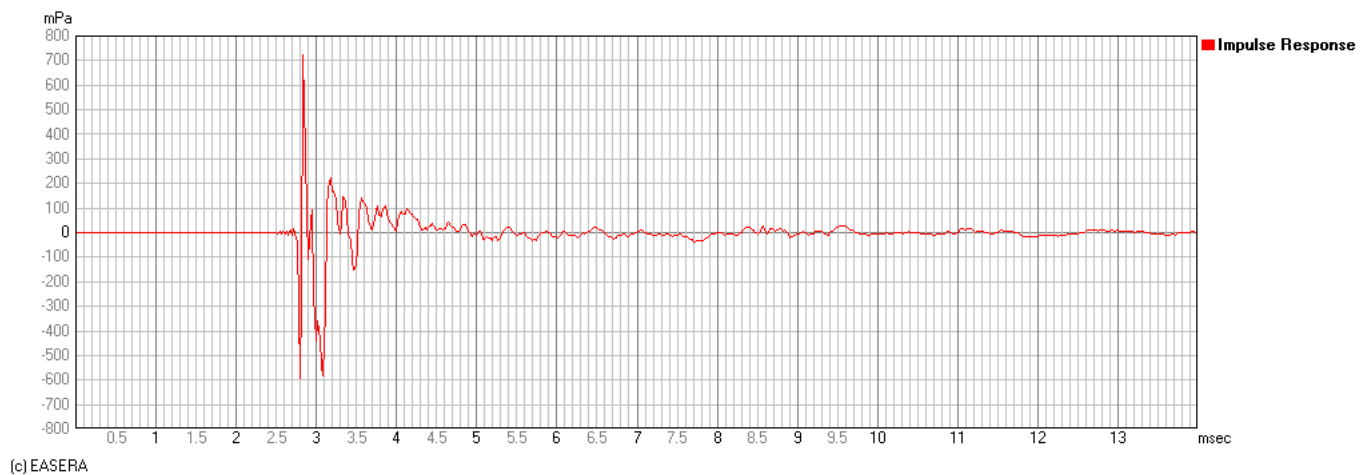
Impulsní odezva systému je definována jako výstupní signál, který nastane, když na vstup systému přivedeme Diracův impuls, který nabývá v  $t=0$  maximální amplitudy a je co možná nejkratší. Impulsní charakteristiku získáme pomocí konvolučního teorému, který nám říká, že pro každý vstupní impuls do LTI (lineárně časově nezávislý systém) je výstupem diskrétní konvoluce vstupního signálu a impulsní odezvy. Diskrétní konvolucí se myslí



rozložení vstupního signálu na součet zmenšených a časově posunutých pulsů. Výsledná impulsní charakteristika by v ideálním případě měla obsahovat dva po sobě jdoucí signály o amplitudě  $\pm 1$ . Ovšem při reálném měření v místnostech dochází k mnoha odrazům, které se nám v charakteristice projeví jako špičky. Díky těmto špičkám můžeme vypočítat vzdálenost překážek dle rovnice 4.2 kde  $t_n$  je doba návratu signálu po odražení,  $l(p)$  je vzdálenost překážky a  $c$  je rychlost zvuku ve vzduchu která je při 20 stupních přibližně 340m/s.

$$p(t) = \int_0^{\infty} u(r)h(t-r)dt \quad (4.1)$$

$$t_n = \frac{2l_p}{c} \quad (4.2)$$



**Obr. 4.1:** Impulsní charakteristika měřená v otevřeném prostoru (bez odrazů)

Frekvenční charakteristika je závislost hladiny akustického tlaku v určitém bodě měření na frekvenci při konstantním napětí na reproduktoru. Získává se kmitočtovou transformací impulsní charakteristiky. Frekvenční charakteristika ideální zvukové soustavy by byla rovná přímka, ovšem v reálných podmínkách tomu tak není. Dochází zde ke zvlnění vlivem vlastních reproduktorů, které nelze konstruovat tak, aby měly vyrovnanou frekvenční charakteristiku v celém poslechovém pásmu 20Hz-20kHz. Frekvenční charakteristiku zvukového systému můžeme kompenzovat různými nástroji jako například equalizéry a digitálními procesory. Abychom věděli, jaké frekvence je třeba zdůraznit případně potlačit, je nutné znát přesnou frekvenční charakteristiku reproduktorů.

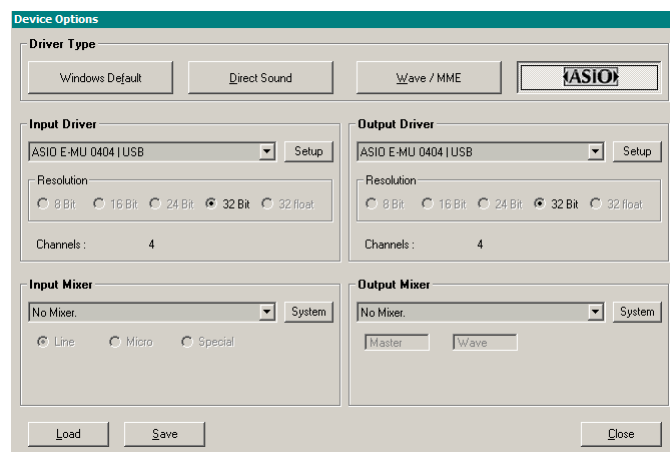
### 4.1.3 Potřebné komponenty pro měření

- Analogově digitální převodník: externí zvuková karta E-MU 4040
- Měřicí mikrofón: Earthworks M50

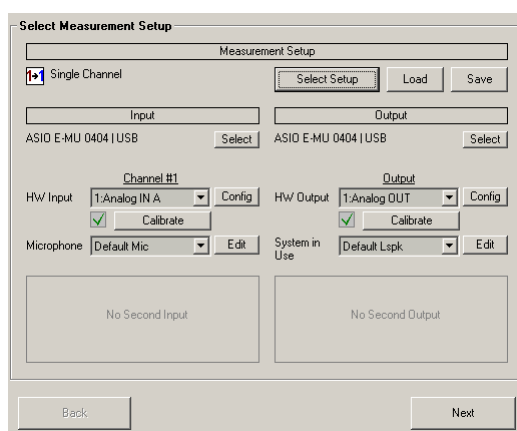
- Mikrofonní stojan
- Mikrofonní kabel s konektory XLR
- Zesilovač YAMAHA AX-496
- Měřená soustava Tesla V6804
- Generátor sinusového signálu s výstupem XLR

#### 4.1.4 Základní nastavení analyzátoru a provedení kalibrace

1) Po spuštění EASERA vybereme z menu možnost "measure", tedy měření. Dále je nutné zvolit, s jakou zvukovou kartou budeme pracovat, v našem případě vybereme možnost "ASIO directX full duplex driver" obr.4.2. V seznamu HW input vybereme možnost "input1" obr.4.3. Klikneme na tlačítko calibrate a provedeme kalibraci pomocí následujících kroků:



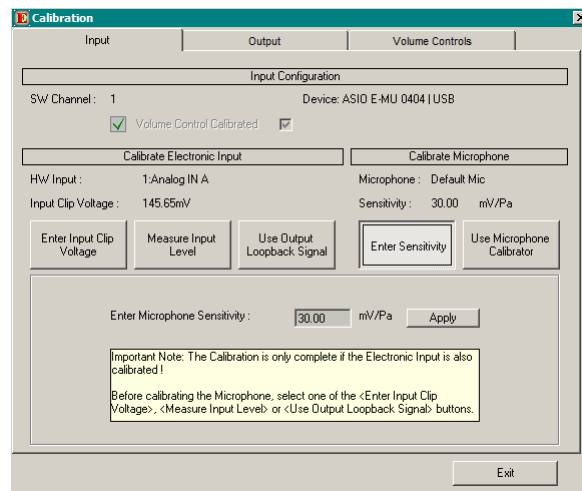
Obr. 4.2: Výběr zvukové karty v EASERA



Obr. 4.3: Výběr vstupu v EASERA

- Kalibrace mikrofону (Calibrate Microphone):

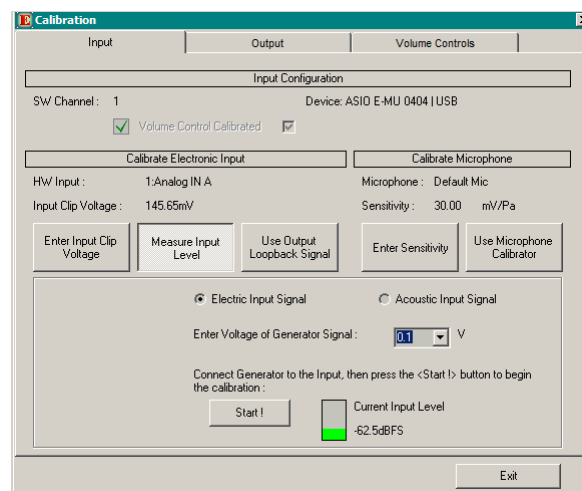
Pro přesnou kalibraci mikrofónu musíme znát jeho vstupní citlivost, kterou vyčteme z technických specifikací udávaných výrobcem mikrofónu. Pro případ mikrofónu Eathworks M50 je tato hodnota 30mV/Pa. Tuto hodnotu zadáme do pole "Enter Microphone Sensitivity" obr.4.4.



Obr. 4.4: Kalibrace mikrofónu v EASERA

- Kalibrace vstupu zvukové karty (Calibrate electronic input):

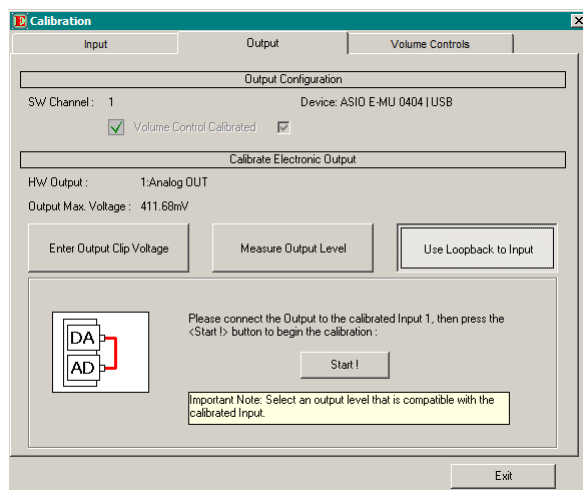
Na vstup 1 u zvukové karty připojíme generátor, na kterém si nastavíme sinusový signál o amplitudě 100mV. Tuto hodnotu zadáme do pole "Enter voltage of generator signal" obr.4.5. Na zvukové kartě si nastavíme vstupní potenciometr A HI-Z/LINE tak, aby nedocházelo ke clippingu, a poté spustíme tlačítkem "start" kalibraci. Program EASERA kalibrační poměr dopočítá sám. Potenciometrem již nesmíme v průběhu měření hýbat!



Obr. 4.5: Kalibrace vstupu v EASERA

- Kalibrace výstupu zvukové karty (Calibrate electronic output):

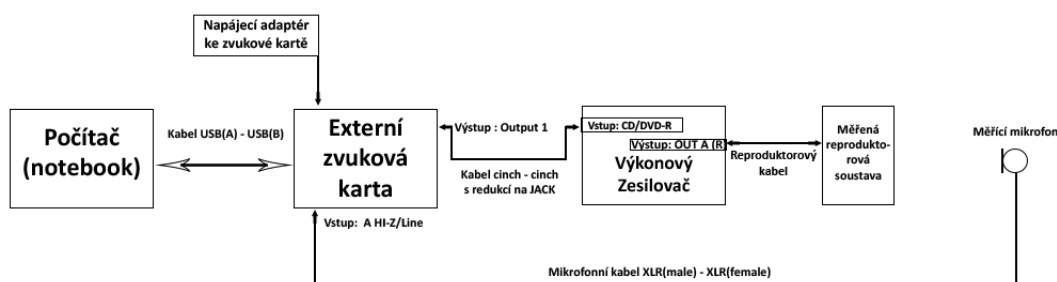
Vzhledem k tomu, že již máme zkalibrovaný vstup, můžeme použít automatický kalibrátor EASERA. Pouze propojíme vstup s výstupem symetrickým mikrofonním kabelem a klikneme na tlačítko "Use loopback to input" obr.4.6. Program EASERA sám spustí vnitřní generátor a pomocí vstupu indikuje hodnotu výstupního napětí. Potenciometr "Main output" na zvukové kartě nastavíme na střed. Zde opět platí, že s ním během měření nesmíme hýbat.



Obr. 4.6: Kalibrace výstupu v EASERA

Pokud jsme provedli kalibraci správně, objeví se nám vedle tlačítka calibrate zelený znak fajfky.

#### 4.1.5 Blokové schéma zapojení měření

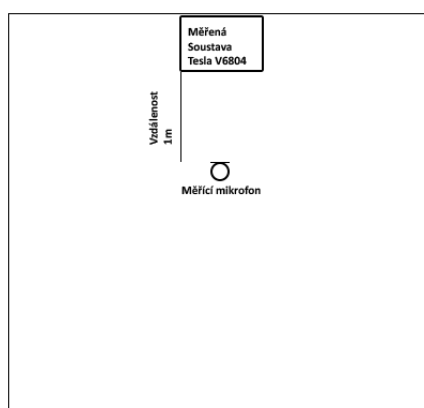


Obr. 4.7: Schema zapojení měřicího řetězce pro akustická měření

#### 4.1.6 Postup zapojení měřicí soustavy

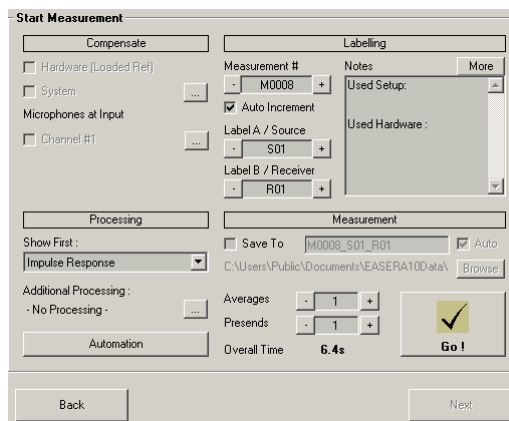
- 1) Počítač se zvukovou kartou propojíme kabelem USB(A)-USB(B).
- 2) Připojíme externí adaptér do zvukové karty.

- 3) Do výstupu (out 1) zvukové karty, který je na zadní straně, připojíme kabel Cinch-cinch, jeho druhý konec připojíme do zesilovače (vstup CD/DVD (R)).
- 4) Výstup zesilovače (out A) propojíme s reproduktorovou soustavou.
- 5) Mikrofon zapojíme do vstupu 1 zvukové karty a zapneme fantomové napájení.
- 6) Zapneme zvukovou kartu, zesilovač, hlavní potenciometr nastavíme na střed. Na zesilovači vybereme jako vstupní signál CD, dále nastavíme "CD/DVD direct", toto opatření nám vypne korekce zesilovače.
- 7) Mikrofon umístíme ve vzdálenosti 1m od reproduktorů a namíříme na střed mezi výškové reproduktory a basový reproduktor.

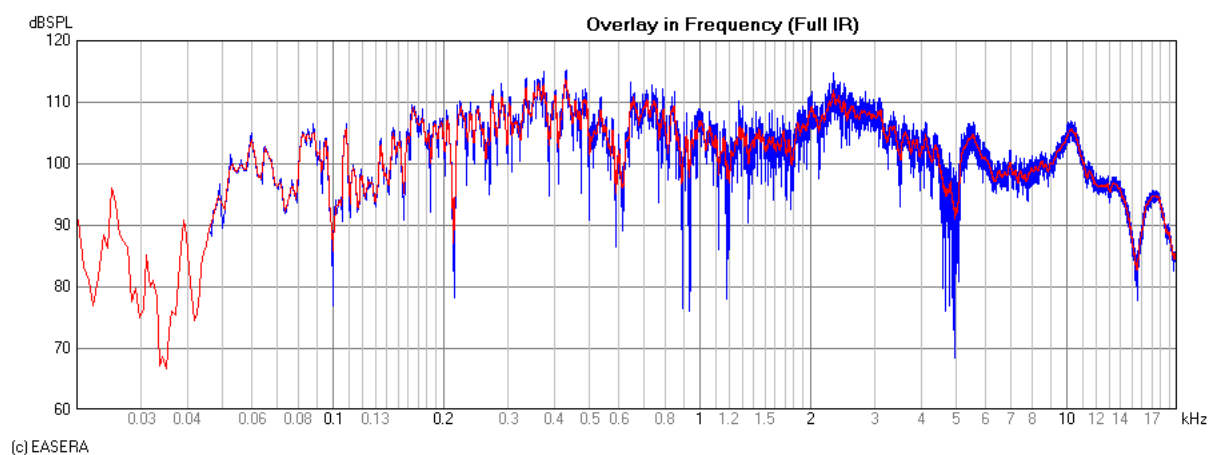


**Obr. 4.8:** Umístění měřící soustavy v učebně EK705

- 2) Vybereme měřící signál. Pro toto měření je nejvhodnější signál MLS white, vzorkovací frekvence (sampling rate): 44,100 kHz, čas měření (signal time): 3s. Zkusíme test signálu a pokud je vše v pořádku, tlačítkem "GO" spustíme měření obr.4.9. Výsledek měření se nám zobrazí v tomtéž okně. Pokud chceme lépe identifikovat jednotlivé odrazy, můžeme si pomocí úpravy os grafu křivku přiblížit a to pouhým kliknutím na jakoukoliv osu.
- 3) Analyzátor EASERA vypočítává všechny ostatní parametry ze změřené impulsní charakteristiky, proto není nutné pro zjištění frekvenční charakteristiky opakovat měření. Stačí pouze v pravém menu vybrat možnost "frequency magnitude". Aby bylo možné stanovit frekvenční rozsah, je lepší si frekvenční charakteristiku vyhladit. Tuto funkci nalezneme v EASERA v záložce "more". Můžeme si vybrat z více poměrů vyhlazení od 1/96 až po 1/1. Výsledná charakteristika viz obr.4.10.



Obr. 4.9: Spouštěcí okno pro měření EASERA



Obr. 4.10: Frekvenční charakteristika měřená v EK705. Modrá křivka je nevyhlazená charakteristika, červená je vyhlazená 1/48.

## 4.2 Měření frekvenční charakteristiky pomocí více měřících signálů a měření nelineárního zkreslení

Cílem této úlohy je porovnat různé měřící signály, které můžeme použít při měření frekvenční charakteristiky, dále změřit nelineární zkreslení dané reproduktorové soustavy.

### 4.2.1 Zadání a cíl úlohy

- 1) Zapojte měřící řetězec pro akustická měření a proveďte kalibraci celého tohoto řetězce.
- 2) Změřte frekvenční charakteristiku pomocí MLS sekvence.
- 3) Změřte frekvenční charakteristiku pomocí růžového šumu (pink noise).
- 4) Změřte frekvenční charakteristiku pomocí rozmítaného signálu (sweep signal).
- 5) Všechny změřené charakteristiky vložte do jedné a porovnejte.
- 6) Pomocí logaritmicky rozmítaného signálu (log-sweep) změřte nelineární zkreslení (THD) dané soustavy.

### 4.2.2 Teorie k úloze

Frekvenční charakteristika je závislost hladiny akustického tlaku v určitém bodě měření na frekvenci při konstantním napětí na reproduktoru. Získává se frekvenčním rozložením impulsní charakteristiky. Pro měření frekvenční charakteristiky můžeme použít různé druhy signálů. Mezi nejpoužívanější měřící signál patří šum (noise). Šum pro akustická měření je signál, který pokrývá celý rozsah slyšitelných frekvencí (20Hz-20kHz). Méně používaným signálem pro měření frekvenční charakteristiky je rozmítaný (sweep) signál, jedná se o spojitý přeladovaný sinusový signál. S rozvojem digitální techniky byl vytvořen MLS signál (Maximum length Sequence). Tento signál je tvořen řadou bitů s logickou úrovní 0 a 1. Posloupnost je generována tak, aby měl výsledný signál stejnosměrnou složku blížíící se 0. Je velmi odolný vůči šumu a vůči rušivým vlivům v okolí. Jedním z nejdůležitějších parametrů každé akustické soustavy je zkreslení. V EASERA je tento parametr uveden činitelem celkového harmonického zkreslení THD (Total Harmonic Distortion). THD se vyjadřuje v procentech. Abychom mohli zkreslení v EASERA změřit, je nutné použít logaritmicky rozmítaný signál (Log-Sweep).

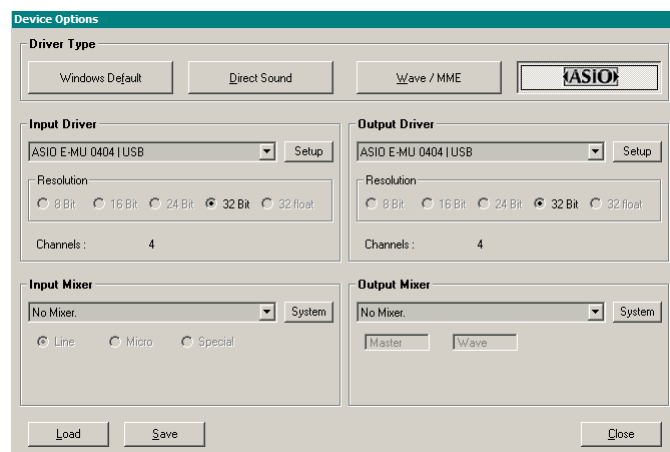
### 4.2.3 Potřebné komponenty pro měření

- Analogově digitální převodník: externí zvuková karta E-MU 4040
- Měřící mikrofon: Earthworks M50

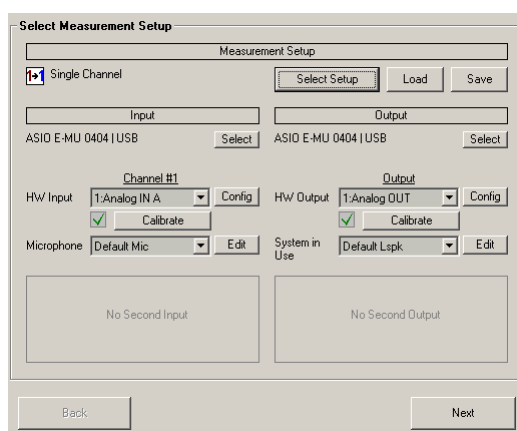
- Mikrofonní stojan
- Mikrofonní kabel s konektory XLR
- Zesilovač YAMAHA AX-496
- Měřená soustava Tesla V6804
- Generátor sinusového signálu s výstupem XLR

#### 4.2.4 Základní nastavení analyzátoru a provedení kalibrace

1) Po spuštění EASERA vybereme z menu možnost "measure", tedy měření. Dále je nutné zvolit, s jakou zvukovou kartou budeme pracovat, v našem případě vybereme možnost "ASIO directX full duplex driver" obr.4.11. V seznamu HW input vybereme možnost "input1" obr.4.12. Klikneme na tlačítko calibrate a provedeme kalibraci pomocí následujících kroků:



Obr. 4.11: Výběr zvukové karty v EASERA

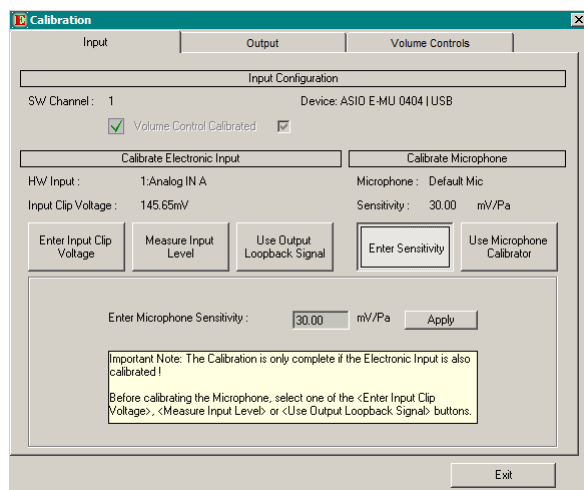


Obr. 4.12: Výběr vstupu v EASERA



- Kalibrace mikrofону (Calibrate Microphone):

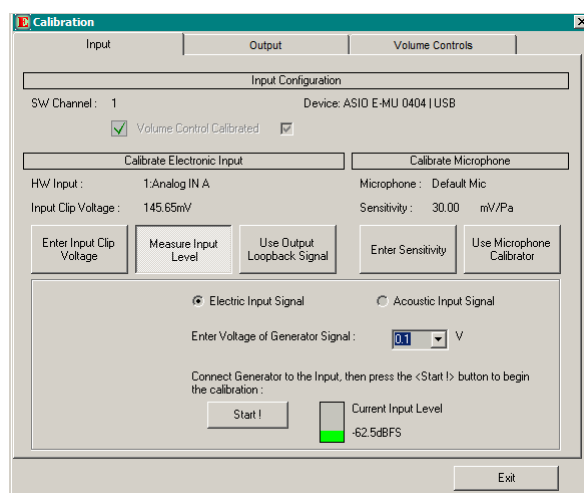
Pro přesnou kalibraci mikrofónu musíme znát jeho vstupní citlivost, kterou vyčteme z technických specifikací udávaných výrobcem mikrofónu. Pro případ mikrofónu Eathworks M50 je tato hodnota 30mV/Pa. Tuto hodnotu zadáme do pole "Enter Microphone Sensitivity" obr.4.13.



Obr. 4.13: Kalibrace mikrofónu v EASERA

- Kalibrace vstupu zvukové karty (Calibrate electronic input):

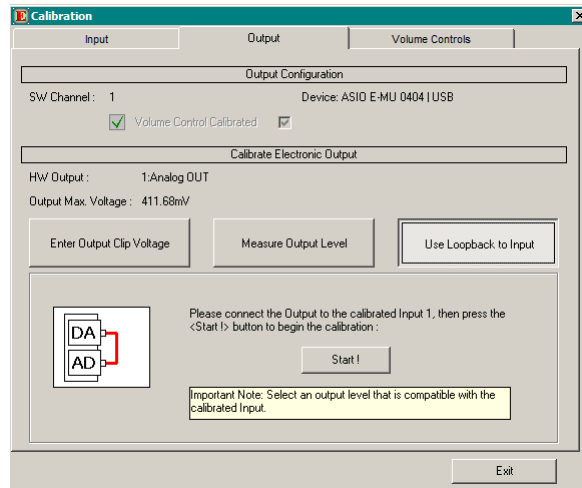
Na vstup 1 u zvukové karty připojíme generátor, na kterém si nastavíme sinusový signál o amplitudě 100mV. Tuto hodnotu zadáme do pole "Enter voltage of generator signal" obr.4.14. Na zvukové kartě si nastavíme vstupní potenciometr A HI-Z/LINE tak, aby nedocházelo ke clippingu, a poté spustíme tlačítkem "start" kalibraci. Program EASERA kalibrační poměr dopočítá sám. Potenciometrem již nesmíme v průběhu měření hýbat!



Obr. 4.14: Kalibrace vstupu v EASERA

- Kalibrace výstupu zvukové karty (Calibrate electronic output):

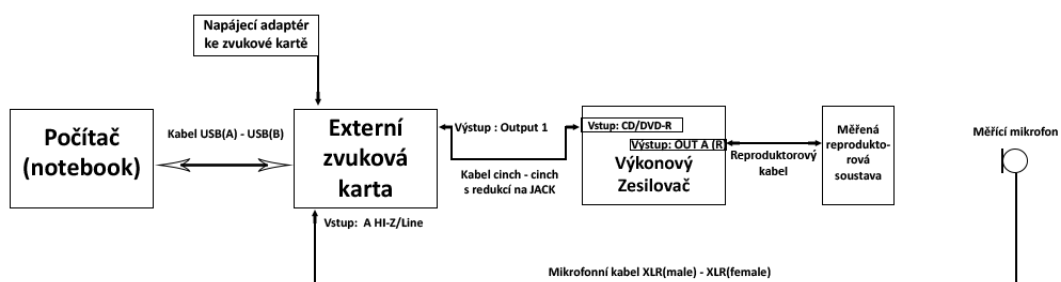
Vzhledem k tomu, že již máme zkalibrovaný vstup, můžeme použít automatický kalibrátor EASERA. Pouze propojíme vstup s výstupem symetrickým mikrofonním kabelem a klikneme na tlačítko "Use loopback to input" obr.4.15. Program EASERA sám spustí vnitřní generátor a pomocí vstupu indikuje hodnotu výstupního napětí. Potenciometr "Main output" na zvukové kartě nastavíme na střed. Zde opět platí, že s ním během měření nesmíme hýbat.



Obr. 4.15: Kalibrace výstupu v EASERA

Pokud jsme provedli kalibraci správně, objeví se nám vedle tlačítka calibrate zelený znak fajfky.

#### 4.2.5 Blokové schéma zapojení měření

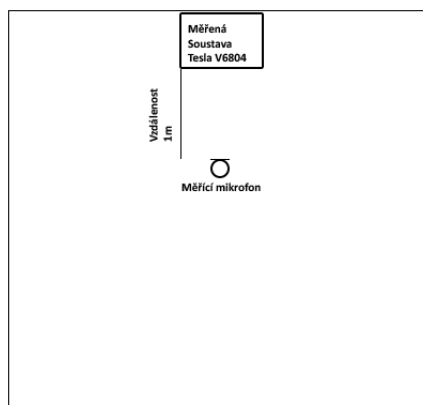


Obr. 4.16: Schema zapojení měřicího řetězce pro akustická měření

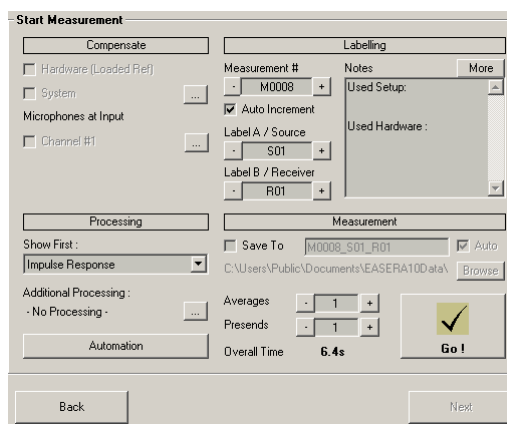
#### 4.2.6 Postup zapojení měřicí soustavy

- 1) Počítač se zvukovou kartou propojíme kabelem USB(A)-USB(B).
- 2) Připojíme externí adaptér do zvukové karty.

- 3) Do výstupu (output 1) zvukové karty který je na zadní straně připojíme kabel Cinch-cinch jeho druhý konec připojíme do zesilovače (vstup CD/DVD (R)).
- 4) Výstup zesilovače (out A (R)) propojíme s reproduktorovou soustavou.
- 5) Mikrofon zapojíme do vstupu 1 zvukové karty a zapneme fantomové napájení.
- 6) Pokud jsme dosud neučinili tak zapneme zvukovou kartu, zesilovač hlavní potenciometr nastavíme na střed. Na zesilovači vybereme jako vstupní signál CD dále nastavíme "CD/DVD direct" toto opatření nám vypne korekce zesilovače.
- 7) Mikrofon umístíme ve vzdálenosti 1m od reproduktorů a namíříme na střed mezi výškové reproduktory a basový.



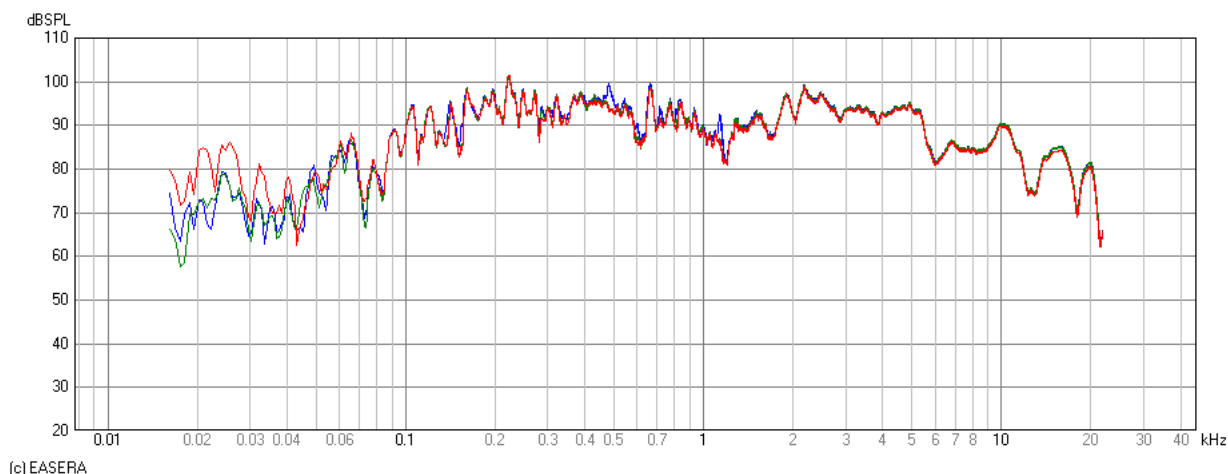
Obr. 4.17: Umístění měřicí soustavy v učebně EK705



Obr. 4.18: Poslední nastavení před měřením EASERA

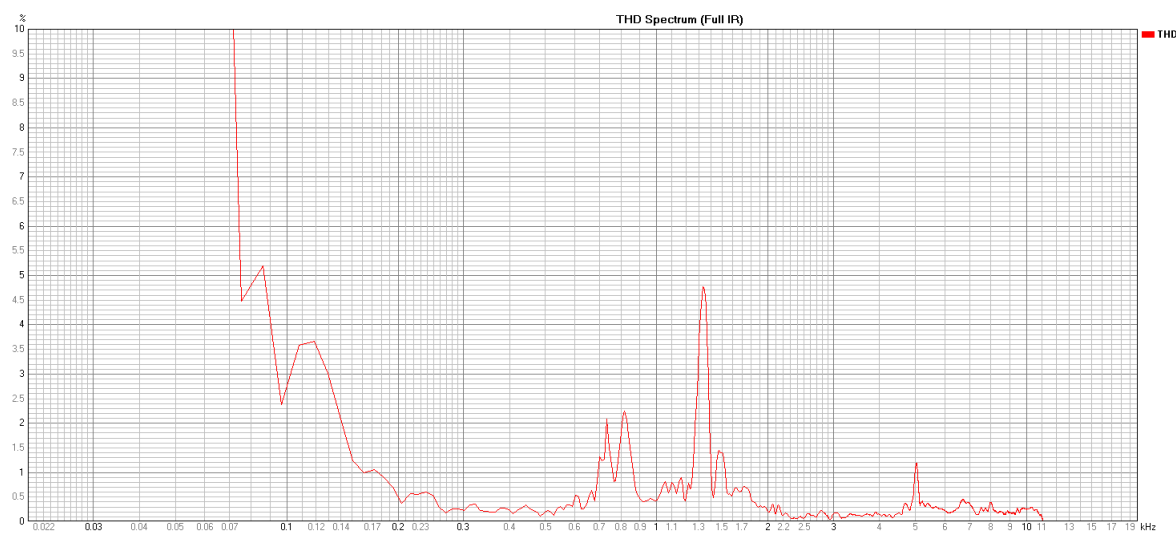
- 2) Propojíme měřicí systém dle schématu zapojení. Mikrofon je nutné umístit v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1m.
- 3) Vybereme měřicí signál MLS white, sampling rate: 44,100 kHz, signal time: 3s. Zkusíme test signálu a pokud je vše v pořádku tlačítkem "GO" spustíme měření. Výsledek měření uložíme.

- 4) Vybereme druhý měřicí signál white noise, sampling rate: 44,100 kHz, signal time: 3s. A postupujeme stejně jako u prvního signálu.
- 5) Vybereme třetí měřicí signál white sweep, sampling rate: 44,100 kHz, signal time: 3s. Po dokončení měření klikneme na výslednou frekvenční charakteristiku a z menu klikneme na "add to overlay" a z rolovací lišty vybereme předchozí měření. Stejně postupujeme i u prvního měření. Výsledkem by měl být jeden graf zobrazující všechny 3 naměřené frekvenční charakteristiky.



**Obr. 4.19:** Porovnání jednotlivých měřících signálů. Červená křivka pro MLS signál. Modrá pro šumový signál. Zelená pro rozmítaný signál.

- 6) Pro měření harmonického zkreslení musíme zvolit signál "log-sweep". A spustíme měření. Výsledkem bude charakteristika THD (total harmonic distortion) v závislosti na frekvenci.



**Obr. 4.20:** Nelineární zkreslení soustavy Tesla V6804 měřené v poloprostoru.

# 5

## Závěr

Tato práce slouží jako základní manuál softwarového analyzátoru EASERA. V úvodu jsou podrobně popsány jednotlivé možnosti analyzátoru.

Cílem této práce bylo nejen popsat měřicí a výpočtové funkce analyzátoru, ale také realizovat praktická měření. Měření byla provedena v učebně EK705 a na střeše fakulty elektrotechnické v areálu západočeské univerzity v Plzni. Z výsledků měření je patrné, že ani jeden z těchto prostorů není nejvhodnější pro měření akustických parametrů reproduktorových soustav. V učebně byly výsledné charakteristiky zatíženy velkou chybou způsobenou odrazy od stěn a na střeše byla chyba způsobena povětrnostními podmínkami. Chybu měření na střeše se nám částečně podařilo odstranit zvýšením dodávaného výkonu do soustavy. Jelikož nebyla chyba odstraněna úplně, nelze ani jedno z těchto měření brát jako referenční. Pro měření soustav by bylo nejlepší používat bezdozvukovou komoru.

Mimo impulsní odezvy a frekvenční charakteristiky akustické soustavy byly měřeny také další parametry poslechových prostorů jako je index přenosu řeči. Z měření tohoto parametru poslechových prostorů vyplývá, že v učebně EK705 dochází ke snížení srozumitelnosti vlivem prostoru pouze při nižších kmitočtech. U měření na střeše byl tento index roven téměř jedné, a tudíž byla srozumitelnost maximální.

V poslední části této bakalářské práce byly vytvořeny dvě měřicí úlohy pro studenty FEL. Tyto úlohy byly vybrány vzhledem k náročnosti měření. První úloha je na měření frekvenční charakteristiky a impulsní odezvy daného prostoru. V druhé úloze jsou měřeny rozdíly frekvenčních charakteristik při použití různých měřících signálů a také nelineární zkreslení reproduktorové soustavy.

Mezi další možnosti jak využít analyzátor EASERA Pro patří například použití jeho rozšířených měřících funkcí při měření akustiky prostorů za použití více měřících bodů nebo měření průzvučnosti různých materiálů. Tato náročnější měření již nebyla předmětem této práce.

# Literatura

- [1] Jason, R. *What is meant by a system's "impulse response" and "frequency response?"* [Cit. 10. 5. 2014]. Dostupné z: <http://dsp.stackexchange.com/questions/536/what-is-meant-by-a-systems-impulse-response-and-frequency-response>
- [2] Berthold Daubner a Jens Hörmann GbR *Energy časová křivka (ETC)* [Cit. 12. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.design-heimkino.de/wissenswertes/begriffserlaeuterungen/energy-time-curve-etc/>
- [3] Ing. Miroslav Balík *Měření impulsové odezvy poslechového prostoru a výpočet její obálky* [Cit. 12. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03026/index.html>
- [4] Software Design Ahnert GmbH, Berlin *EASERA 1.1 User Manual* [Cit. 16. 7. 2014]. Dostupné z :<http://www.afmg-support.eu/SoftwareDownloadBase/EASERA12/EASERAManual`EN.pdf>
- [5] Software Design Ahnert GmbH, Berlin *EASERA 1.1 Tutorial* [Cit. 22. 7. 2014]. Dostupné z :<http://www.afmg-support.eu/SoftwareDownloadBase/EASERA12/EASERATutorial`EN.pdf>
- [6] Software Design Ahnert GmbH, Berlin *EASERA 1.1 Appendix* [Cit. 4. 5. 2014]. Dostupné z :<http://www.afmg-support.eu/SoftwareDownloadBase/EASERA12/EASERAAppendix`EN.pdf>
- [7] Peter White Applied Radio Labs *Group Delay Explanations and Applications* [Cit. 15. 5. 2014]. Dostupné z :<http://www.radiolab.com.au/DesignFile/DN004.pdf>
- [8] Flanagan, Sheila; Moore, Brian C. J.; Stone, Michael A. (2005) *Discrimination of Group Delay in Clicklike Signals Presented via Headphones and Loudspeakers* [Cit. 20. 5. 2014]. Dostupné z :<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13428>
- [9] Embedded Acoustics BV *Speech Transmission Index (STI)* [Cit. 14. 7. 2014]. Dostupné z :<http://www.embeddedacoustics.com/index.php/speech-transmission-index>