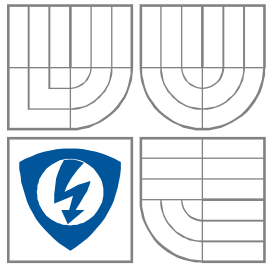


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## **Třípásmová stereofonní reproduktorová soustava s bassreflexem**

Three-way stereophonic loudspeaker system with bassreflex

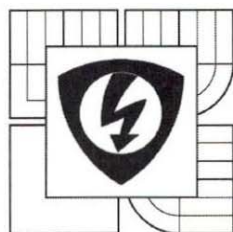
**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Jan Burget

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií  
Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Jan Burget

**Ročník:** 3

**ID:** 145977

**Akademický rok:** 2013/14

**NÁZEV TÉMATU:**

## Třípásmová stereofonní reproduktorová soustava s bassreflexem

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete pasivní třípásmovou stereofonní reproduktorovou soustavu s bassreflexem a výkonem do 50 W RMS / 8 ohmů a její výhybku. Při výběru reproduktorů se zaměřte na dosažení citlivosti alespoň 90 dB/W/m. Navrhnete konstrukční uspořádání ozvučnice a celkovou reproduktorovou skříň s ohledem na stávající standardy a doporučení ITU/AES.

V praktické části práce vytvoříte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, konstrukční výkresy atd.). Navržené zařízení realizujete formou funkčního prototypu a experimentálním měření ověříte technické parametry a směrové charakteristiky reprosoustavy. Výsledky měření zpracujete formou standardního protokolu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] WIRSUM, S. Abeceda ní techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.
- [2] TOMAN, K. Reprodukory a reprosoustavy. Karviná: Dexon, 2001.
- [3] SÝKORA, B. Stavíme reproduktorové soustavy. Část 1 – 48. Amatérské rádio, řada A, 1997-2001.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 30.5.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

  
doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.  
předseda oborové rady



### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce obsahuje kompletní návrh třípásmové stereofonní reproduktorové soustavy s bassreflexem. Je v ní podrobně popsán výběr akustických měničů, jejich měření a úpravy. Nedílnou součástí je návrh reproduktorové ozvučnice a výpočty či simulace bassreflexu. Dalším bodem je i návrh reproduktorové výhybky a její simulace. Práce obsahuje i konstrukční prvky jako návrh DPS (desky plošných spojů) či 3D model a výkresy reproduktorové skříně.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Reproduktor, bassreflex, reproduktorová soustava, reproduktorová výhybka

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis contains complete design of three-way stereophonic loudspeaker sound system with bassreflex. There is detailed description of selection of acoustic transducers, their measurements and adjustments. As an integral part of this seminar study is design of loudspeaker baffle and calculations or simulation of bassreflex. And further, this study also deals with a design of loudspeaker crossovers and their simulation. The study contains structural elements as a PCB (printed circuit board) or 3D pattern and drawings of loudspeaker box.

## **KEYWORDS**

Loudspeaker, bassreflex, loudspeaker system, audio crossover

BURGET, J. *Třípásmová stereofonní reproduktorová soustava s bassreflexem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 31 s., 12 s. příloh, bakalářské práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Třípásmová stereofonní reproduktorová soustava s bassreflexem 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za odbornou pomoc při laboratorním měření.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

Experimentální část této bakalářské práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072  
**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>ix</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>x</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 výběr reproduktorů</b>	<b>2</b>
1.1 Vysokotónový reproduktor .....	2
1.1.1 Základní parametry reproduktoru.....	2
1.1.2 Úpravy reproduktoru .....	3
1.1.3 Kompenzace.....	4
1.2 Středotónový reproduktor .....	5
1.2.1 Základní parametry.....	5
1.2.2 Kompenzace impedance reproduktoru .....	5
1.3 Hlubokotónový reproduktor .....	6
1.3.1 Základní parametry reproduktoru.....	7
1.3.2 Kompenzace impedance reproduktoru .....	8
<b>2 Návrh reproduktorové skříně</b>	<b>9</b>
2.1 Výpočet rozměrů.....	9
2.2 Konstrukce.....	12
<b>3 Reproduktorová výhybka</b>	<b>16</b>
3.1 Návrh.....	16
3.2 Simulace .....	16
3.3 Konstrukce.....	19
<b>4 Měření reproduktorové soustavy</b>	<b>20</b>
4.1 Impedanční charakteristika .....	20
4.2 Frekvenční SPL charakteristika .....	21
4.3 Směrová horizontální SPL frekvenční charakteristika .....	22
4.4 Směrová vertikální SPL frekvenční charakteristika.....	23
4.5 Harmonické zkreslení THD .....	25

<b>5 Závěr</b>	<b>27</b>
<b>Literatura</b>	<b>28</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>29</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>31</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Impedanční charakteristika vysokotónového reproduktoru Vifa.....	2
Obrázek 2: Impedanční charakteristika vysokotónového reproduktoru Vifa po úpravách .....	3
Obrázek 3:Kompenzovaná impedanční charakteristika vysokotónového reproduktoru firmy Vifa .....	4
Obrázek 4: Impedanční charakteristika reproduktoru W5-704D firmy Tang Band .....	5
Obrázek 5: Kompenzovaný středový reproduktor firmy Tang Band.....	6
Obrázek 6:Impedanční charakteristika reproduktoru IRB20 firmy Dexon .....	7
Obrázek 7: Kompenzace impedance reproduktoru IRB20 firmy Dexon .....	8
Obrázek 8: SPL charakteristika a impedanční charakteristika bassreflexu .....	11
Obrázek 9: Impedanční charakteristika a elektrická fáze pro použití bassreflexu .....	12
Obrázek 10: 3D model reproduktorové ozvučnice .....	14
Obrázek 11: Blokové schéma reproduktorové výhybky .....	16
Obrázek 12: Simulace výsledné SPL charakteristiky s fází .....	17
Obrázek 13: Schéma zpožďovacího článku prvního řádu.....	17
Obrázek 14: Graf zpožďovacího článku, který zobrazuje zpoždění v jednotkách délky	18
Obrázek 15: Směrová charakteristika ve vertikálním směru od $-30^{\circ}$ do $+30^{\circ}$ .....	18
Obrázek 16: Celková impedanční charakteristika včetně fáze .....	20
Obrázek 17: Frekvenční SPL charakteristika měřená ve zvukové ose reproduktorové soustavy .....	21
Obrázek 18: Horizontální směrová charakteristika pro úhly 0 až $+70^{\circ}$ od osy reproduktorové soustavy .....	22
Obrázek 19: Horizontální směrová charakteristika pro úhly 0 až $-70^{\circ}$ od osy reproduktorové soustavy .....	23
Obrázek 20: Vertikální směrová charakteristika pro úhly 0 až $+20^{\circ}$ od osy reproduktorové soustavy .....	24
Obrázek 21: Vertikální směrová charakteristika pro úhly 0 až $-20^{\circ}$ od osy reproduktorové soustavy .....	25
Obrázek 22: SPL charakteristika s křivkami harmonických zkreslení včetně THD.....	26

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Změřené TS parametry reproduktoru IRB20 firmy Dexon.....	7
Tabulka 2: Průměry reproduktoru a jejich doporučené průměry bassreflexu .....	10

# ÚVOD

V tomto dokumentu je kompletně popsán návrh a konstrukce třípásmové stereofonní reproduktorové soustavy s bassreflexem. Cílem bylo navržení kvalitní reproduktorové soustavy, která nám poskytne co nejpřesnější a nejpřirozenější reprodukci zvuku. Při návrhu bylo dbáno na dosažení citlivosti 90 dB W/m s co možná nejrovnější SPL charakteristikou. Důležité bylo neopomenout velikost místnosti a polohu umístění reproduktorové soustavy v ní. Konstrukce byla omezena finančním limitem.

Pro úvod je vhodné poznamenat základní elektroakustické informace. Zvuk se šíří jen ve hmotném prostředí, je to v podstatě mechanické vlnění hmotného prostředí. Z toho je zřejmé, že na druhu hmotného prostředí závisí vlastnosti šíření zvuku. Pro standardní prostředí (vzduch o teplotě 20°C a atmosférickém tlaku 101,3 kPa) je uvažována rychlost zvuku jako 343 m/s. Šíření zvuku je ve vzduchu vnímáno jako podélné vlnění ve směru šíření zvuku. Důležité je také si uvědomit, že se zvuk odráží, a tento jev je důležité zohlednit při návrhu.

První kapitola obsahuje výběr jednotlivých reproduktorů, je zde popsáno měření impedanční charakteristiky, kompenzace impedance jednotlivých reproduktorů, měření elektrické fáze a u hlubokotónového reproduktoru měření TS parametrů.

V následující kapitole je podrobně rozebrán postup při návrhu ozvučnice. Tato kapitola obsahuje výpočty objemu reproduktorové skříně s úvahami, zda je vhodné použít bassreflex. Součástí této kapitoly je výběr bassreflexového nátrubku, výpočty jeho délky a simulace SPL charakteristiky s impedancí a elektrickou fází pro daný objem reproduktorové skříně. Z konstrukce je zde uveden 3D model ozvučnice, výběr použitého materiálu, rozmístění jednotlivých reproduktorů a další konstrukční prvky, které jsou nedílnou konstrukční součástí návrhu.

V kapitole 3 je popsán návrh reproduktorové výhybky. Tato kapitola obsahuje simulace výhybky s konkrétními hodnotami reproduktorů a jejich konkrétní hodnoty součástek pro co nejlepší funkci. Součástí této kapitoly je konkrétní schéma zapojení, konstrukční návrh desky plošného spoje jak ze strany součástek, tak ze strany spojů. Tyto návrhy jsou uvedeny v příloze.

Kapitola 4 obsahuje jednotlivá měření všech důležitých charakteristik a parametrů doplněných o podrobný komentář.

Následující kapitola obsahuje zhodnocení celé práce, poznatky a vyjádření.

# 1 VÝBĚR REPRODUKTORŮ

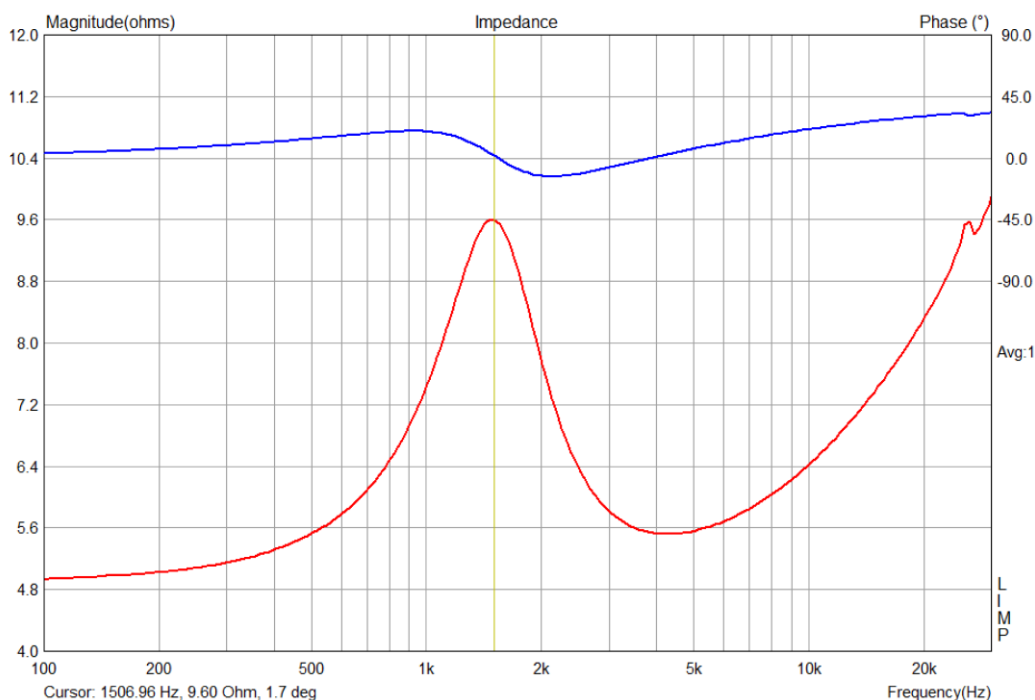
V následujícím textu jsou představeny použité reproduktory, které byly vybrány podle požadovaných parametrů. Důležitým prvkem při výběru reproduktorů byla nejen charakteristika, citlivost a další důležité parametry, ale také dostupnost zboží a přiměřená cenová hranice.

## 1.1 Vysokotónový reproduktor

Jako vysokotónový reproduktor byl zvolen reproduktor značky Vifa D25AG-05-06. Jedná se o jednopalcový kalotový reproduktor s citlivostí 91 dB a výkonem 100 W, jak udává výrobce v katalogovém listu [1]. Tyto hodnoty, hlavně výkon, nejsou relevantní, protože byly provedeny úpravy reproduktoru za účelem zlepšení akustických parametrů.

### 1.1.1 Základní parametry reproduktoru

Základní parametry jakou jsou TS (Thiele-Small) parametry nebylo možné naměřit, jelikož měření TS parametrů u vysokotónových reproduktorů je velice komplikované. Kompletní TS parametry neobsahoval ani katalogový list výrobce [1]. Další kroky proto byly předmětem měření a odlaďování. Na obrázku 1 je vidět impedanční charakteristika i s fází použitého reproduktoru bez úprav.



Obrázek 1: Impedanční charakteristika vysokotónového reproduktoru Vifa

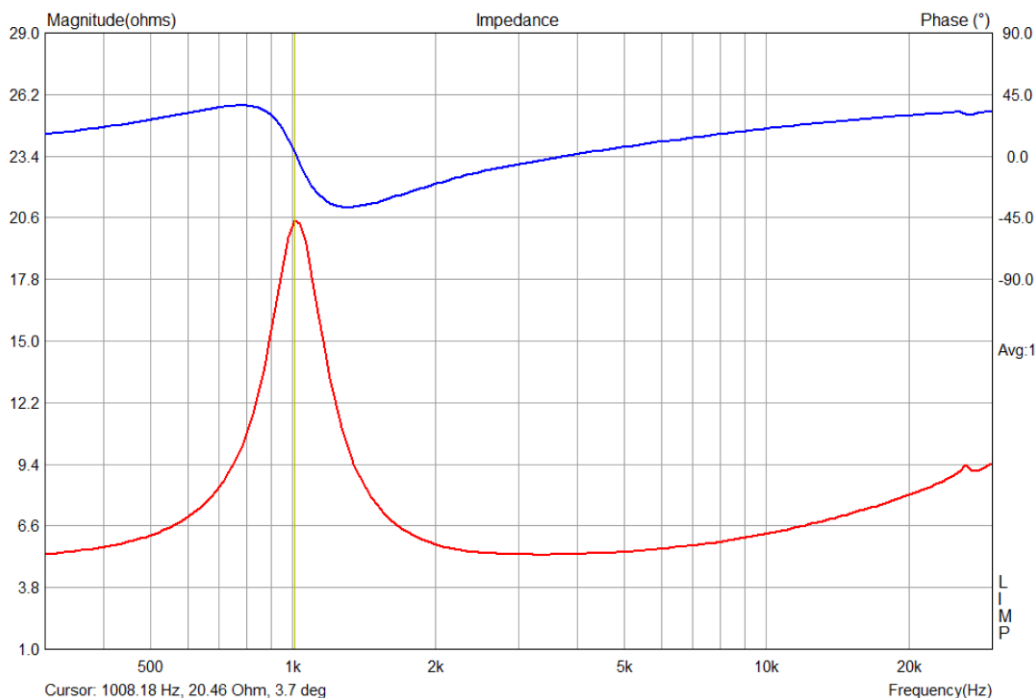
Jak je vidět rezonanční kmitočet se pohybuje na 1,5 kHz. To bylo nežádoucí, protože v oblasti tohoto kmitočtu se nachází dělicí kmitočet mezi vysokotónovým a středotónovým reproduktorem. Proto byl reproduktor fyzicky upraven.

### 1.1.2 Úpravy reproduktoru

Konstrukce reproduktoru byla značně upravena s cílem dosažení lepší charakteristiky a parametrů.

Reproduktor byl zbaven magnetické kapaliny, která je známá jako ferrofluid. Ta slouží k chlazení kmitací cívky při vyšším výkonu a také k tlumení rezonancí mechanického systému. Odstraněním této kapaliny byl snížen výkon asi na 50 W, ale charakteristika a citlivost reproduktoru se zlepšily. Značně se snížil i rezonanční kmitočet reproduktoru. To je pozitivem při odlaďování výhybky. To vedlo také k zmenšení zkreslení na středních kmitočtech. Ferrofluid působí také jako částečné mechanické tlumení rezonance membrány, takže bylo nutné ztlumit vnitřní prostor reproduktoru.

Vytlumení bylo realizováno syntetickou tlumící vatou a v magnetu byl zvětšen prostor za membránou pro dosažení nižší rezonanční frekvence, aby nedocházelo k velkým odrazům a celý systém byl uzavřen.



Obrázek 2: Impedanční charakteristika vysokotónového reproduktoru Vifa po úpravách

Z obrázku 2 je vidět, že se rezonanční kmitočet posunul na 1 kHz. To bylo výhodné pro návrh výhybky, zlepšila se i impedance na vyšších kmitočtech.

### 1.1.3 Kompenzace

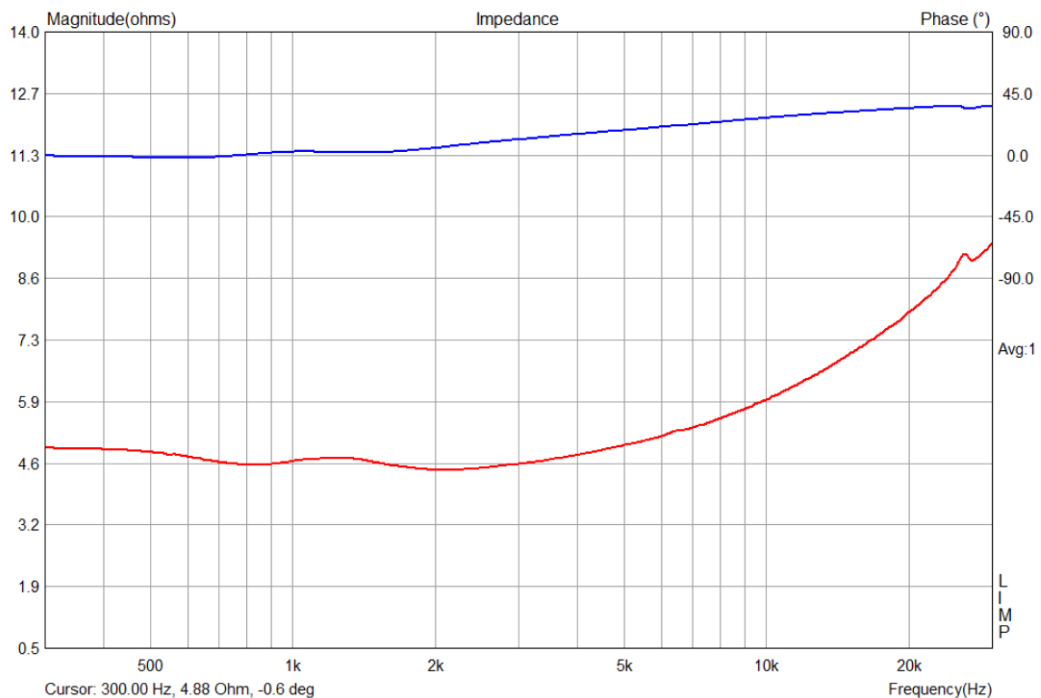
Každý reproduktor je jedinečný, proto je důležité změřit každý kus a podle něj navrhnout další řešení, jako je například kompenzace impedance. Impedance se dá kompenzovat sériovým obvodem RL nebo RLC. Kompenzace RLC se používá, u vysokotónových reproduktorů, jejichž rezonanční frekvence se nachází v blízkosti dělicí frekvence ve výhybce. Je to důležité pro správnou funkci výhybky a pro zkreslení zvuku. Pro výpočet RLC kombinace se dají použít vztahy [2], kterými z TS parametrů dopočteme potřebné hodnoty RLC.

$$C_k = \frac{0,1592}{R_e \cdot Q_{es} \cdot f_r} \quad [\text{F}] \quad (1.1)$$

$$L_k = \frac{0,1592 \cdot R_e \cdot Q_{es}}{f_r} \quad [\text{H}] \quad (1.2)$$

$$R_k = R_e + \frac{R_e \cdot Q_{es}}{Q_{ms}} \quad [\Omega] \quad (1.3)$$

To však nebylo možné použít, jelikož hodnoty  $Q_{es}$  a  $Q_{ms}$  nebyly zjištěny. Proto byla kompenzace odladěna a postupným měřením dotažena do vyhovujících hodnot. Schéma kompenzačního RLC obvodu je nakresleno v celkovém schématu reproduktorové výhybky v příloze.



Obrázek 3:Kompenzovaná impedanční charakteristika vysokotónového reproduktoru firmy Vifa

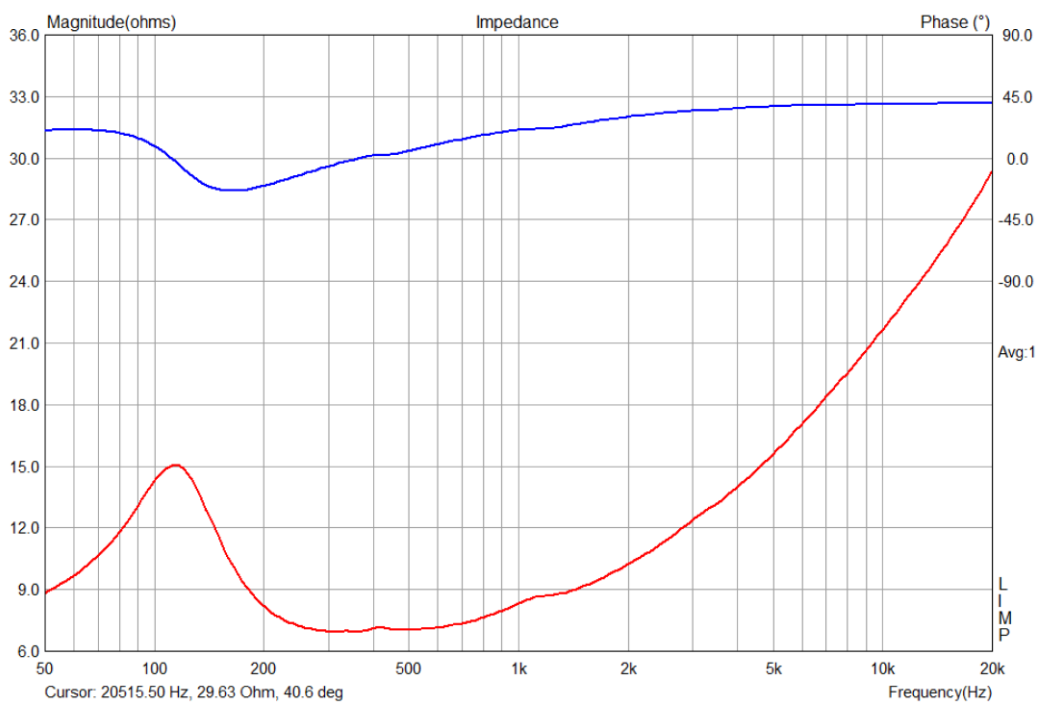
Na obrázku 3 je vidět zkompenzovaná impedanční charakteristika, použité hodnoty RLC obvodu byly  $R_k=3,32 \Omega$ ,  $C_k=31,1 \mu\text{F}$ ,  $L_k=797\mu\text{H}$ ,  $R_{Lk}=1,88 \Omega$ .

## 1.2 Středotónový reproduktor

Za středotónový reproduktor byl vybrán pětipalcový středobasový reproduktor značky Tang Band W5-704D. Tento reproduktor má podle výrobce citlivost sice jen 88 dB W/m, což si odporuje se zadáním, ale byl vybrán pro jeho skvělé parametry, rovnou charakteristiku, konstrukční řešení a hlavně příznivou cenu.

### 1.2.1 Základní parametry

Parametry středotónového reproduktoru byly uvažovány jako téměř shodné s parametry uvedené v katalogovém listu výrobce [3]. Pro středový reproduktor není tak důležité znát tyto údaje naprosto přesně jako u basového reproduktoru, ze kterého se dále počítá celá reproduktorová skříň. U středotónového reproduktoru je důležitá impedanční charakteristika, její kompenzace a SPL frekvenční charakteristika.



Obrázek 4: Impedanční charakteristika reproduktoru W5-704D firmy Tang Band

### 1.2.2 Kompenzace impedance reproduktoru

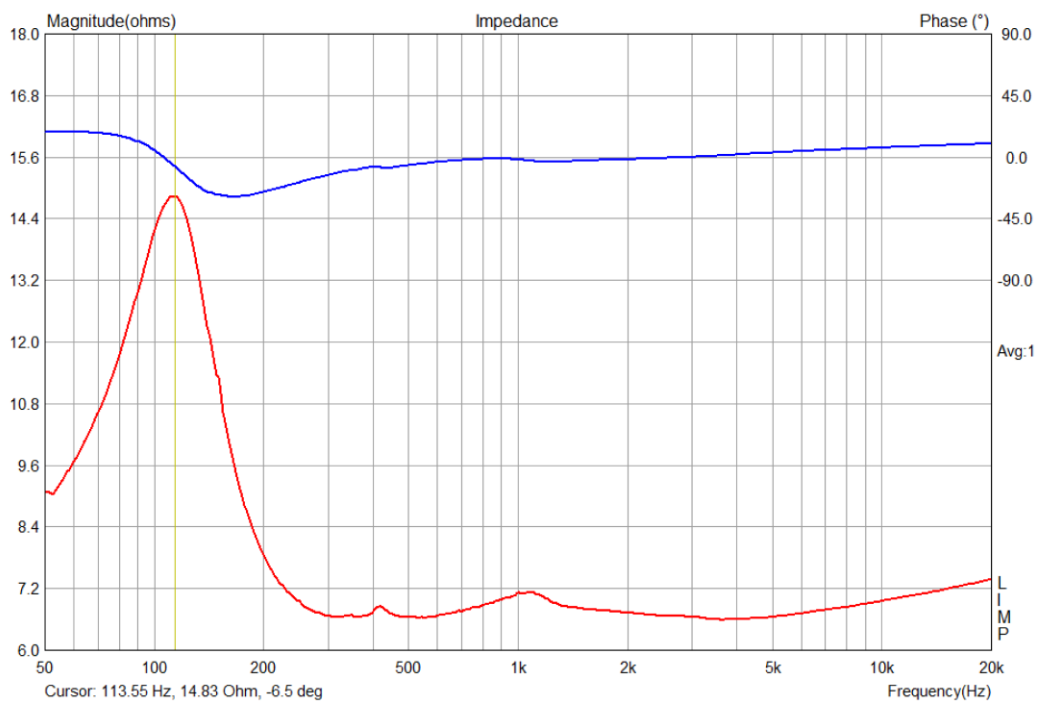
Pro kompenzaci středotónového reproduktoru byla použita sériová kombinace odporu a rezistoru paralelně k reproduktoru. Pro výpočet by se daly použít vzorce [4].

$$R_k = n \cdot R_e \quad [\Omega] \quad (1.4)$$

Kde konstanta n bývá 1; 1,25; 1,5.

$$C_k = \frac{L_e}{R_e^2} \quad [F] \quad (1.5)$$

V tomto konkrétním případě pro n 1,5 bylo  $R_k=9 \Omega$ , ale pro výpočet hodnoty  $C_k$  pracuje vzorec pouze s indukčí  $L_e$ , ale v reproduktoru působí ještě  $L_2$ , proto pro kompenzaci bylo opět použito odladění měřením. Výsledné hodnoty kompenzací byly  $R_k=9,3 \Omega$  a  $C_k=9,9 \mu F$ .



Obrázek 5: Kompenzovaný středový reproduktor firmy Tang Band

### 1.3 Hlubokotónový reproduktor

Jako hlubokotónový reproduktor byl zvolen Dexon IRB20. Jedná se o osmipalcový reproduktor, jehož membrána je tvořena kevlarovými vlákny. Tento reproduktor má citlivost podle výrobce 90 dB W/m a jeho parametry byly v poměru cena-výkon velice pozitivní [5]. Má velmi nízké zkreslení a výborný přenos v daném rozsahu, o kterém vypovídá vyrovnaná frekvenční charakteristika.



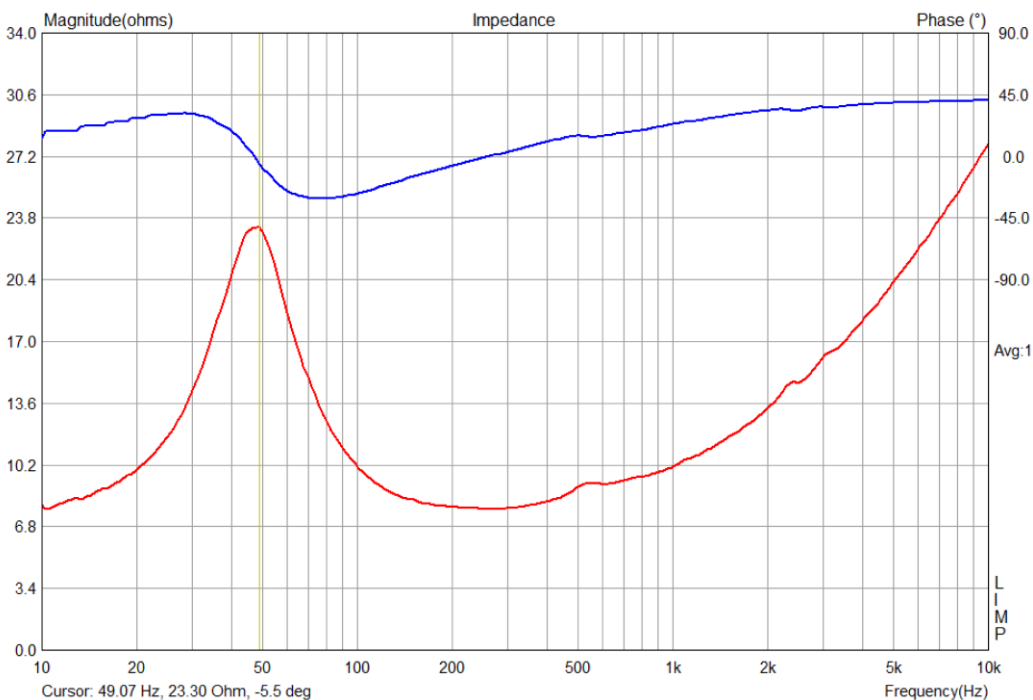
### 1.3.1 Základní parametry reproduktoru

U hlubokotónového reproduktoru jsou nejdůležitější TS parametry. Z těchto parametrů se počítají další důležité kroky, jako je objem reproduktorové skříně, zdali bude účinné použít bassreflex apod. TS parametry byly naměřeny jednoduchou metodou pomocí softwaru LIMP. Změří se impedanční charakteristika reproduktoru, do softwaru se zadají přesné parametry reproduktoru (průměr membrány, stejnosměrný odpor). Dále se zatíží membrána známou hmotností, která musí být přesná na setiny gramů a musí být s membránou spojena, aby při měření neposkakovala po membráně. V tomto konkrétním případě bylo pojídlem chemoprenové lepidlo a důležité bylo započítat i hmotnost lepidla. Hodnota hmotnostní zátěže se zapíše do softwaru, v tomto konkrétním případě to bylo 10,18 g, a impedanční charakteristika se změní se zátěží znova. Z těchto rozdílných charakteristik software vypočítá kompletní tabulku s TS parametry.

Tabulka 1: Změřené TS parametry reproduktoru IRB20 firmy Dexon

$f_s$ [Hz]	$R_e$ [ $\Omega$ ] (DC)	$L_e$ [ $\mu$ H]	$L_2$ [ $\mu$ H]	$R_2$ [ $\Omega$ ]	$Q_{ts}$ [-]	$Q_{es}$ [-]	$Q_{ms}$ [-]
49,07	7,11	261,83	778,76	11,23	0,44	0,63	1,44

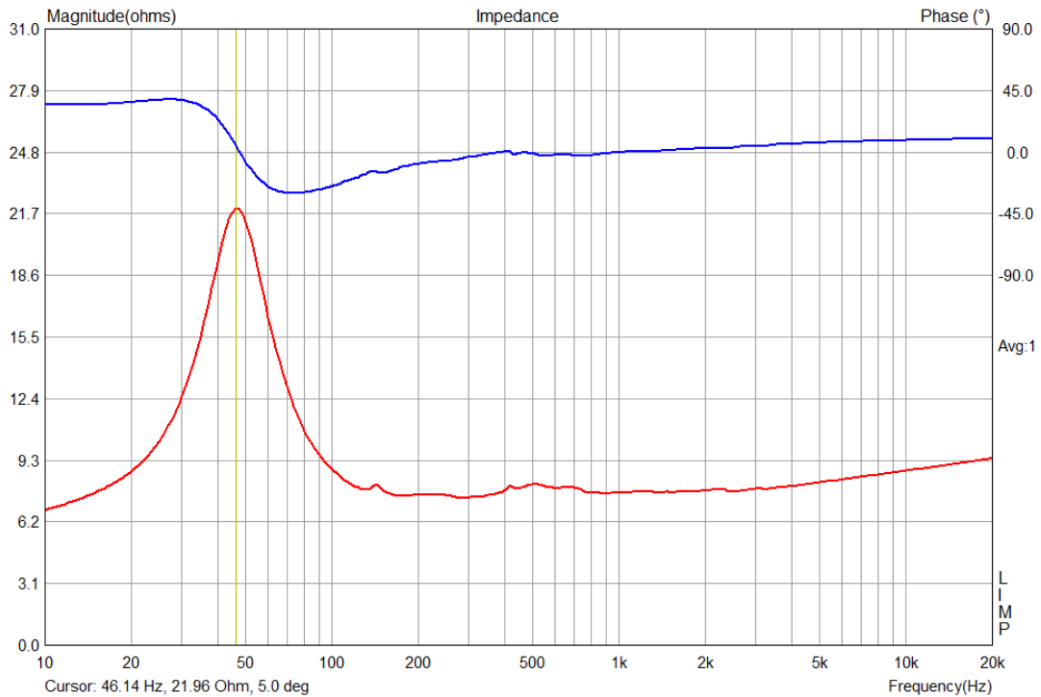
$M_{ms}$ [g]	$R_{ms}$ [kg/s]	$C_{ms}$ [m/N]	$V_{as}$ [l]	$S_d$ [cm <sup>2</sup> ]	$B_1$ [Tm]	ETA[%]	$L_p$ [dB]
14,50	3,114221	0,000725	31,82	176,71	7,100892	0,57	90,20



Obrázek 6: Impedanční charakteristika reproduktoru IRB20 firmy Dexon

### 1.3.2 Kompenzace impedance reproduktoru

Pro kompenzaci hlubokotónového reproduktoru byla použita sériová kombinace odporu a rezistoru. Podle vzorce (1.4) a (1.5) byl odhadnut poměr rezistoru a kondenzátoru, ale jejich přesné hodnoty byly doladěny podle měření impedance charakteristiky. Odladěné hodnoty byly  $R_k=12,15 \Omega$  a  $C_k=11,35 \mu\text{F}$ . Na obrázku 7 je vidět zkompenzovaná impedance charakteristika hlubokotónového reproduktoru.



Obrázek 7: Kompenzace impedance reproduktoru IRB20 firmy Dexon

## 2 NÁVRH REPRODUKTOROVÉ SKŘÍNĚ

V této kapitole je podrobně popsán návrh reproduktorové skříně, včetně všech potřebných výpočtů, konstrukčních prvků, výkresů, 3D návrhu a materiálu.

### 2.1 Výpočet rozměrů

Objem se určí podle TS parametrů hlubokotónového reproduktoru, které jsou popsány v předchozí kapitole 1.3.1. IRB20 mělo doporučený objem  $V_{as}$  31,82 litrů. Důležité je, zdali bude potřeba použít bassreflexovou konstrukci reproduktorové skříně, k tomu slouží hodnota  $EBP$  (Efficiency Bandwith Product) [6],

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{ES}} = \frac{49,07}{063} = 77,88 \text{ Hz} \quad (2.1)$$

pokud je hodnota  $EBP$  menší jako 50, je vhodné používat uzavřenou ozvučnici. Takže pro IRB20 bude vhodná ozvučnice typu bassreflex.

Vzhledem k tomu, že je vhodný bassreflex, musí se dopočítat potřebný objem, který je k bassreflexu vhodný. Pro dosažení stejné úrovně basů v co největší šířce pásma byla pro návrh použita aproximace maximally flat. Aproximace maximally flat bývá náročná na objem. Výsledný objem byl zmenšen z důvodu lepšího návrhu a úspory materiálu. Z hodnot aproximovaných pro maximálně rovnou charakteristiku můžeme zmenšit potřebný objem a dopočítat tak parametry pro charakteristiku, která bude mít nepatrně větší „hrb“ než maximally flat. Stávající parametry byly  $V_{as}=31,82$  l,  $Q_{ts}=0,44$ ,  $f_s=49,07$  Hz. Výpočet parametrů při použití aproximace maximally flat [4].

Potřebný objem pro maximálně rovnou charakteristiku v co největším pásmu:

$$V_b = 15,33 \cdot V_{as} \cdot Q_{ts}^{2,86} = 15,33 \cdot 31,82 \cdot 0,44^{2,86} = 46,614 \text{ litrů} \quad (2.2)$$

Dolní mezní kmitočet pro aproximaci maximally flat:

$$f_3 = \frac{0,26 \cdot f_s}{Q_{ts}^{1,4}} = \frac{0,26 \cdot 49,07}{0,44^{1,4}} = 40,267 \text{ Hz} \quad (2.3)$$

Rezonanční kmitočet pro aproximaci maximally flat:

$$f_b = \frac{0,42 \cdot f_s}{Q_{ts}^{0,9}} = \frac{0,42 \cdot 49,07}{0,44^{0,9}} = 43,148 \text{ Hz} \quad (2.4)$$

Volba nátrubku se odvíjí podle velikosti reproduktoru.

Tabulka 2: Průměry reproduktoru a jejich doporučené průměry bassreflexu [7]

Průměr reproduktoru [mm]	Průměr bassreflexu [mm]
100	30-40
130	40-45
165	45-65
200	65-80
250	80-100
305	100-130
380	130-160

V tomto případě se jedná o 8“ reproduktor, jehož aktivní část je 150 mm, tomu vyhovuje bassreflex o průměru 45-65 mm. Byl zvolen nejvíce zaoblený nátrubek na obou koncích a průměr nátrubku byl 60 mm, jeho vhodná délka se dá spočítat podle následujícího vztahu [2].

Výpočet délky nátrubku bassreflexu :

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,85 \cdot d = \frac{2361 \cdot 0,06^2}{43,15^2 \cdot 0,046614} - 0,85 \cdot 0,06 = 46,93 \text{ mm} \quad (2.5)$$

V tomto konkrétním návrhu je objem pro basový reproduktor nepatrně zmenšen, a to na 40 l, to zapříčiní drobnou změnu ve tvaru charakteristiky. Tato početní aproximace slouží k návrhu a k orientačnímu zjištění potřebných rozměrů nátrubku a také jaký vliv to bude mít na charakteristiku.

Při snížení objemu na  $V'_b=40$  l se přepočítá dolní mezní kmitočet:

$$f'_3 = f_s \cdot \sqrt{\frac{V_{as}}{V'_b}} = 49,07 \cdot \sqrt{\frac{31,08}{40}} = 43,25 \text{ Hz} \quad (2.6)$$

Dále se změní rezonanční kmitočet:

$$f'_b = f_s \cdot \left(\frac{V_{as}}{V'_b}\right)^{0,32} = 49,07 \cdot \left(\frac{31,08}{40}\right)^{0,32} = 45,26 \text{ Hz} \quad (2.7)$$

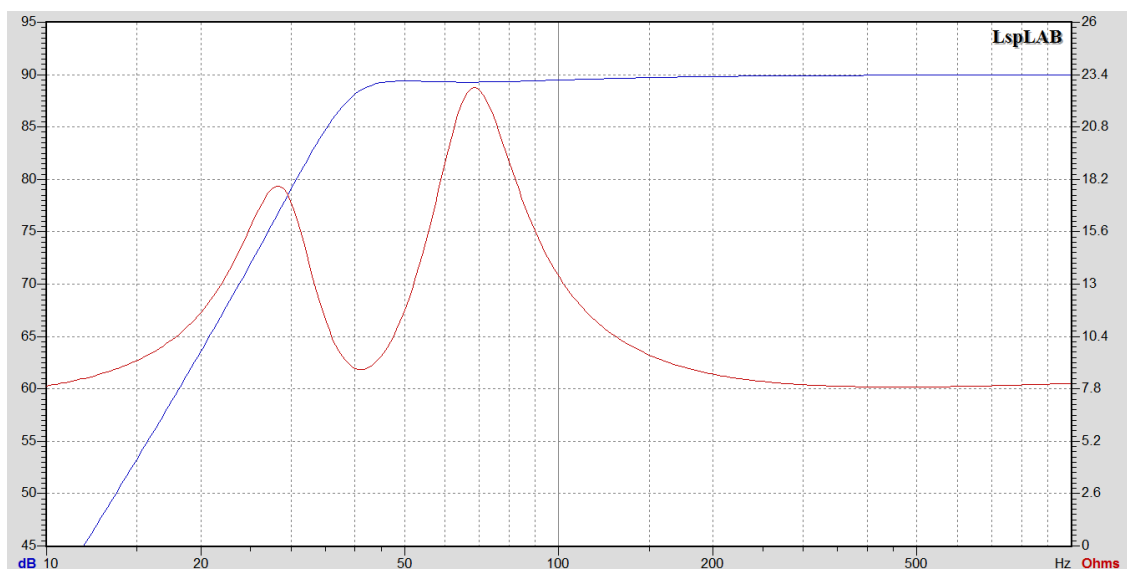
A je třeba upravit délku nátrubku pro nový objem:

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b'^2 \cdot V_b'} - 0,85 \cdot d = \frac{2361 \cdot 0,06^2}{45,26^2 \cdot 0,040} - 0,85 \cdot 0,06 = 52,73 \text{ mm} \quad (2.8)$$

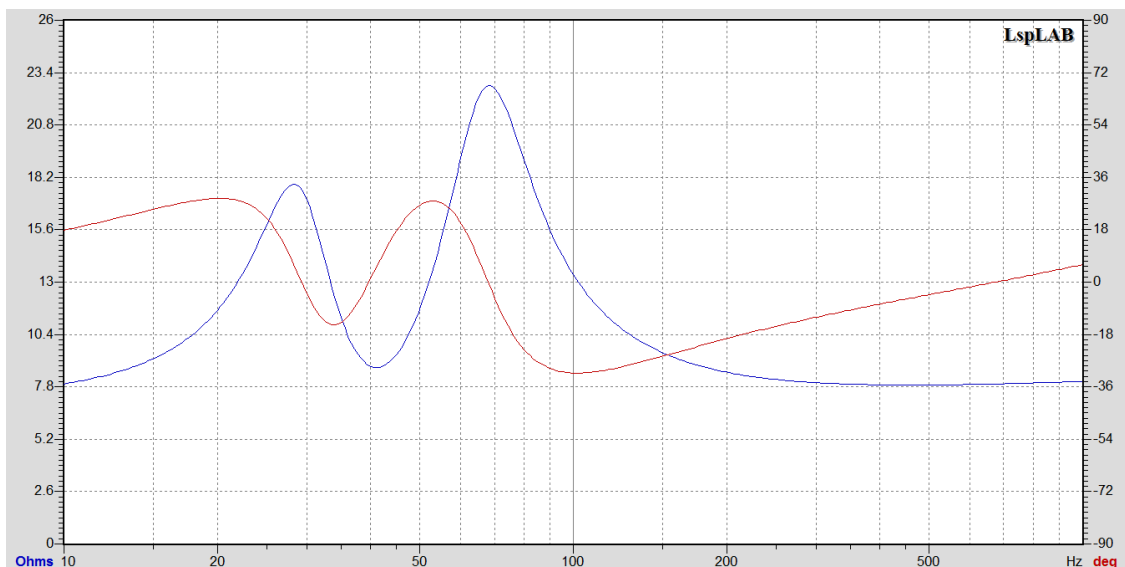
Zmenšení objemu reproduktorové skříně má za následek drobné vyhrbení charakteristiky. Podle vzorce je  $SPL_{peak}$  vypočteno následovně [2].

$$SPL_{peak} = 20 \log \left[ 2,6 \cdot Q_{ts} \cdot \left( \frac{V_{as}}{V_b'} \right)^{0,35} \right] = 20 \log \left[ 2,6 \cdot 0,44 \cdot \left( \frac{31,08}{40} \right)^{0,35} \right] = 0,401 \text{ dB} \quad (2.9)$$

V reálu bylo výhodnější bassreflex lehce podladit. Prodloužením délky nátrubku byl bassreflex podladen o 0,5 dB. Jeho délka byla odsimulována na 6 cm.



Obrázek 8: SPL charakteristika a impedanční charakteristika bassreflexu



Obrázek 9: Impedanční charakteristika a elektrická fáze pro použití bassreflexu

## 2.2 Konstrukce

V této podkapitole je popsáno vše, co se týče fyzické konstrukce reproduktorové soustavy. Použitý materiál, rozmístění reproduktorů, vylumení a další technické prvky, které vedou ke zlepšení zvuku.

Rozmístění reproduktorů je velice důležité, ovlivňuje silně index směrovosti. Ideální řešení by bylo, kdyby všechny reproduktory se tvářily jako bodový zářič a tím pádem by zvuk vycházel z jednoho místa a byl by rovnoměrný. To ale není konstrukčně možné. Pro vhodné rozmístění je důležité si rozmyslet, jaké budou dělicí frekvence ve výhybce, od tohoto rozhodnutí se dále odvíjí výpočty a postupy.

Výpočet dělicí frekvence mezi hlubokotónovým a středotónovým reproduktorem:

$$f_1 = \frac{c_0}{\pi \cdot D} = \frac{343}{\pi \cdot 0,15} = 727,868 \text{ Hz} \quad (2.9)$$

Výpočet dělicí frekvence mezi středotónovým a vysokotónovým reproduktorem:

$$f_2 = \frac{c_0}{\pi \cdot D} = \frac{343}{\pi \cdot 0,109} = 1,002 \text{ kHz} \quad (2.10)$$

Tyto výpočty vychází z úvahy směrovosti reproduktoru, která je závislá na velikosti membrány. Podle uvedeného vzorce se vypočítá mezní kmitočet, na kterém se vyzařovací úhel zmenšuje ze 180°. Volba dělicích kmitočetů nemůže být jednoznačně určena podle tohoto kritéria, v úvahu přichází i další faktory.

Pro zvolení dělicí frekvence mezi vysokotónovým a středotónovým reproduktorem byl zvolen kompromis mezi výkonovou zatížitelností vysokotónového reproduktoru a směrovostí středotónového reproduktoru. Dále také rozhodovalo optimum zkreslení pro oba reproduktory, protože vysokotónovému reproduktoru směrem k nižším kmitočetům dost stoupá zkreslení a středotónovému reproduktoru naopak stoupá zkreslení směrem ke kmitočetům vyšším. Mezi hlubokotónovým a středotónovým reproduktorem jde zase o kompromis výkonové zatížitelnosti středotónového reproduktoru a rezonance membrány hlubokotónového reproduktoru.

Dělicí kmitočty byly teda zvoleny 800 Hz mezi hlubokotónovým a středotónovým reproduktorem a 2,6 kHz mezi vysokotónovým a středotónovým reproduktorem. Jak již bylo zmíněno, bylo by ideální, kdyby všechno vycházelo z jednoho bodu. To ovšem není reálné, proto jsou kritéria, která určují dosažení požadované směrové charakteristiky. Proto je důležité dopočítat vzdálenosti os reproduktorů od sebe. Pro rozteč středotónového a hlubokotónového reproduktoru se používá 1/4 vlnové délky dělicí frekvence a méně. Pro vysokotónový a středotónový reproduktor se používá 5/4 vlnové délky, protože 1/4 je nereálná [4].

Výpočet vzdálenosti os hlubokotónového a středotónového reproduktoru:

$$l_{osaBS} = \frac{1}{4} \cdot \frac{c_0}{f_1} = \frac{1}{4} \cdot \frac{343}{800} = 107,18 \text{ mm} \quad (2.11)$$

Tuto požadovanou vzdálenost hlubokotónového a středotónového reproduktoru nebylo možné fyzicky dodržet kvůli jejich fyzickým rozměrům a konstrukci. Proto byly tyto reproduktory umístěny co nejbližší k sobě. Vzdálenost os byla tedy  $l_{osaBS}=180 \text{ mm}$ .

Výpočet vzdálenosti os a středotónového a vysokotónového reproduktoru:

$$l_{osaSV} = \frac{5}{4} \cdot \frac{c_0}{f_1} = \frac{1}{4} \cdot \frac{343}{2600} = 164,904 \text{ mm} \quad (2.12)$$

Do celkových rozměrů musel být zvažován i oddělený prostor pro vysokotónový a středotónový reproduktor. Jeho objem je 4,67 litrů. V reproduktorové skříni je třeba udělat výztuhy, aby nevznikaly ořesy a další rezonance. Proto byly použity v každé třetině skříně výztuhy, které byly horizontálně umístěny. Musely v nich být ovšem otvory pro průchod vzduchu, aby nebyl zničen objem skříně. Aby vzduch procházel správně, musely otvory tvořit alespoň 50% plochy výztuhy.

Důležitým prvkem je také zkosení hran na čelní straně reproduktoru. To je důležité, aby bylo možné částečně potlačit odražený zvuk.

Důležité je také rozmyslet, kde bude uložena výhybka, a také udělat otvory pro terminál. Nachystat si kabely, které budou součástí výhybky, a vše důkladně utěsnit.

Celkový výkres je v příloze. Na obrázku 10 je zobrazen 3D návrh reproduktorové soustavy.



Obrázek 10: 3D model reproduktorové ozvučnice



Celá ozvučnice je vyrobena z materiálu MDF 18 (Medium Density Fibreboard), který má tloušťku 18 mm. Tento materiál je vhodný pro HiFi konstrukce, jelikož je velice pevný, hutný a také těžký. Je snadno opracovatelný a dá se na něj nanést vhodná povrchová úprava pro konečné řešení. Přínosem je i to, že materiál má dobré vnitřní tlumení.

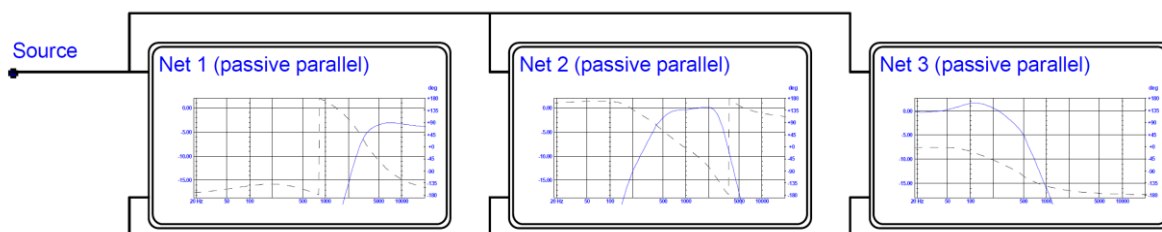
## 3 REPRODUKTOROVÁ VÝHYBKA

Reproduktorová výhybka je soustava filtrů, tomto případě pasivních, které rozdělují pásmo pro jednotlivé reproduktory. V této kapitole je kompletně popsán návrh reproduktorové výhybky, její simulace a konstrukční řešení.

### 3.1 Návrh

Protože jsou používány tři reproduktory, je jasné, že bude potřeba použít soustavu tří filtrů (dolní, horní a pásmové propusti). Jak již bylo řečeno v přecházející kapitole, podle parametrů reproduktoru byly zvoleny dělicí frekvence mezi hlubokotónovým a středotónovým reproduktorem 800 Hz a mezi středotónovým a vysokotónovým reproduktorem byla 2,6 kHz.

V následujícím obrázku je zobrazeno blokové schéma reproduktorové výhybky, ve kterých je znázorněn průběh filtrů.



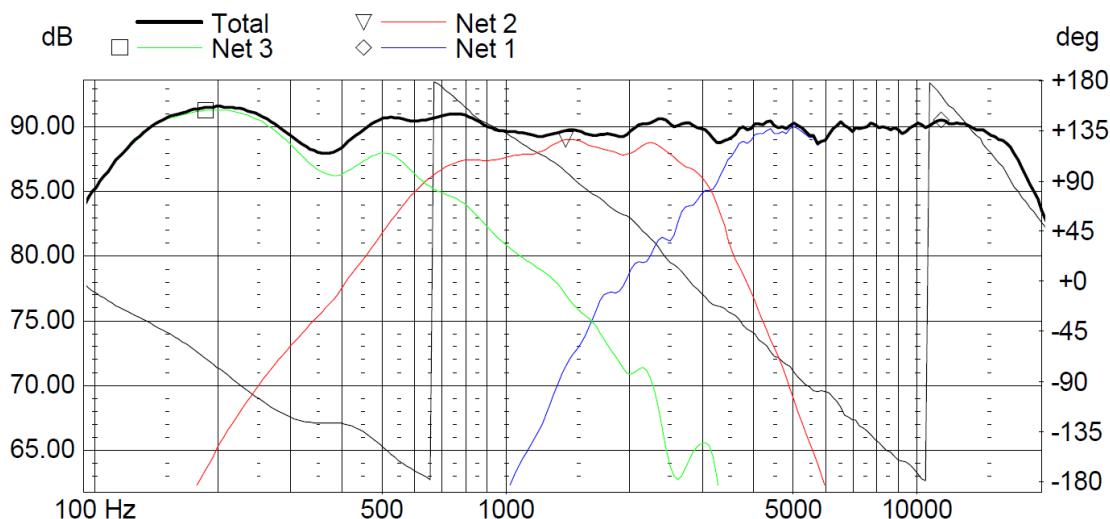
Obrázek 11: Blokové schéma reproduktorové výhybky

Základní návrh byl realizován filtry prvního řádu, hodnoty součástek byly vypočítány podle zvolených mezních kmitočtů, dle vztahů uvedených v literatuře [4], [6], [8] a [9]. To ale ke správné funkci nestačí. Důležité je, aby v simulaci byly nahrány hodnoty změřených reproduktorů, tedy jejich impedanční a SPL charakteristika. Pro co nejlepší simulaci je důležité, aby tyto hodnoty byly změřeny již v hotové reproduktorové ozvučnici, která bude používána. V simulačním programu se potom hodnoty součástek dají různě měnit nebo se mohou nové součástky přidávat a vytvářet tak např. filtry vyššího řádu pro zlepšení funkce.

### 3.2 Simulace

Jak již bylo nastíněno v předcházejícím textu, k dobrému návrhu je potřeba simulací. Proto další postup zahrnuje popis práce a výsledky ze simulačního programu LSP Lab 3 a LSP Cad 5.25.

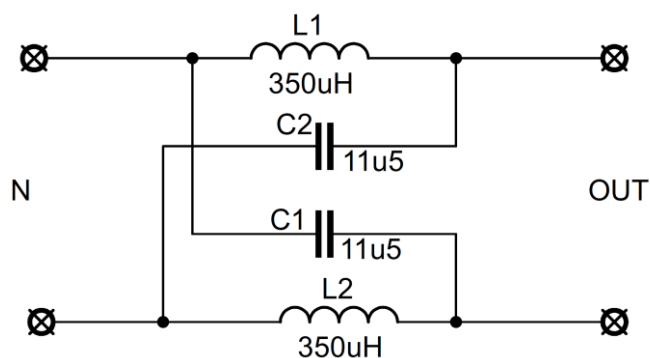
Postupným odlaďováním bylo dosaženo co nejrovnější SPL charakteristiky, která se pohybuje okolo 90 dB. Při návrhu je také důležité sledovat fázi, zda není průběh fáze zdeformován.



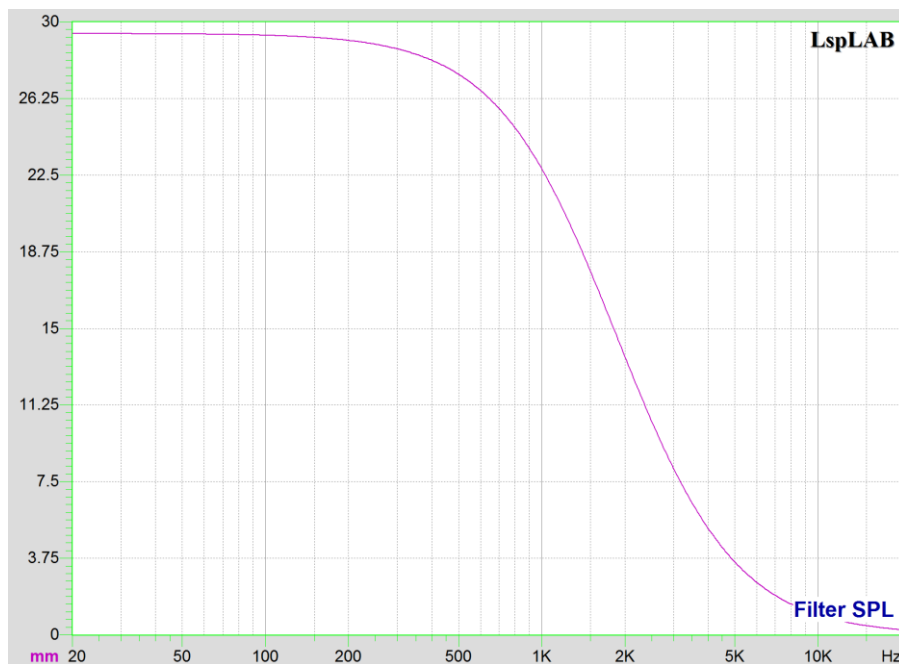
Obrázek 12: Simulace výsledné SPL charakteristiky s fází

Výhybka je složena, jak již bylo zmíněno, ze tří filtrů, vytvořených kombinací kondenzátorů a cívek. Hlubokotónový reproduktor dělí od středotónového reproduktoru dolní propust 2. řádu, doporučuje se, aby i dělení spodních frekvencí u pásmové propusti pro středotónový reproduktor bylo také 2. řádu. Pro dělení vysokotónového a středotónového reproduktoru byly použity filtry 2. řádu, ale nebylo to dostačující. Proto pro dělení horních frekvencí středotónového reproduktoru a výškového byly použity filtry 3. řádu. Jak je vidět z grafu 3. řád má strmější charakteristiku oproti 2. řádu. Strmost klesání 2. řádu je 12 dB/okt a u 3. řádu je to 18 dB/okt.

Ve výhybce byla použita různá zapojení, která vedla ke zlepšení charakteristiky. Při prvním měření byl zjištěn propad u výškového reproduktoru. Problém byl způsoben špatným fázováním reproduktoru. Při naklonění reproduktorové skříně směrem dozadu, o necelých 30 mm, se charakteristika srovnala. Tento problém by bylo možné vyřešit použitím vhodného zvukovodu, ale z důvodu již zkonstruovaného reproboxu bylo vhodnější jiné řešení. Problém bylo možné odstranit i elektricky, a to přidáním zpožďovacího článku prvního řádu k výškovému reproduktoru, který zpožďoval zvuk asi o 87  $\mu$ s.



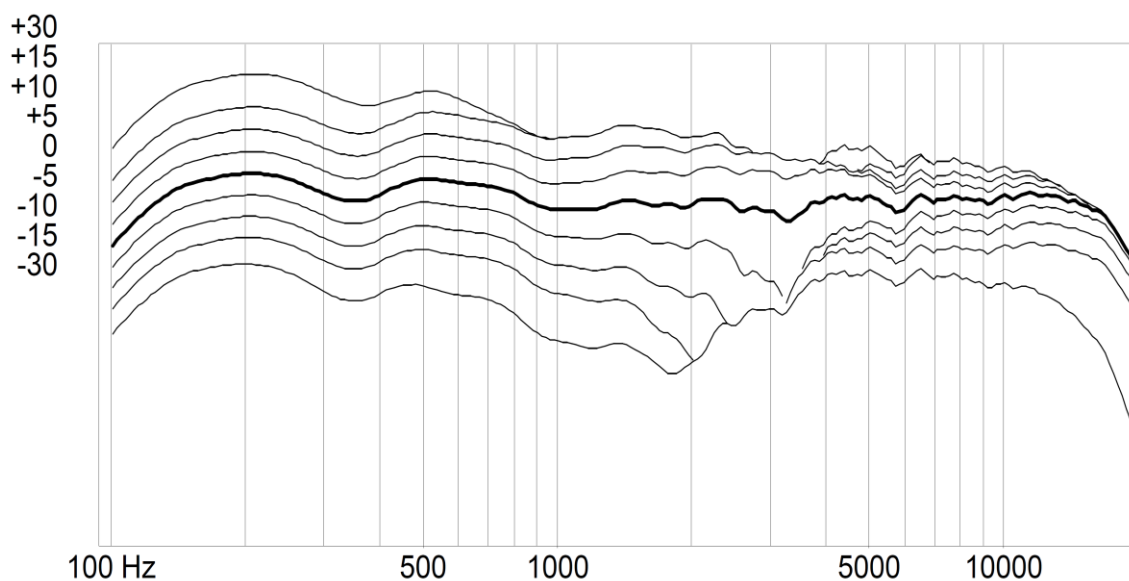
Obrázek 13: Schéma zpožďovacího článku prvního řádu



Obrázek 14: Graf zpoždovacího článku, který zobrazuje zpoždění v jednotkách délky

Další nepříjemnou vlastností byla vysoká úroveň vyšších frekvencí v SPL charakteristice, tento problém byl jednoduše odstraněn ztlumením vysokotónového reproduktoru odporovým děličem. Hodnota rezistorů byla odladěna podle poslechu na hodnotu  $1,5 \Omega$  a  $10 \Omega$ .

Nedílnou součástí simulací je i chování SPL charakteristiky mimo osu ve vertikálním směru. Ta udává, jak bude posluchač vnímat rozložení akustického tlaku, když bude stát, sedět či ležet.



Obrázek 15: Směrová charakteristika ve vertikálním směru od  $-30^\circ$  do  $+30^\circ$

Jak je vidět na obrázku 15, při poslechu v ose je charakteristika vyrovnána. Reprodukční soustava bude umístěna na podstavci, to znamená, že vysokotónový reproduktor bude při poslechu vsedě v úrovni uší, což je pro poslech ideální. Při poslechu ve stoje se charakteristika moc nemění, což je pozitivní. V případě, že bude úroveň uší nižší, než je osa reproduktoru, vzniká propad v SPL charakteristice. To ovšem není nedostatek, při poslechu člověk většinou stojí nebo sedí.

Celkové schéma reproduktorové výhybky se nachází v příloze.

### **3.3 Konstrukce**

Konstrukčně je důležité, aby jednotlivé součástky ve výhybce byly při stavbě přesně měřeny a aby bylo pracováno s co nejpřesnějšími hodnotami.

Pro realizaci výhybky byly odpory a kondenzátory umístěny na desku plošných spojů zvlášť a cívky zvlášť na dřevěnou desku. Při rozmístění cívek je důležité měnit jejich polohu umístění, tzn. některé dát vertikálně, některé horizontálně, aby se vzájemně indukčnosti ovlivňovaly co nejméně.

Cívky je důležité motat na kostry, které neovlivňují elektromagnetické pole, lze použít i E plechy (plechy, které se používají pro jádra transformátorů, mají tvar písmene E). Velká vzduchová mezera u těchto plechů dostatečně linearizuje magnetický obvod a indukčnost takové cívky není závislá na velikosti výkonu, proto nezvyšuje harmonické zkreslení při vyšších výkonech.

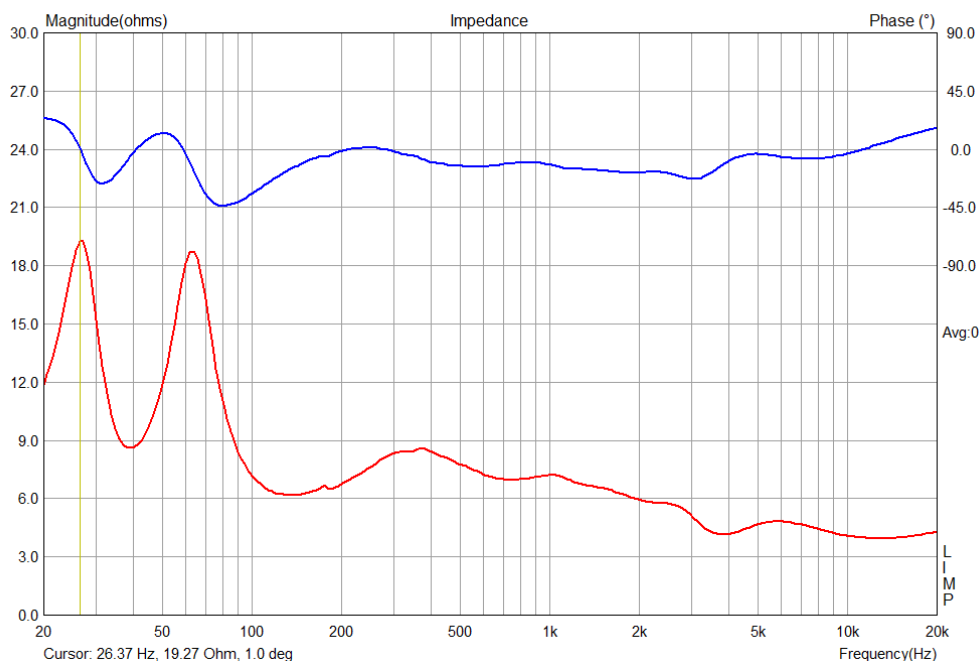
Deska plošných spojů i s rozmístěním součástek se nachází v příloze.

## 4 MĚŘENÍ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Pro ověření úspěšnosti a správnosti návrhu reproduktorové soustavy je potřeba proměřit důležité parametry reproduktorové soustavy. Důležité parametry jsou impedanční charakteristika, frekvenční SPL charakteristika, měřená v ose reproduktoru a také ve vertikálním a horizontálním směru, a dále celkové harmonické zkreslení THD.

### 4.1 Impedanční charakteristika

Jedním z důležitých parametrů je celková impedanční charakteristika reproduktorové soustavy. Tato charakteristika ukazuje průběh impedance v závislosti na celém frekvenčním pásmu, ve kterém reproduktorová soustava pracuje. Součástí této charakteristiky je fázový průběh, který zobrazuje, jak se chová elektrická fáze v celém frekvenčním pásmu a jak se mění fáze při rezonancích.



Obrázek 16: Celková impedanční charakteristika včetně fáze

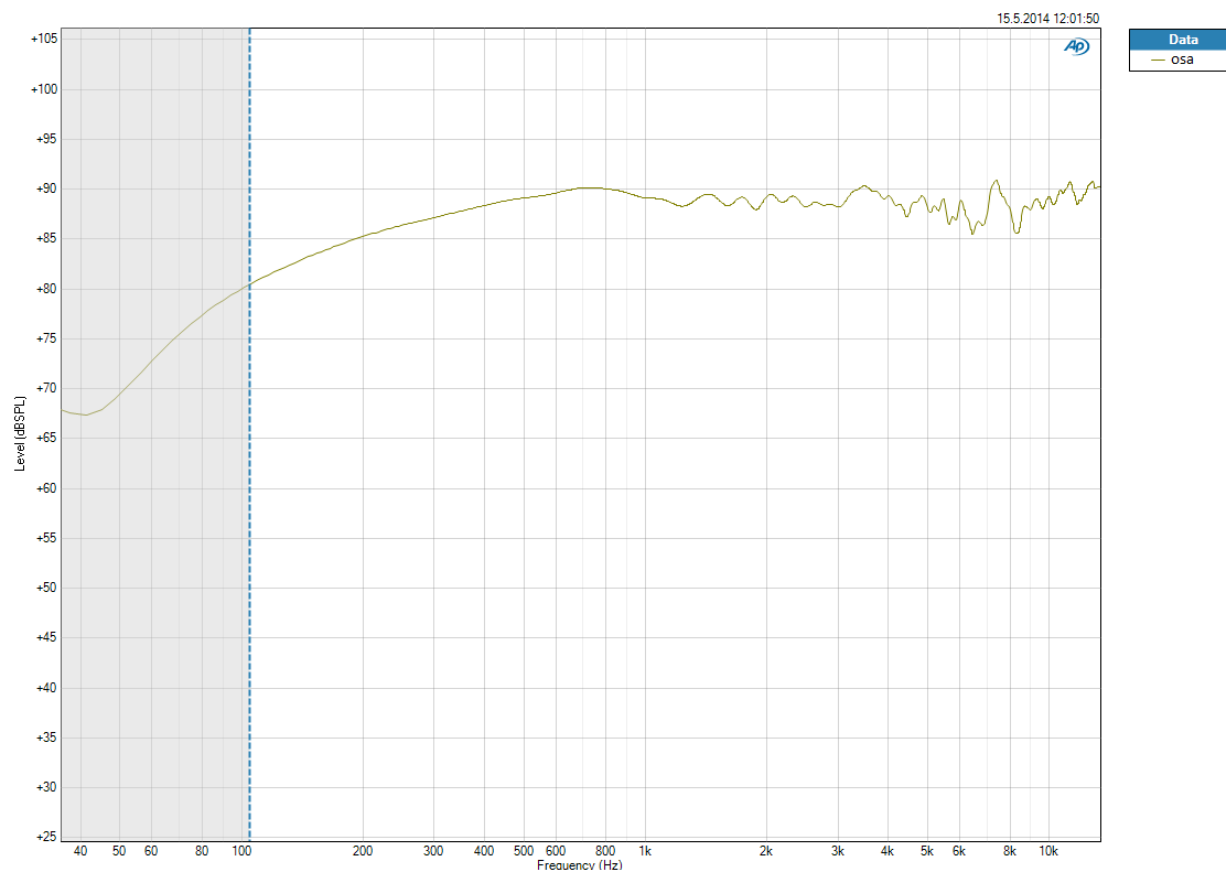
Na obrázku 16 je vidět impedanční charakteristika (červená) a fázová charakteristika (modrá). V charakteristice jsou dvě výrazné rezonance. První rezonance se nachází na 26 Hz, to je rezonance bassreflexového nátrubku. Druhá rezonance se nachází na 64 Hz a to je rezonance hlubokotónového reproduktoru. Křivky odpovídají simulacím z programu LSP Lab, které jsou v kapitole 2. Na impedanční křivce je vidět malý „zub“, který se nachází asi na 180 Hz. To je vlastní rezonance reproduktorové

skříně. Ve středotónovém pásmu charakteristiky se promítá impedanční charakteristika středotónového reproduktoru, který má jmenovitou impedanci  $8 \Omega$ . V pásmu vyšších frekvencí impedance mírně klesá, jelikož je použit reproduktor se jmenovitou impedancí  $6 \Omega$ . Na křivce fázového průběhu je vidět jak se při rezonancích otáčí fáze a ve zbytku frekvenčního pásma je fáze téměř neměnná.

## 4.2 Frekvenční SPL charakteristika

Měření frekvenční SPL charakteristiky, nám ukazuje rozložení akustického tlaku v celém frekvenčním pásmu. Důležité je, aby charakteristika byla co nejrovnější a jednotlivé frekvence byly v prostoru stejně rozloženy, a tím bychom dosáhli lepší reprodukce zvukového signálu.

V následujícím obrázku 17 je zobrazená změřená SPL frekvenční charakteristika. Měření bylo provedeno v bezdozvukové komoře, kterou je vybaven Ústav telekomunikací. Samotné měření bylo provedeno pomocí audio analyzátoru Audio Precision. Měření bylo provedeno v akustické ose reprosoustavy, která se nachází mezi vysokotónovým a středotónovým reproduktorem.



Obrázek 17: Frekvenční SPL charakteristika měřená ve zvukové ose reproduktorové soustavy

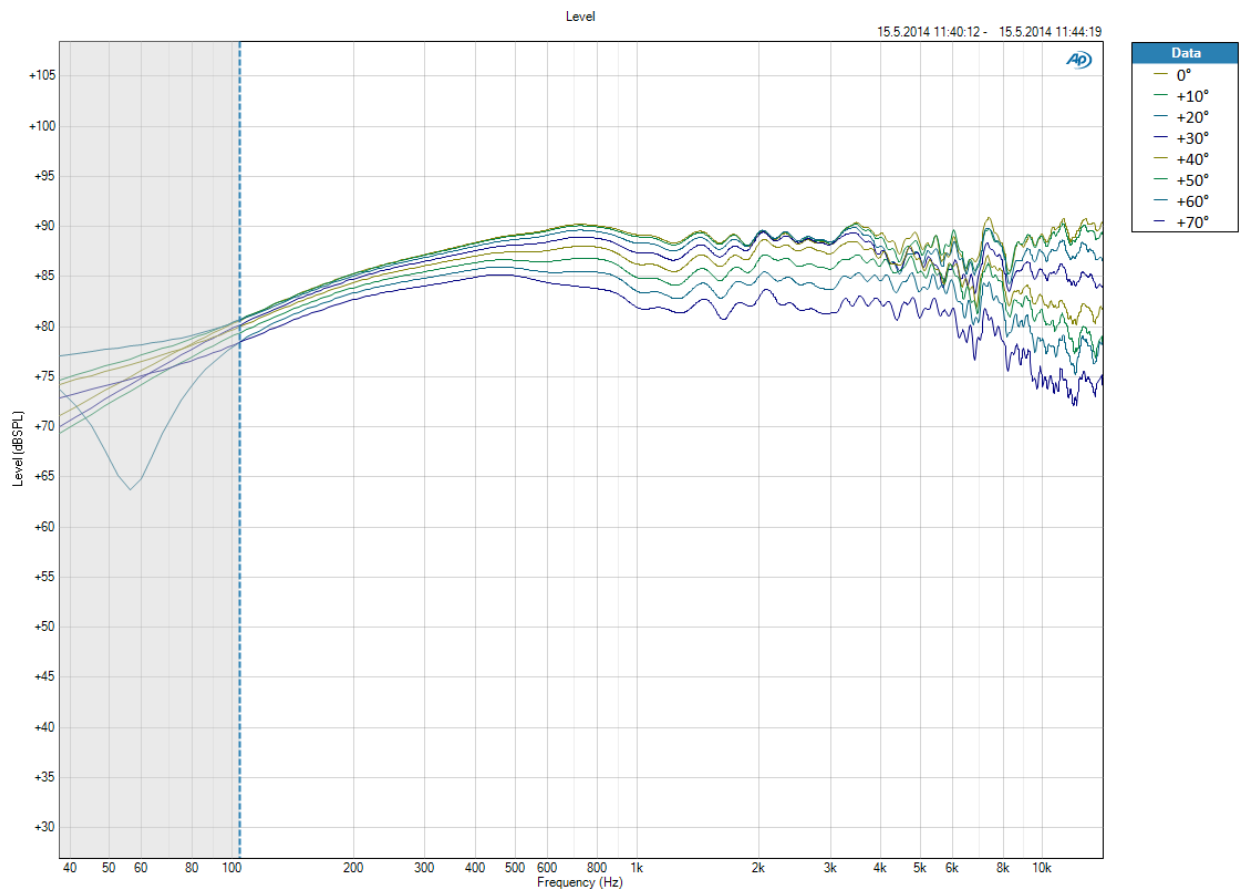
Na obrázku 17 je zobrazení frekvenční charakteristiky SPL. V levé části grafu je

tmavou barvou naznačena mezní frekvence komory, která se pohybuje okolo 100Hz. Pod touto hranicí už měření není správné. Hlubokotónové frekvence, v pásmu do 800Hz, jsou potlačeny. Je to způsobeno tím, že měřicí mikrofon byl umístěn v ose mezi vysokotónovým a středotónovým reproduktorem, takže akustický tlak nízkých frekvencí byl v místě měřícího mikrofону nižší a také tyto nízké frekvence pohltí absorpční stěny na stěnách komory. Díky tomu se také neuplatní vliv funkce bassreflexového nátrubku.

Ve středotónovém pásmu je vidět, že charakteristika je poměrně rovná s úzkými propady maximálně 3 dB. V pásmu, ve kterém pracuje vysokotónový měnič (>3 kHz), se začínají projevovat drobné nerovnosti a lehké propady. Tyto propady jsou způsobeny difrakcemi na předním panelu reproduktorové soustavy od nerovností (nedokonalé zapuštění reproduktorů, odrazy od středotónového měniče, atd.). Propady mají velice úzkopásmový charakter ve frekvenční oblasti. Tyto nerovnosti jsou téměř neslyšitelné, v případě že jsou menší než polovina oktávy.

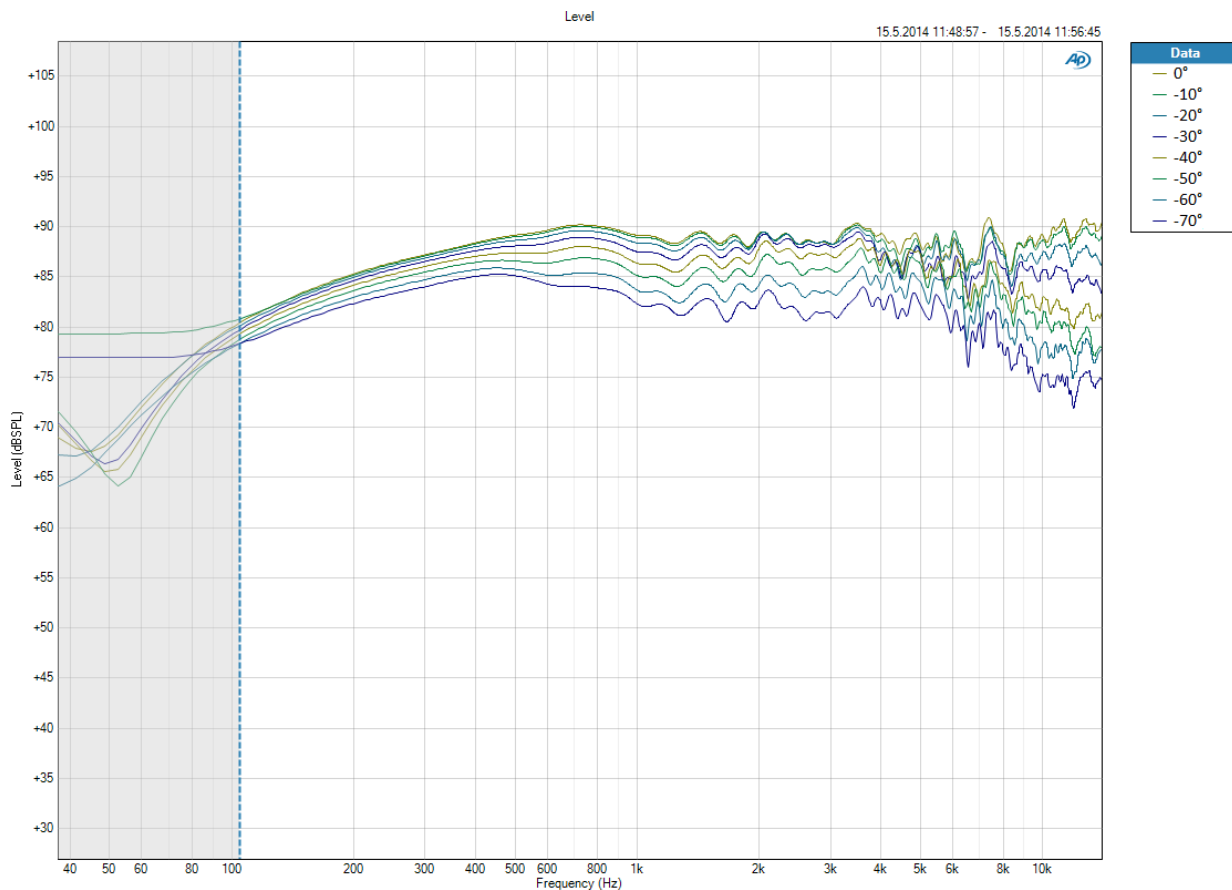
### 4.3 Směrová horizontální SPL frekvenční charakteristika

Další důležitou charakteristikou je směrová charakteristika. Tato charakteristika nám popisuje rozložení změn charakteristiky SPL v případě poslechu mimo osu reproduktorové soustavy v horizontálním směru.



Obrázek 18: Horizontální směrová charakteristika pro úhly 0 až +70° od osy reproduktorové soustavy





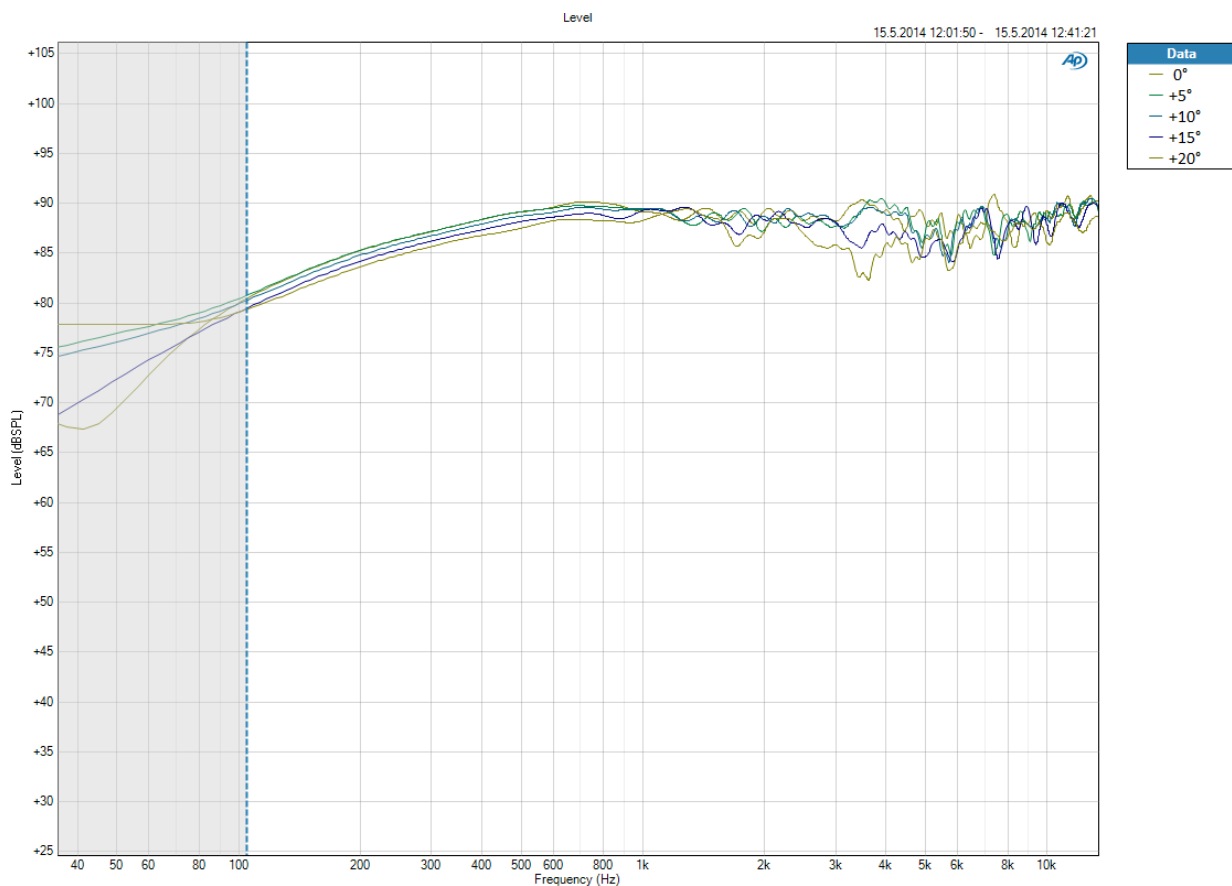
Obrázek 19: Horizontální směrová charakteristika pro úhly 0 až  $-70^\circ$  od osy reproduktorové soustavy

Jak je zřejmé z těchto grafických závislostí (Obrázek 18 a 19), tak v horizontálním směru se SPL charakteristika výrazně nemění. Velké změny v SPL charakteristice se projeví až při extrémních úhlech.

#### 4.4 Směrová vertikální SPL frekvenční charakteristika

O něco důležitější charakteristika je vertikální směrová charakteristika. Ta udává, jak se mění SPL charakteristika, když se poslechová úroveň mění směrem nahoru nebo dolů od poslechové osy reproduktorové soustavy.

Na obrázku 20 je zobrazena vertikální směrová charakteristika směrem nahoru od poslechové osy do  $20^\circ$ . Tato charakteristika je pro toto konkrétní řešení klíčová. V pokoji je reproduktorová soustava umístěna tak, že při poslechu vsedě je poslechová osa v úrovni uší. Z toho vyplývá, že se posluchač pohybuje od poslechové osy směrem nahoru, když si stoupne. Jak je vidět na charakteristice, tak se SPL charakteristika moc nemění od charakteristiky měřené v ose.

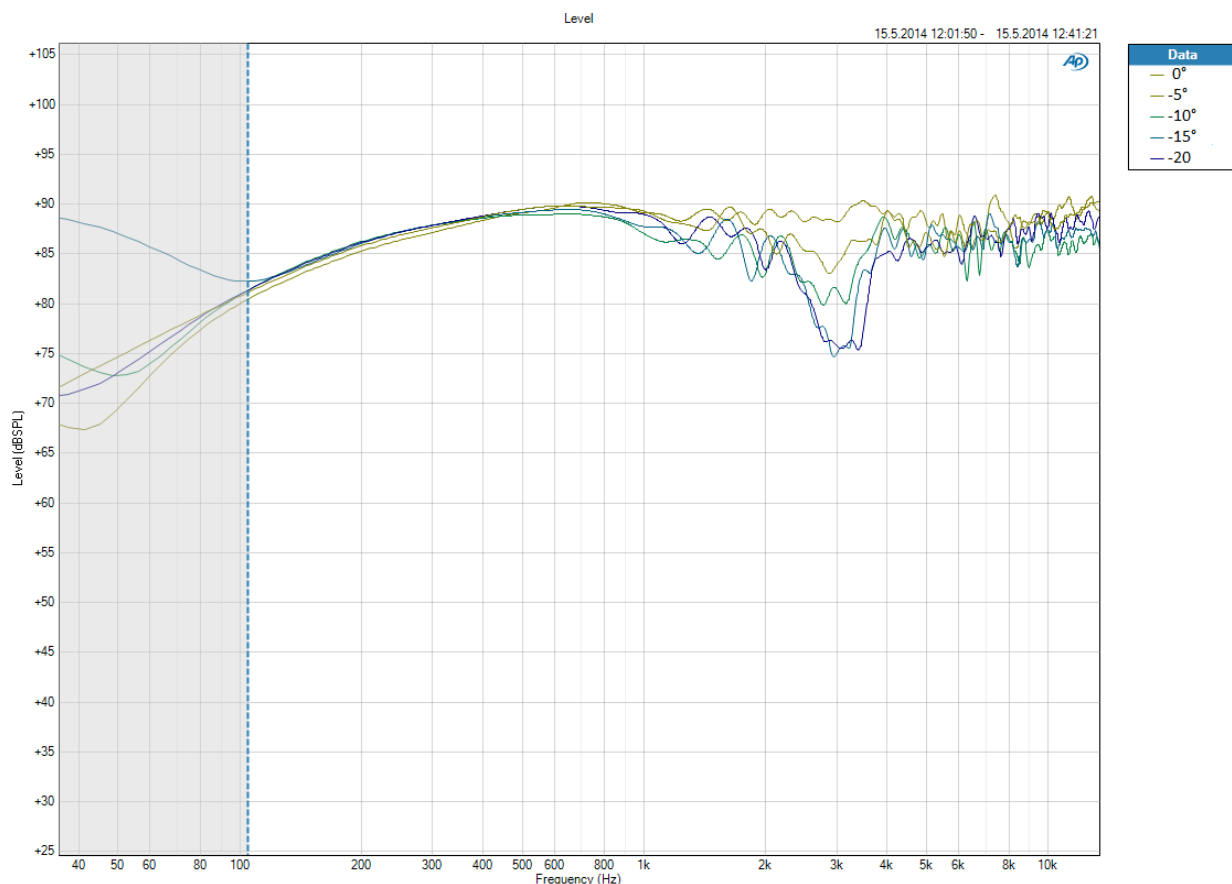


Obrázek 20: Vertikální směrová charakteristika pro úhly 0 až +20° od osy reproduktorové soustavy

Zhoršení charakteristiky se projeví na 3,5 kHz velkým propadem úrovně SPL, ale to nastává až při extrémnějších úhlech.

Naopak při pohybu směrem dolů od poslechové osy, nastává velké zhoršení v SPL charakteristice. Tato charakteristika je na obrázku 21, jak je vidět propad je od 2 kHz až do 5 kHz. To je sice nežádoucí jev, ale posluchač by si k poslechu musel lehnut, což není obvyklé, a proto není potřeba tento nežádoucí jev složitě odstraňovat.

Z těchto charakteristik je vidět jak je vysokotónový reproduktor mírně směrový. Od frekvence asi 8 kHz výše je patrné soustředění akustického tlaku směrem do osy vyzařování (mírné převýšení SPL na charakteristice) a to se projevuje poklesem akustického tlaku mimo osu (propad na SPL charakteristice).



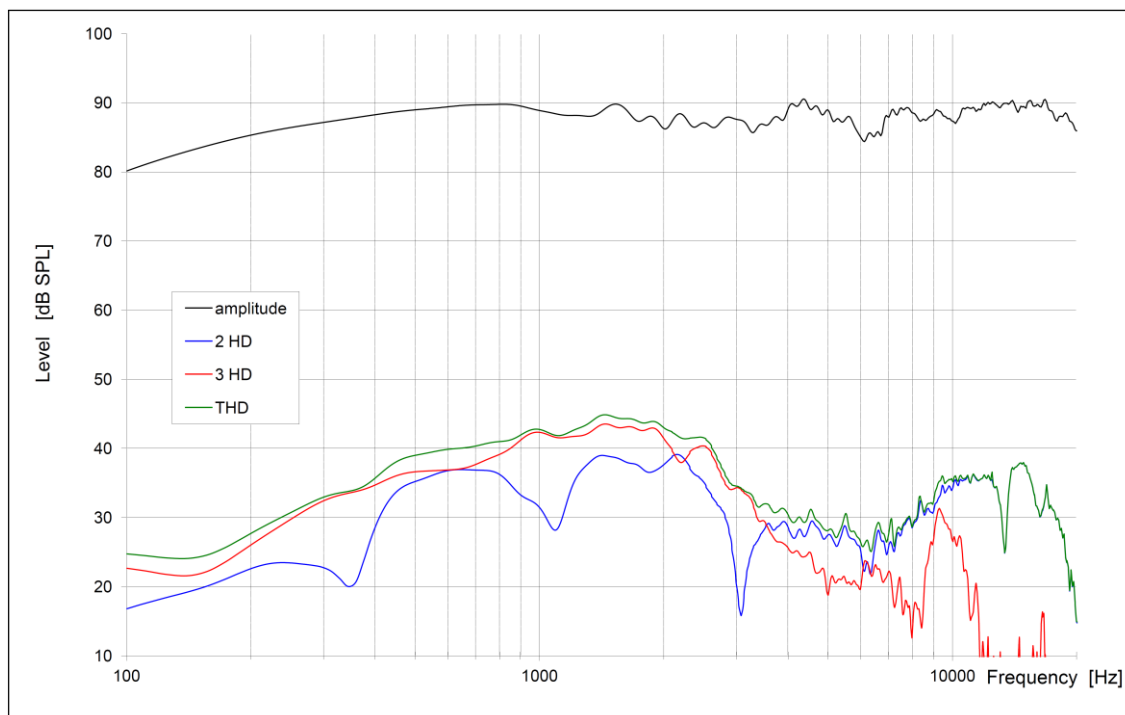
Obrázek 21: Vertikální směrová charakteristika pro úhly 0 až -20° od osy reproduktorové soustavy

## 4.5 Harmonické zkreslení THD

Charakteristika harmonického zkreslení ukazuje, do jaké míry se projeví vliv zkreslení jednotlivých reproduktorů v celém frekvenčním pásmu oproti frekvenční charakteristice. Charakteristika zobrazuje, do jakých úrovní dB SPL dosahují druhá harmonická a třetí harmonická složka zkreslení signálu. Dále graf obsahuje křivku THD (Total Harmonic Distorsion), která nám vykresluje celkové harmonické zkreslení.

Graf harmonických zkreslení, který je na obrázku 22 popisuje harmonická zkreslení, změřená audio analyzátozem Audio Precision v bezdozvukové komoře na Ústavu telekomunikací VUT v Brně. Zkreslení bylo měřeno při výkonu 1 W.

Křivka celkového harmonického zkreslení se pohybuje u hlubokotónového reproduktoru velice nízko, okolo 25 dB SPL. U středotónového reproduktoru se projevuje poměrně velký nárůst harmonického zkreslení. To je způsobeno fyzickými vlastnotmi středotónového reproduktoru. Tento reproduktor neobsahuje žádné prvky snižující harmonická zkreslení. Toto zkreslení dosahuje až k hodnotám 45 dB SPL. U vysokotónového reproduktoru je zkreslení opět nižší, hodnoty dosahují 30 dB SPL, ale zkreslení narůstá od 10 kHz. Toto zkreslení už lidské ucho není schopno zaznamenat.



Obrázek 22: SPL charakteristika s křivkami harmonických zkreslení včetně THD

Z výsledného měření se dá určit celkové harmonické zkreslení, které dosahuje maximálně  $\text{THD}=0,5\%$ .

Z hlediska věrnosti reprodukce zvuku je vhodné, aby celkové harmonické zkreslení obsahovalo převážně nižší harmonické složky. To znamená, že obsah vyšších složek zkreslení není žádoucí.

U středotónového reproduktoru se projevuje vyšší obsah třetí harmonické složky, díky tomu se jeví reprodukce pásma středních kmitočtů pocitově výrazněji než by odpovídalo charakteristice SPL.

U vysokotónového reproduktoru je třetí harmonická složka zkreslení výrazně nižší než druhá, proto reprodukce v pásmu vyšších kmitočtů působí přirozenějším dojmem.

## 5 ZÁVĚR

Úkolem této bakalářské práce bylo navrhnout pasivní třípásmovou stereofonní reproduktorovou soustavu s bassreflexem.

Výběr měničů byl zaměřen na citlivost alespoň 90 dB W/m. Středotónový reproduktor dosahuje citlivosti nižší 88 dB W/m. Vybrán byl z důvodu rovné SPL charakteristiky, skvělé konstrukce a příznivé ceny. Vzhledem k omezenému rozpočtu to byl dobrý kompromis.

Celkový návrh reproduktorové skříně byl vytvořen s ohledem na dodržení co nejlepších elektroakustických vlastností. I v případech konstrukčních problémů bylo dbáno, aby kompromis řešení dosahoval co nejpříjemnějších výsledků. Podle simulací byla odladěna délka bassreflexového nátrubku.

Výkresy reproduktorové skříně byly vytvořeny z 3D návrhu a jsou umístěny v příloze. Součástí přílohy jsou i výkresy reproduktorové výhybky.

Výhybka byla vytvořena s ohledem na dosažení co nejrovnější SPL charakteristiky i mimo poslechovou osu.

Podle výkresů byly vytvořeny skelety reproduktorové skříně, které posloužily při měření SPL charakteristik reproduktorů do simulací výhybky.

Reproduktorová výhybka byla sestrojena ve zkušebním prototypu a byla ověřena funkčnost simulací.

Dle všech návrhů a simulací byla dokončena konstrukce reproduktorové výhybky a také konstrukce celé reproduktorové soustavy.

Po dokončení všech konstrukčních prací byla reproduktorová soustava proměřena na veškeré podstatné parametry včetně směrových charakteristik reproduktorové soustavy a tato měření zhodnocena. Celkové specifikace jsou zpracovány i jako katalogový list a jsou vloženy v příloze.

Reproduktorová soustava dosahuje poměrně rovné frekvenční charakteristiky a její směrové charakteristiky dosahují velmi uspokojivých výsledků. Celkové harmonické zkreslení dosahuje maximálně THD=0,5%, což je zapříčiněno středotónovým reproduktorem, ale vzhledem k jeho ostatním vlastnostem a dobré ceně je to přijatelný kompromis.

Důležité je také poslechové a subjektivní zhodnocení výsledků, kde se reprodukce zvuku jeví velice přirozeným dojmem s poměrně dobrou dynamikou. Harmonické zkreslení je téměř neslyšitelné, občas se projeví subjektivním zvýšením středotónových frekvencí. To ovšem také závisí na druhu skladby při poslechu a na kvalitě nahrávky.

# LITERATURA

- [1] Katalogový list Vifa D25ag-05-06 [online]. HongKong: Tymphany – [cit. 12. prosince 2013]. Dostupné na www: < <http://www.tymphany.com/files/resources/dvifa/D25AG-05-06.pdf>>.
- [2] SÝKORA, B. *Stavíme reproduktorové soustavy*, část I - XLVIII. Praktická elektronika Amatérské Rádio, 10/1997 - 1/2001. Praha: AMARO, 1997-2001.
- [3] Katalogový list Tang Band W5-704D [online]. Taipei: TangBand – [cit. 12. prosince 2013]. Dostupné na www: < <http://www.hifitalo.com/pdf/w5-704.pdf>>.
- [4] TOMAN, K. *Reproduktory a reprosoustavy*. Karviná: Dexon s.r.o., 2001. 212 s.
- [5] Katalogový list IRB 20 [online]. Karviná: Dexon – [cit. 12. prosince 2013]. Dostupné na www: < <http://www.dexon.cz/data/popisy/05070.pdf>>.
- [6] SCHIMMEL, J. *Elektroakustika*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2013.
- [7] Průměry bassreflexů [online]. 21. 10. 2008 – [cit. 12. prosince 2013]. Dostupné na www: < <http://beta.repromania.net/tag/bassreflex/>>.
- [8] Konstrukce reproduktorových výhybek [online]. Karviná: Dexon – [cit. 12. prosince 2013]. Dostupné na www: < <http://www.dexon.cz/clanky/konstrukce-teorie/konstrukce-reproduktorovych-vyhybek.html>>.
- [9] WIRSUM, S. *Abeceda nf techniky*. BEN – technická literatura, Praha 2003, 192s. ISBN 80-86056-26-0.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$SPL$	Sound pressure level, hladina akustického tlaku
$C_k$	Kompenzační kondenzátor
$L_k$	Kompenzační cívka
$R_k$	Kompenzační odpor
$Q_{es}$	Elektrický činitel jakosti
$Q_{ms}$	Mechanický činitel jakosti
$Q_{ts}$	Celkový činitel jakosti
$R_e$	Stejnoseměrný odpor kmitací cívky
$L_e$	Indukčnost kmitací cívky
$f_s$	Rezonanční kmitočet reproduktoru
$M_{ms}$	Hmotnost membrány
$R_{ms}$	Mechanický odpor kmitacího systému
$C_{ms}$	Poddajnost zavěšení kmitacího systému
$V_{as}$	Ekvivalentní objem reproduktoru
$S_d$	Efektivní plocha membrány
$B_1$	Součin indukce magnetického pole v mezeře magnetického obvodu a délky vodiče v magnetickém poli
$EBP$	Efficiency bandwidth product, vhodnost použití bassreflexu
$V_b$	Potřebný objem pro maximálně rovnou charakteristiku bassreflexu
$f_3$	Dolní mezní kmitočet bassreflexu při použití aproximace maximally flat
$f_b$	Rezonanční kmitočet bassreflexu při aproximaci maximally flat
$f'_3$	Dolní mezní kmitočet bassreflexu při snížení objemu $V_b$
$f'_b$	Rezonanční kmitočet bassreflexu při snížení objemu $V_b$
$l$	Délka bassreflexového nátrubku
$V'_b$	Snížený objemu skříně v sekci hlubokotónového reproduktoru
$SPL_{peak}$	Špička, který vznikne na SPL charakteristice při snížení objemu
$f_1$	Dělicí frekvence mezi hlubokotónovým a středotónovým reproduktorem
$f_2$	Dělicí frekvence mezi středotónovým a vysokotónovým reproduktorem
$l_{osaBS}$	Rozteč os mezi hlubokotónovým a středotónovým reproduktorem

$l_{os_{aSV}}$	Rozteč os mezi středotónovým a vysokotónovým reproduktorem
$c_0$	Rychlost zvuku
$MDF$	Medium density fibreboard, polotvrdá dřevovláknitá deska
$d$	Průměr bassreflexového nátrubku
$THD$	Total harmonic distorsion, celkové harmonické zkreslení

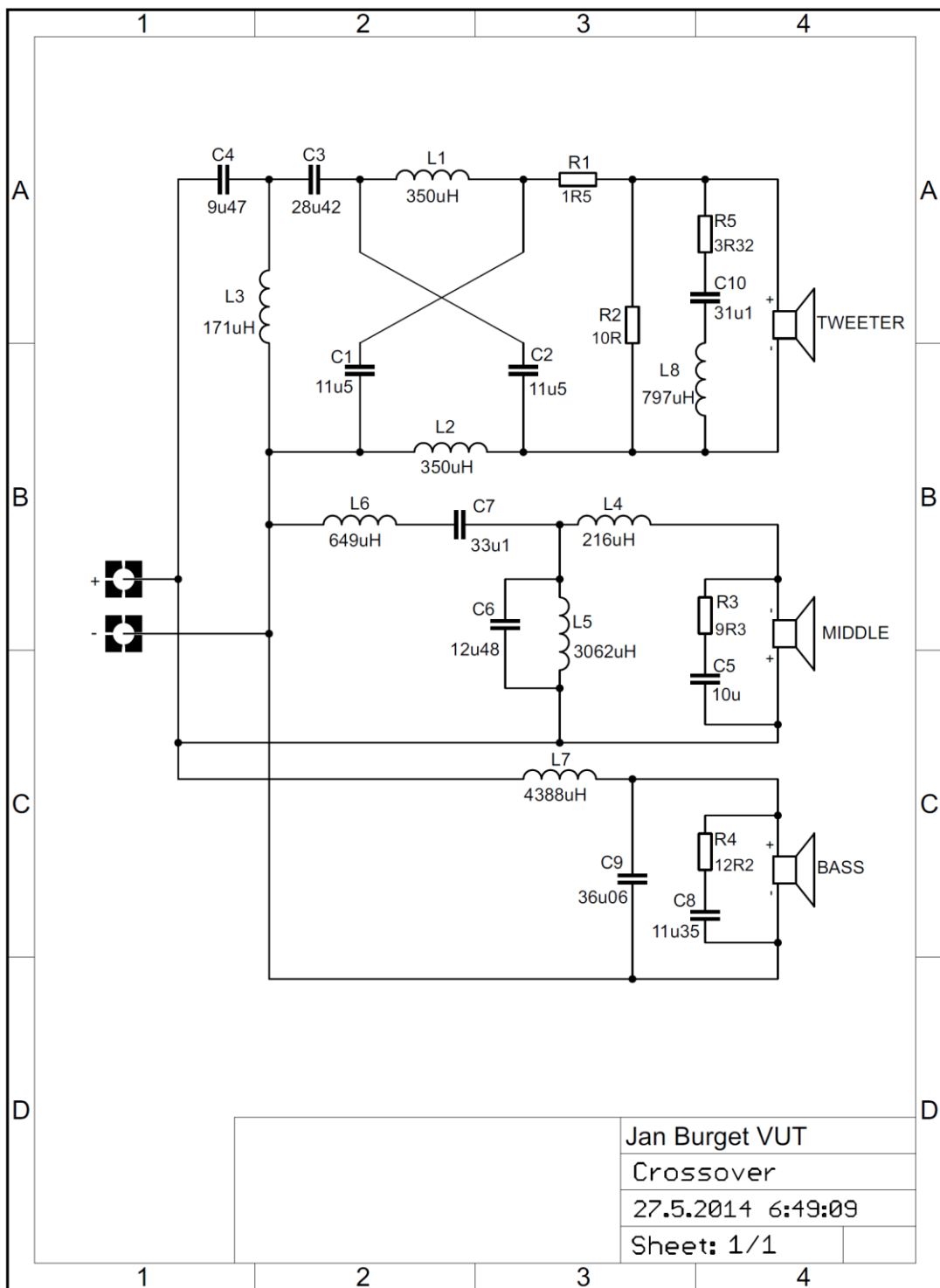


# SEZNAM PŘÍLOH

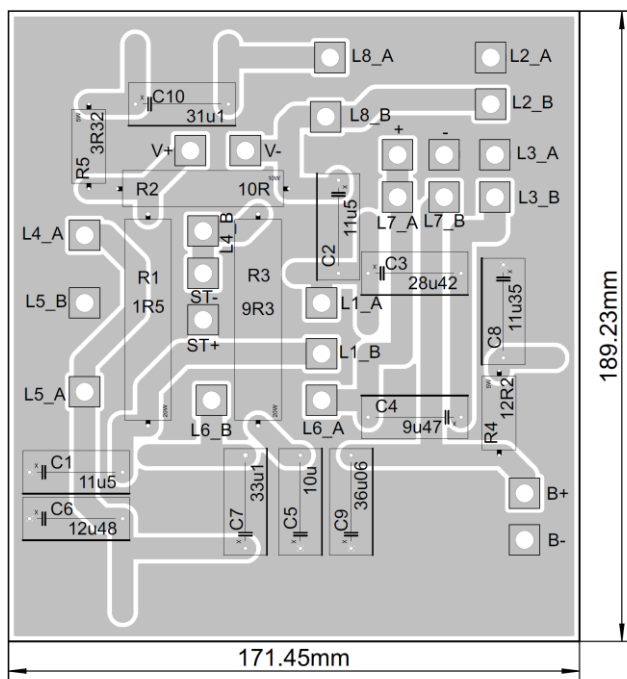
<b>A</b>	<b>Návrh Výhybky</b>	<b>32</b>
A.1	Obvodové zapojení výhybky .....	32
A.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	33
A.3	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů) .....	33
A.4	Seznam použitých součástek .....	34
<b>B</b>	<b>Výkresy</b>	<b>35</b>
B.1	Výkres reproduktorové skříně .....	35
<b>C</b>	<b>Fotografie</b>	<b>36</b>
C.1	Fotografie skeletů.....	36
C.2	Osazené reproduktory.....	37
C.3	Fotografie reproduktorové výhybky.....	38
<b>D</b>	<b>Protokol o měření (datasheet)</b>	<b>40</b>
D.1	Specifikace.....	40
D.2	Základní charakteristiky .....	40
D.3	Směrové charakteristiky .....	41

# A NÁVRH VÝHYBKY

## A.1 Obvodové zapojení výhybky

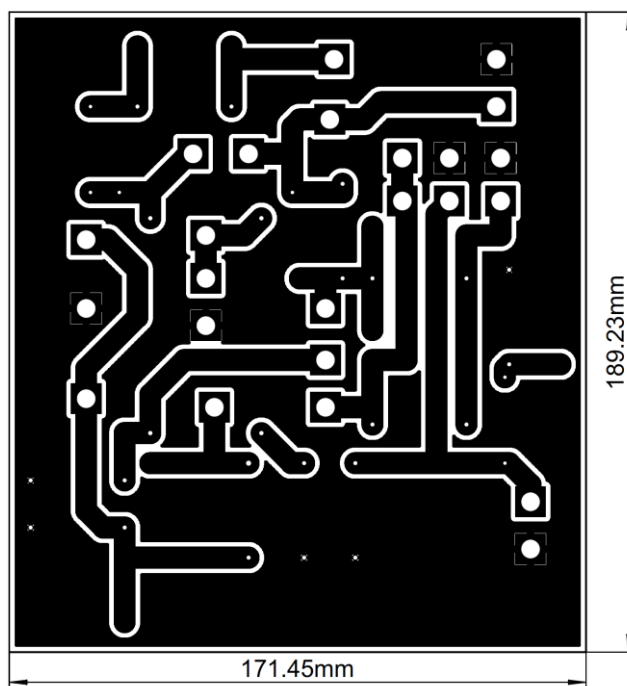


## A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



Rozměr desky 171,45 x 189,23 [mm], měřítko M1:2

## A.3 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



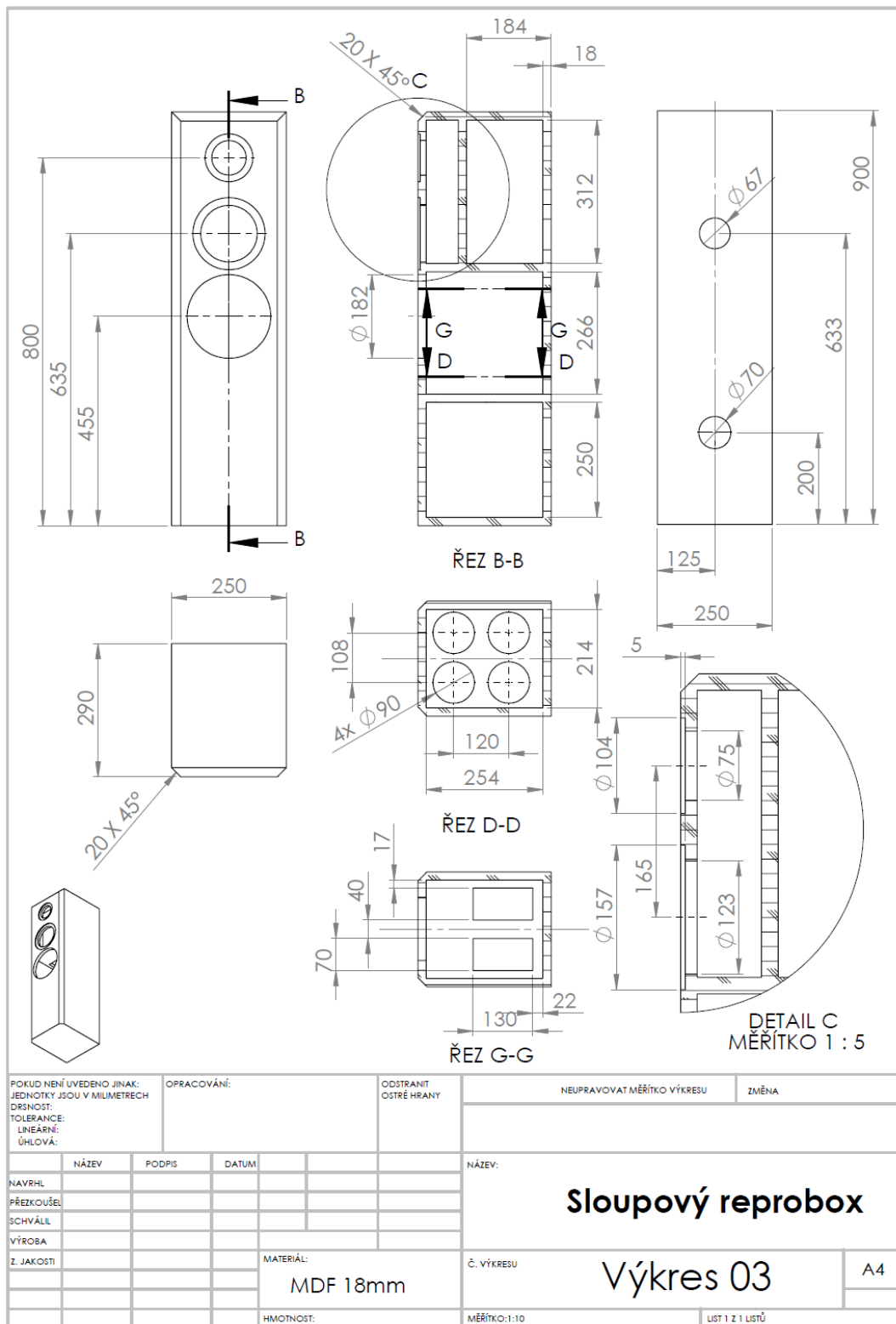
Rozměr desky 171,45 x 189,23 [mm], měřítko M1:2

## A.4 Seznam použitých součástek

Označení ve schématu	Hodnota	Popis
R1	1R5	Rezistor drátový 20W
R2	10R	Rezistor drátový 10W
R3	9R1	Rezistor drátový 20W
R4	12R	Rezistor drátový 5W
R5	3R3	Rezistor drátový 5W
C1	11 $\mu$ 5	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C2	11 $\mu$ 5	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C3	28 $\mu$ 42	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C4	9 $\mu$ 47	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C5	10 $\mu$	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C6	12 $\mu$ 48	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C7	33 $\mu$ 1	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C8	11 $\mu$ 35	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C9	36 $\mu$ 06	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
C10	31 $\mu$ 1	Složené hodnoty z axiálních svitkových kondenzátorů (TC205-TC209)
L1	0,35 $\mu$ H	Cívka se vzduchovým jádrem
L2	0,35 $\mu$ H	Cívka se vzduchovým jádrem
L3	171 $\mu$ H	Cívka se vzduchovým jádrem
L4	216 $\mu$ H	Cívka se vzduchovým jádrem
L5	3062 $\mu$ H	Cívka se vzduchovým jádrem
L6	649 $\mu$ H	Cívka se vzduchovým jádrem
L7	4388 $\mu$ H	Cívka s jádrem z E plechů
L8	797 $\mu$ H	Cívka se vzduchovým jádrem

# B VÝKRESY

## B.1 Výkres reproduktorové skříně



## C FOTOGRAFIE

### C.1 Fotografie skeletů



Obr. 1: Neosazené skelety reproduktorové soustavy

## C.2 Osazené reproduktory



a)



b)

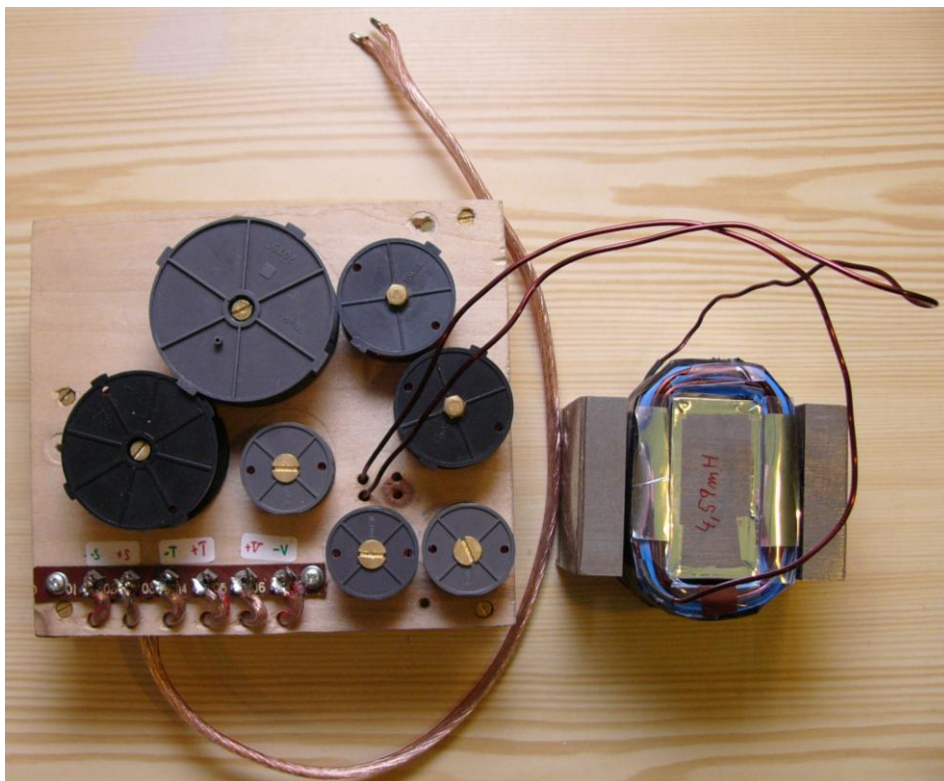
Obr. 2: a) Přední strana kompletně osazené reproduktorové soustavy

b) Zadní strana kompletně osazené reproduktorové soustavy

### C.3 Fotografie reproduktorové výhybky

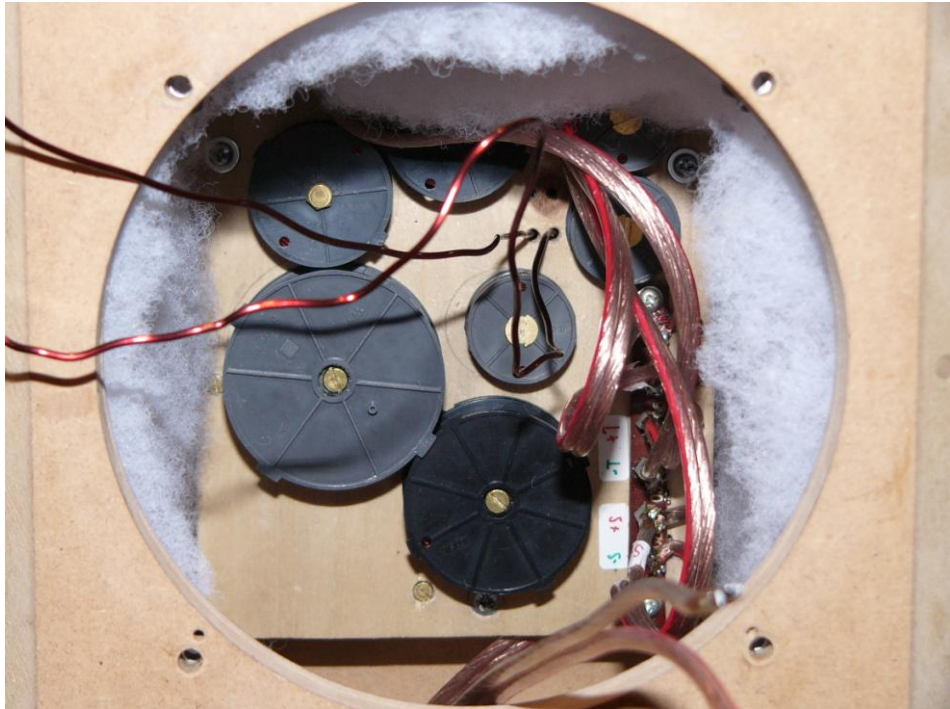


Obr. 3: Boční pohled zkompletované reproduktorové výhybky



Obr. 4: Pohled shora na zkompletovanou reproduktorovou výhybku





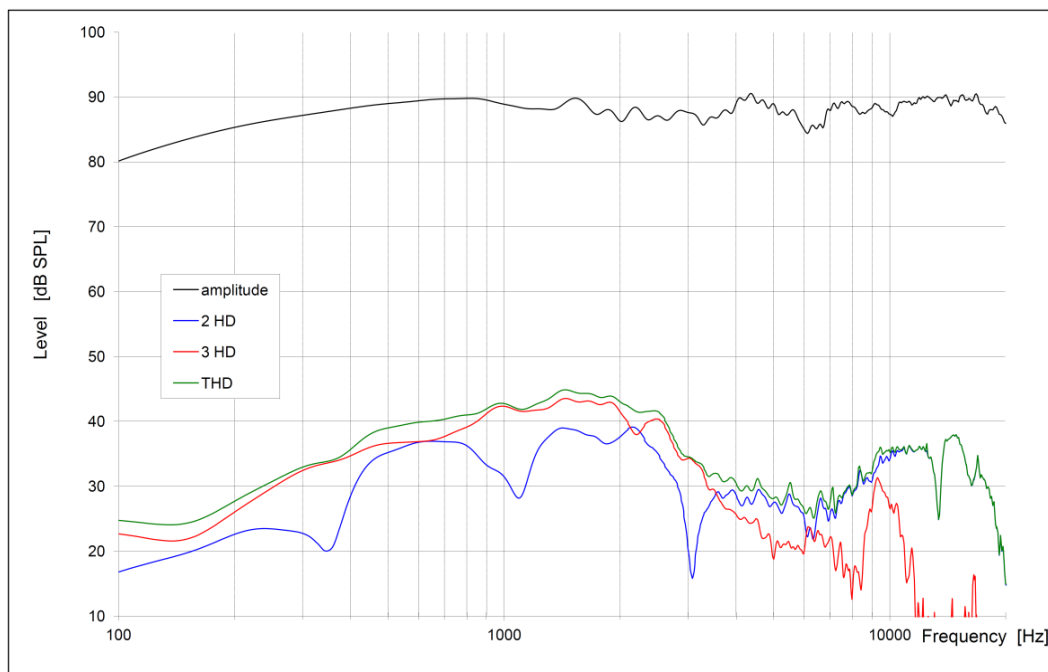
Obr. 5: Pohled skrze otvor hlubokotónového reproduktoru na zabudovanou reproduktorovou výhybku uvnitř reproduktorové soustavy

# D PROTOKOL O MĚŘENÍ (DATASHEET)

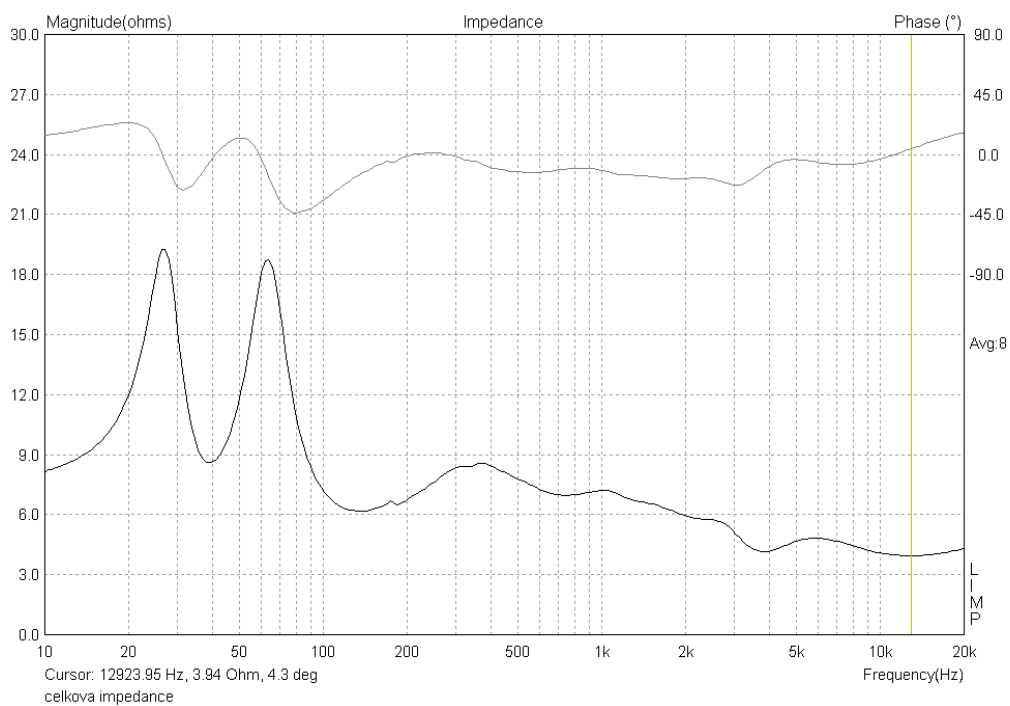
## D.1 Specifikace

<b>Frekvenční rozsah (-3dB):</b>	35 Hz - 20 kHz
<b>Power Handling (Continuous):</b>	100 W
<b>Power Handling (Peak):</b>	200 W
<b>Maximální doporučený výkon zesilovače:</b>	100 W
<b>Citlivost (2.83V/1m):</b>	90 dB
<b>Dělicí frekvence:</b>	800 Hz 12db/okt; 2600Hz 18dB/okt
<b>Nominalní Impedance:</b>	8 $\Omega$
<b>Minimalní impedance:</b>	4,2 $\Omega$
<b>Hlubokotónový reproduktor:</b>	Dexon IRB20 8"
<b>Středotónový reproduktor:</b>	Tang Band W5-704D 5"
<b>Vysokotónový reproduktor:</b>	Vifa D25ag-05-06 1"
<b>Rozměry (V x Š x H):</b>	900x250x290 mm
<b>Hmotnost:</b>	24,8 kg

## D.2 Základní charakteristiky

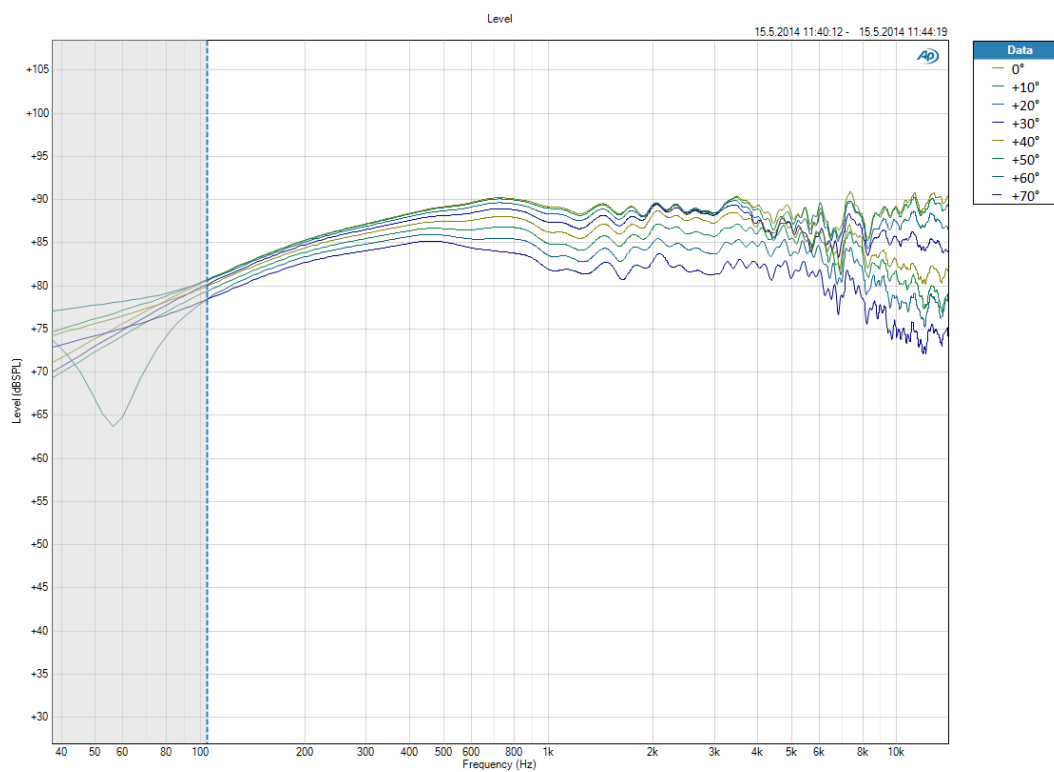


Graf 1: Charakteristika SPL včetně harmonických zkreslení a THD

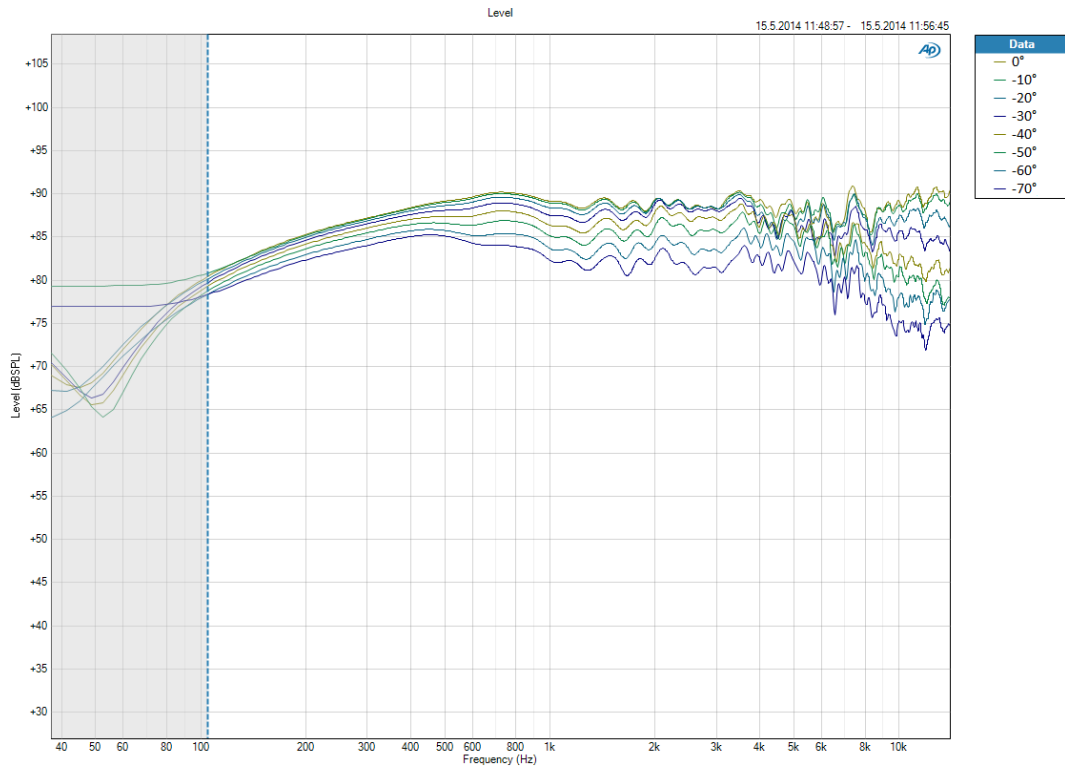


Graf 2: Celková impedanční charakteristika včetně elektrické fáze

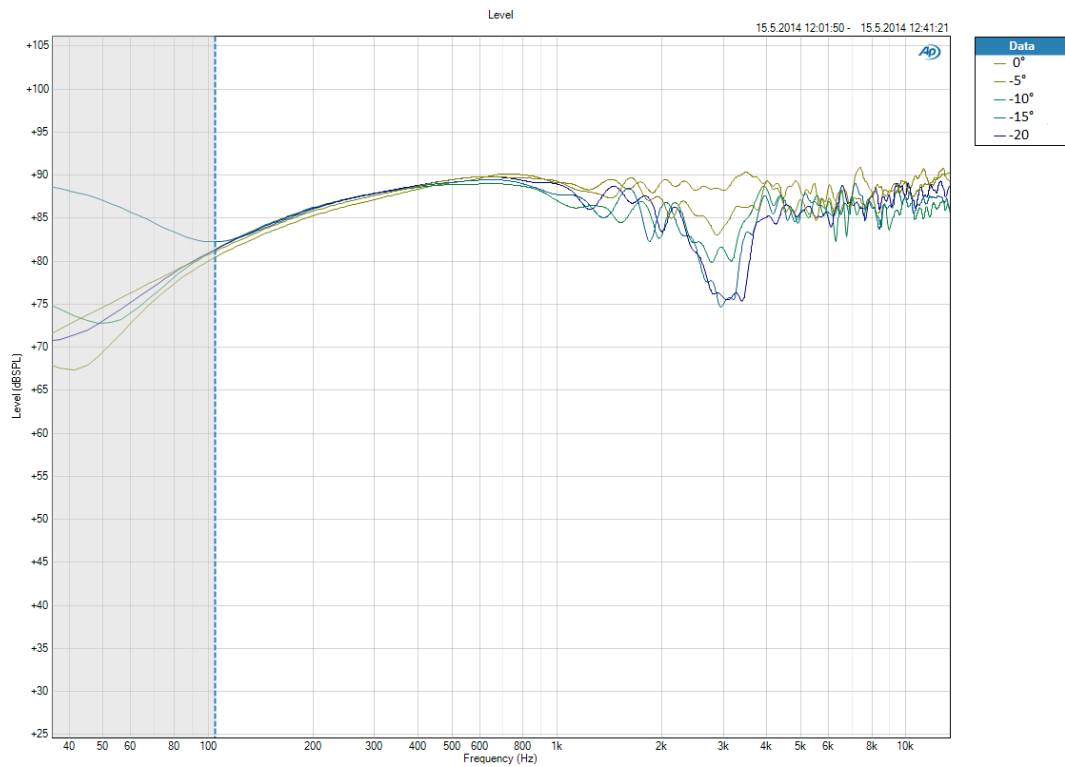
### D.3 Směrové charakteristiky



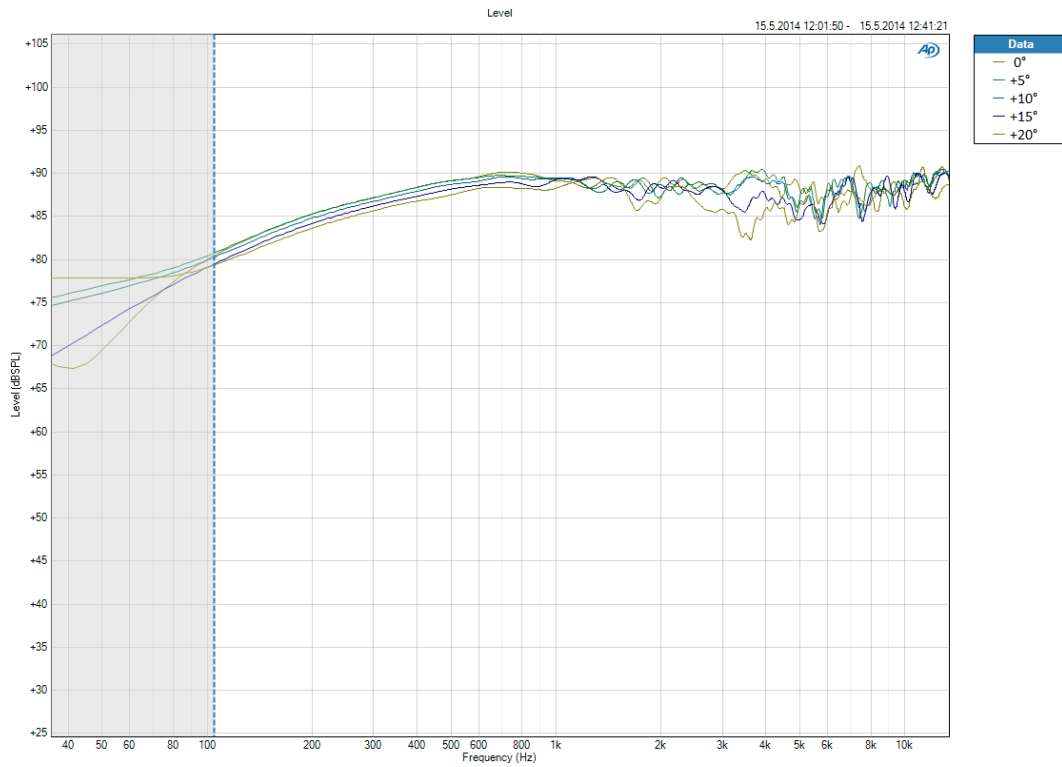
Graf 3: Horizontální směrová charakteristika 0° až +70°



Graf 4: Horizontální směrová charakteristika 0° až -70°



Graf 5: Vertikální směrová charakteristika 0° až -20°



Graf 6: Vertikální směrová charakteristika 0° až 20°