

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací (KAE)**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh aktivní reproduktorové soustavy pro  
multikanálový poslech**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. František KORDÍK</b>
Osobní číslo:	<b>E17N0048P</b>
Studijní program:	<b>N2612 Elektrotechnika a informatika</b>
Studijní obor:	<b>Telekomunikační a multimediální systémy</b>
Téma práce:	<b>Návrh aktivní reproduktorové soustavy pro multikanálový poslech</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací</b>

### Zásady pro vypracování

1. Definujte technické požadavky kladené na reproduktorové soustavy určené pro kontrolní poslech a multikanálovou reprodukci používané v profesionálních aplikacích (poslechové místnosti, zvuková studia). Zaměřte se především na doporučení ITU-R BS.1116-1, EBU Tech. 3276, EBU Tech 3276-E, AESTD1001.1.01-10.
2. Navrhněte a realizujte aktivní reproduktorovou soustavu splňující definované technické požadavky.
3. Proveďte měření parametrů navržené reproduktorové soustavy a případně návrh dále upravte tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů.

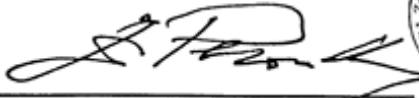
Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**



Seznam doporučené literatury:

1. Dickason, V.: Loudspeaker design cookbook. Audio amateur press – 7th edition.
2. D'Appolito, J.: Testing loudspeakers. Audio amateur press.

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

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**

  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
  
**Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací aktivní reproduktorové soustavy pro multikanálový poslech v profesionálních aplikacích (poslechové místnosti, zvuková studia). Technické požadavky na soustavu jsou určeny dle doporučení ITU-R BS.1116-1, EBU Tech 3276, EBU Tech 3276-E a AESTD1001.1.01-10. V práci je popsán postup výběru elektroakustických měničů, měření jejich impedančních charakteristik, návrh a realizace bassreflexových reproduktorových ozvučnic. Následně jsou změřeny frekvenční charakteristiky měničů a proveden návrh elektroniky soustavy - vstupní jednotka, regulace hlasitosti, frekvenční výhybky, ekvalizační filtry.

## **Klíčová slova**

Aktivní reprosoustava, multikanálový poslech, impedanční charakteristika měniče, TS parametry, návrh ozvučnice, bassreflex, frekvenční charakteristika měniče, návrh aktivní elektroniky.

## **Abstract**

This thesis describes the design of an active loudspeaker monitor for multichannel reproduction in professional applications (listening rooms, sound studios). Technical requirements are specified by standards ITU-R BS.1116-1, EBU Tech. 3276, EBU Tech 3276-E and AESTD1001.1.01-10. The thesis deals with the selection of speakers, measuring of impedance response of a speaker, design and realization of a bass-reflex enclosure. The next step is measuring frequency responses of speakers and design of loudspeaker electronics – including input unit, volume control, frequency crossovers, equalization filters.

## **Key words**

Active loudspeaker monitor, multichannel reproduction, impedance response of speaker, TS parameters, design of enclosure, bass-reflex, frequency response of speaker, design of active electronics.

## Prohlášení

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

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



.....  
podpis

V Plzni dne 10.7.2020

František Kordík

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>1</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>2</b>
<b>1 TECHNICKÉ POŽADAVKY KLADENÉ NA REPRODUKTOROVOU SOUSTAVU</b> .....	<b>3</b>
1.1 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA SOUSTAVY .....	3
1.2 DYNAMICKÝ ROZSAH SOUSTAVY .....	4
1.3 NELINEÁRNÍ ZKRESLENÍ SOUSTAVY .....	5
1.4 INDEX SMĚROVOSTI SOUSTAVY .....	5
1.5 VĚRNOST V ČASOVÉ DOMÉNĚ.....	5
1.6 ČASOVÉ ZPOŽDĚNÍ MEZI JEDNOTLIVÝMI KANÁLY .....	5
<b>2 KONCEPCE REPROSOUSTAVY</b> .....	<b>6</b>
<b>3 PARAMETRY ELEKTROAKUSTICKÝCH MĚNIČŮ</b> .....	<b>6</b>
3.1 DŮLEŽITÉ PARAMETRY PRO VÝBĚR MĚNIČŮ .....	6
3.2 KATALOGOVÉ PARAMETRY ZVOLENÝCH MĚNIČŮ.....	6
3.3 MAXIMÁLNÍ DOSAŽITELNÁ HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU MĚNIČEM.....	7
3.4 SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA MĚNIČE .....	9
3.5 HARMONICKÉ ZKRESLENÍ MĚNIČŮ .....	10
<b>4 MĚŘENÍ TS PARAMETRŮ</b> .....	<b>12</b>
4.1 TS PARAMETRY .....	12
4.2 PRINCIP MĚŘENÍ IMPEDANČNÍ CHARAKTERISTIKY MĚNIČE .....	13
4.3 NÁVRH OBVODU PRO MĚŘENÍ IMPEDANCE MĚNIČE .....	14
4.4 MĚŘENÍ IMPEDANČNÍ CHARAKTERISTIKY .....	15
4.5 IMPEDANČNÍ CHARAKTERISTIKY MĚNIČŮ .....	16
4.6 ODVOZENÍ TS PARAMETRŮ .....	17
<b>5 NÁVRH REPRODUKTOROVÝCH OZVUČNIC</b> .....	<b>18</b>
5.1 KONCEPCE OZVUČNIC .....	18
5.2 POSTUP NÁVRHU OZVUČNIC .....	18
5.3 NÁVRH OZVUČNICE SATELITU .....	19
5.4 NÁVRH OZVUČNICE SUBWOOFERU .....	21
<b>6 VÝROBA OZVUČNIC</b> .....	<b>22</b>
<b>7 MĚŘENÍ FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK MĚNIČŮ</b> .....	<b>23</b>
7.1 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA BASOVÉHO MĚNIČE 1 .....	23
7.2 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA STŘEDOBASOVÉHO MĚNIČE 2.....	24
7.3 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA VÝŠKOVÉHO MĚNIČE 3 .....	26
<b>8 BLOKOVÉ SCHÉMA SOUSTAVY</b> .....	<b>27</b>
8.1 SIGNÁLOVÉ ÚROVNĚ V ELEKTRONICE SOUSTAVY.....	28
<b>9 NÁVRH ELEKTRONIKY</b> .....	<b>29</b>
9.1 BLOK VSTUPNÍ JEDNOTKA .....	29
9.2 BLOK VCA.....	29
9.3 SUMAČNÍ ČLEN.....	30
9.4 BLOKY ELEKTRONIKY VĚTVE MĚNIČE 1 .....	30
9.5 BLOKY ELEKTRONIKY VĚTVE MĚNIČE 2 .....	35

9.6	BLOKY ELEKTRONIKY VĚTVE MĚNIČE 3 .....	40
<b>10</b>	<b>VÝSLEDNÁ CHARAKTERISTIKA SOUSTAVY.....</b>	<b>44</b>
<b>11</b>	<b>NÁVRH DPS S ELEKTRONIKOU SOUSTAVY.....</b>	<b>46</b>
<b>12</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ REPROSOUSTAVY.....</b>	<b>46</b>
<b>13</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>46</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>47</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>49</b>
	<b>PŘÍLOHA A: TECHNICKÉ VÝKRESY OZVUČNIC.....</b>	<b>49</b>
	<b>PŘÍLOHA B: MOTIV DPS PRO ELEKTRONIKU SOUSTAVY.....</b>	<b>51</b>



## Úvod

Diplomová práce je zaměřena na návrh a realizaci aktivní reproduktorové soustavy pro multikanálový poslech v profesionálních aplikacích (poslechové místnosti, zvuková studia). Nejprve jsou stanoveny technické požadavky na reprosoustavu, mezi které patří hlavně vyrovnanost frekvenční charakteristiky, požadovaná hladina akustického tlaku a nízké harmonické zkreslení. S ohledem na tyto požadavky je zvolena třípásmová koncepce soustavy a proveden výběr elektroakustických měničů.

Pro ověření jejich katalogových parametrů je navržen obvod pro měření impedanční charakteristiky měniče. Z naměřených impedančních charakteristik jsou následně odvozeny TS parametry pro možnost vytvoření modelu chování měniče. K tomu je využitý návrhový software LEAP EnclosureShop. V něm byly následně navrženy a odsimulovány bassreflexové ozvučnice pro subwoofer (měnič 1) a satelit (měnič 2 + měnič 3). Následuje výroba ozvučnic a osazení měničů.

Dále proběhne měření frekvenčních charakteristik jednotlivých měničů osazených v ozvučnicích. Ty jsou porovnány s charakteristikami nasimulovanými v návrhovém softwaru. Naměřené frekvenční charakteristiky jsou následně použity pro návrh elektroniky soustavy. Elektronika se skládá celkově z 6 větví (1 pro subwoofer, 5 pro satelit). Součástí elektroniky jsou bloky vstupní jednotky, regulace hlasitosti, frekvenčních výhybek a ekvalizačních filtrů. V textu je uvedené celkové blokové schéma soustavy včetně popisu signálových úrovní.

V závěrečné části práce jsou uvedeny výsledné frekvenční charakteristiky soustavy včetně možného nastavení ekvalizačních filtrů. Přílohy obsahují výkresy ozvučnic a návrh DPS s elektronikou.

## Seznam symbolů a zkratek

f.....	Frekvence [Hz]
$L_p$ .....	Hladina akustického tlaku [dBSPL]
$L_{pmax}$ .....	Maximální hladina akustického tlaku [dBSPL]
$L_{noise}$ .....	Úroveň vlastního šumu soustavy [dBA]
DI.....	Index směrovosti [dB]
$S_l$ .....	Citlivost měniče [dB]
$t_s$ .....	Věrnost v časové doméně [s]
$P_{ak}$ .....	Akustický výkon [W]
$X_{max}$ .....	Maximální výchylka membrány měniče [m]
r.....	Vzdálenost [m]
S.....	Obsah plochy [m <sup>2</sup> ]
P.....	Příkon [W]
$F_s$ .....	Rezonanční kmitočet měniče [Hz]
Re.....	Stejnoseměrný odpor měniče [ $\Omega$ ]
$L_e$ .....	Indukčnost kmitací cívky měniče [mH]
$Q_{ms}$ .....	Mechanický činitel jakosti [-]
$Q_{es}$ .....	Elektrický činitel jakosti [-]
$Q_{ts}$ .....	Celkový činitel jakosti [-]
$S_d$ .....	Efektivní plocha membrány [m <sup>2</sup> ]
$C_{ms}$ .....	Poddajnost membrány [mm/N]
$M_{md}$ .....	Hmotnost kmitacího systému [g]
$M_{ms}$ .....	Hmotnost kmitacího systému včetně vzduchové zátěže [g]
$V_{as}$ .....	Ekvivalentní objem měniče [l]
$X_{max}$ .....	Maximální lineární výchylka membrány [mm]
Bl .....	Silový faktor [T.m]

# 1 Technické požadavky kladené na reproduktorovou soustavu

Cílem diplomové práce je návrh aktivní reproduktorové soustavy určené pro kontrolní poslech a multikanálovou reprodukci s použitím v profesionálních aplikacích (poslechové místnosti, zvuková studia). Tímto požadavkem se zabývají následující doporučení:

- *ITU-R BS.1116-1: Metody subjektivního posouzení nízké degradace kvality ve zvukových systémech včetně těch multikanálových [1]*
- *EBU Tech 3276: Poslechové podmínky pro posouzení materiálu zvukových programů: monofonních a stereofonických [2]*
- *EBU Tech 3276-E: Poslechové podmínky pro posouzení materiálu zvukových programů: multikanálových [3]*
- *AESTD1001.1.01-10: Multikanálové zvukové systémy a operace s nimi [4]*

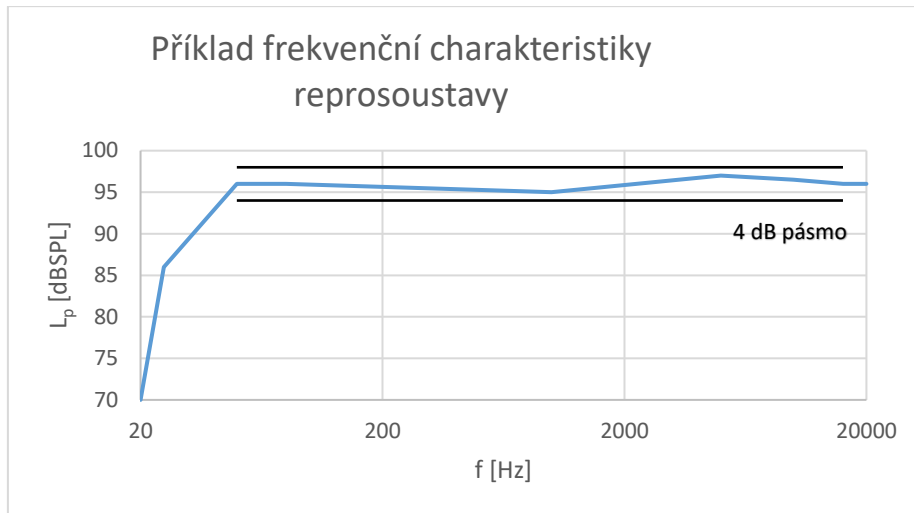
V každém z výše zmíněných dokumentů nalezneme část věnující se technickým požadavkům na reprodukční zařízení. Jelikož jsou technické požadavky na parametry reproduktorové soustavy u jednotlivých doporučení velice podobné, proběhlo jejich sjednocení. Pokud byla mezi jednotlivými doporučeními diference v požadavcích na daný parametr, bylo zvoleno přísnější kritérium. Jednotlivé parametry jsou popsány níže.

## 1.1 Frekvenční charakteristika soustavy

Jedná se o závislost hladiny akustického tlaku  $L_p$ , vybuzeného reprosoustavou, na kmitočtu. Charakteristika je měřena mikrofonom umístěným zpravidla ve vzdálenosti 1 m od zvolené referenční osy soustavy. Na vstup reprosoustavy je přiveden signál v podobě různového šumu, který pokrývá požadovaný kmitočtový rozsah.

V požadavcích na frekvenční charakteristiku se všechna 4 doporučení shodují. Cílem je dosáhnout co nejvyrovnanější výsledné frekvenční charakteristiky soustavy. Frekvenční charakteristika by měla v celém pásmu 40 Hz – 16 kHz splňovat následující požadavky:

- 1) Frekvenční charakteristika naměřená v akustické ose soustavy (směrový úhel  $0^\circ$ ) by měla spadat v kmitočtovém pásmu 40 Hz – 16 kHz do tolerančního pásma 4 dB.



Obr. 1 Příklad frekvenční charakteristiky soustavy se zobrazením tolerančního pásma 4 dB

- 2) Frekvenční charakteristika naměřená při směrovém úhlu  $\pm 10^\circ$  by se neměla od charakteristiky naměřené v akustické ose soustavy v bodě 1) lišit o více než 3 dB (v horizontální i vertikální rovině).
- 3) Frekvenční charakteristika naměřená při směrovém úhlu  $\pm 30^\circ$  by se neměla od charakteristiky naměřené v akustické ose soustavy v bodě 1) lišit o více než 4 dB (pouze v horizontální rovině).

[1, 2, 3, 4]

## 1.2 Dynamický rozsah soustavy

### 1) Maximální hladina akustického tlaku

Jedná se o maximální hladinu akustického tlaku  $L_{pmax}$ , kterou dokáže soustava vyprodukovat. Tuto hladinu by měla být soustava schopna vytvářet po dobu alespoň 10 minut bez rizika tepleného nebo mechanického poškození jejích vlastních součástí. Na vstup reprosoustavy je přiveden šumový signál simulující běžný programový materiál. Měřeno hlukoměrem nastaveným na RMS (slow) hodnotu a plochou odezvou.

- $L_{pmax} > 112 \text{ dB SPL}$

### 2) Úroveň vlastního šumu soustavy

Úroveň vlastního šumu soustavy  $L_{noise}$  představuje šum reprodukováný vlastní soustavou bez přivedeného vstupního signálu. Úroveň by měla být změřena hlukoměrem s nastaveným váhovým filtrem typu A.

- $L_{noise} \leq 10 \text{ dBA}$

Maximální hladina akustického tlaku i úroveň vlastního šumu soustavy jsou měřeny ve vzdálenosti 1 m od referenční osy soustavy.

[4]

### 1.3 Nelineární zkreslení soustavy

Do reprosoustavy je přiveden sinusový signál o konstantním napětí odpovídající průměrné hladině akustického tlaku 96 dB SPL. Žádný produkt nelineárního zkreslení nesmí překročit následující hodnoty:

- *-30 dB (3 %) pro  $f < 100$  Hz*
- *-40 dB (1 %) pro  $f > 100$  Hz*

[4]

### 1.4 Index směrovosti soustavy

Index směrovosti DI je definovaný jako poměr hladiny akustického tlaku vyzářeného směrovým zdrojem a hladiny akustického tlaku vyzářeným v případě, že by byl ten samý zdroj všesměrový. Index směrovosti lze odvodit ze směrových charakteristik soustavy nebo provést měření hladiny akustického tlaku ve volném a difuzním poli.

- *V kmitočtovém rozsahu 250 Hz – 16 kHz by měl index směrovosti nabývat hodnoty  $8 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$*

[4]

### 1.5 Věrnost v časové doméně

Definována jako doba potřebná ke snížení hladiny akustického tlaku na hodnotu  $1/e$  ( $0,37$ krát původní hodnoty) z původní hladiny akustického tlaku. Signál na vstupu by měl být sinusový burst.

- *$t_s \leq 2,5 / f$*

[2, 3]

### 1.6 Časové zpoždění mezi jednotlivými kanály

Časové zpoždění mezi jednotlivými kanály by nemělo přesáhnout 10  $\mu\text{s}$ . Tento parametr neuvažuje zpoždění mezi měničem a místem poslechu.

[4]

## 2 Koncepce reprosoustavy

S ohledem na výše uvedené technické požadavky byla zvolena třípásmová koncepce reprosoustavy. Splnit požadavek na vyrovnanou frekvenční charakteristiku a maximální hladinu akustického tlaku v celém kmitočtovém pásmu 40 Hz - 16 kHz by byl pro dvoupásmovou soustavu problém. Soustava tedy bude obsahovat basový, středobasový a výškový měnič. Zároveň je zde požadavek na multikanálový poslech, soustava se proto bude skládat z jedné subwooferové ozvučnice s basovým měničem a pěti satelitů – každý se středobasovým a výškovým měničem.

## 3 Parametry elektroakustických měničů

### 3.1 Důležité parametry pro výběr měničů

Měniče musí být voleny takovým způsobem, aby při vlastní reprodukci dokázaly pokrýt požadované pásmo bez významných propadů ve frekvenční charakteristice nebo skokových změn směrovosti na dělicích kmitočtech. Zároveň musí být měniče schopné vytvořit požadovanou hladinu akustického tlaku 112 dB SPL. U tohoto požadavku jsme navíc u basového a středobasového měniče omezení maximální přípustnou výchylkou membrány při nízkých kmitočtech. Pokud narazíme na toto omezení, je nutné snížit příkon měniče – tím pádem nemusíme dosáhnout požadované hladiny akustického tlaku. Měniče by také měly splňovat požadavky na harmonické zkreslení THD. Dalším důležitým parametrem je vlastní citlivost měniče. Čím větší citlivost měnič má, tím menší příkon bude potřeba pro dosažení dané hladiny akustického tlaku.

### 3.2 Katalogové parametry zvolených měničů

S ohledem na výše zmíněné požadavky byly vybrány elektroakustické měniče s parametry uvedenými v Tab. 1. Splnění technických požadavků bude rozebráno v následujících kapitolách. S ohledem na dosažení požadované hladiny akustického tlaku byl zvolen výškový měnič tlakový se zvukovodem, který má vyšší citlivost než klasické kalotové. Měniče budou v následujícím textu uváděny jako měnič 1 (basový), měnič 2 (středobasový) a měnič 3 (výškový).

Tab. 1 Parametry použitých reproduktorových měničů

Označení	Měnič 1	Měnič 2	Měnič 3
funkce	basový	středobasový	výškový
D ["]	18	8	1
Z [ $\Omega$ ]	8	8	8
Citlivost [dB]	96	97	108
X <sub>max</sub> [mm]	7.5	3.5	-
P <sub>max</sub> RMS [W]	800	225	30
Frekvenční rozsah	27 Hz - 1 kHz	55 Hz - 5 kHz	1,5 - 20 kHz

- *Velikost měniče  $D$  ["]* – udává průměr membrány měniče v palcích.
- *Impedance měniče  $Z$  [ $\Omega$ ]* – parametr udává nejnížší (nominální) hodnotu impedance daného měniče, impedance měniče je frekvenčně závislá
- *Citlivost měniče  $S_i$  [dB]* – udává hladinu akustického tlaku, kterou je měnič schopen vytvořit ve vzdálenosti 1 m od své referenční osy při příkonu 1 W.
- *Maximální lineární výchylka membrány  $X_{max}$*  – maximální vzdálenost vychýlení membrány ze své klidové polohy, při překročení může dojít ke zkreslení výstupního signálu
- *Maximální příkon měniče  $P_{RMS}$*  – efektivní hodnota příkonu, která může být přivedena dlouhodobě na svorky měniče
- *Frekvenční rozsah* – pásmo, ve kterém je měnič použitelný

### 3.3 Maximální dosažitelná hladina akustického tlaku měničem

Při požadavku na dosažení určité hladiny akustického tlaku, můžeme narazit na dva omezující parametry. Ve spodním kmitočtovém pásmu se projeví především zvýšení výchylky daného měniče. Toto se týká především basového a středobasového měniče. Druhé omezení hladiny akustického tlaku může nastat naopak při vyšších kmitočtech a je dáno maximálním příkonem, který můžeme přivést na vstup měniče. Orientační křivku závislosti maximální hladiny akustického tlaku na frekvenci lze s ohledem na tyto dva omezující parametry odvodit ze vzorců popsaných níže.

#### 3.3.1 Omezení hladiny akustického tlaku výchylkou měniče

Níže nalezneme vzorec (1) pro výpočet akustického výkonu vytvořeného měničem o obsahu membrány  $S$  a maximální přípustné výchylce  $x_{max}$  při daném kmitočtu  $f$ . Akustický výkon lze převést na hladinu akustického tlaku (při příkonu 1 W a vzdálenosti 1 m) pomocí vzorce (2). Se snižujícím kmitočtem se tedy musí snížit také hladina akustického tlaku. Tento vzorec platí pro umístění měniče v uzavřené ozvučnici a to pouze do kmitočtu, při kterém se dosáhne maximální hladiny akustického tlaku omezené příkonem měniče.

$$P_{ak} = 0,85 \cdot S^2 \cdot x_{max}^2 \cdot f^4 [W] \quad (3.1)$$

$$L_p = 112 + 10 \log P_{ak} [dBSPL] \quad (3.2)$$

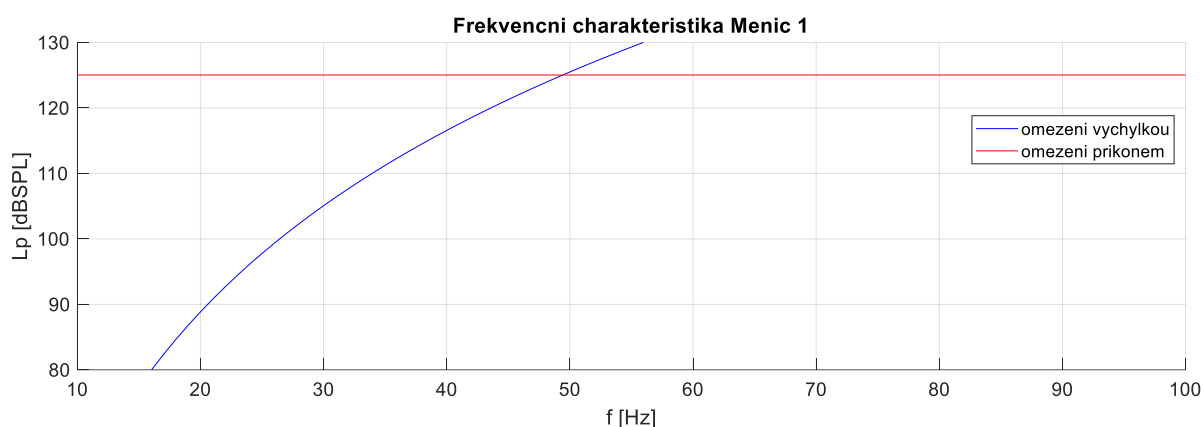
#### 3.3.2 Omezení hladiny akustického tlaku příkonem měniče

Vzorec (3) určuje hladinu akustického tlaku vyprodukovanou měničem s vlastní citlivostí  $S_L$  při daném příkonu  $P$  přivedeném na jeho svorky v určité vzdálenosti od měniče. Referenční příkon  $P_{ref}$  standardně odpovídá příkonu 1 W a referenční vzdálenost  $r_{ref}$  odpovídá 1 m. Při dosazení maximálního efektivního příkonu měniče za proměnnou  $P$  tedy zjistíme maximální hladinu akustického tlaku, kterou daný měnič dokáže vyprodukovat.

$$L_p = S_L + 10 \log \frac{P}{P_{ref}} - 20 \log \frac{r}{r_{ref}} \quad [dBSP] \quad (3.3)$$

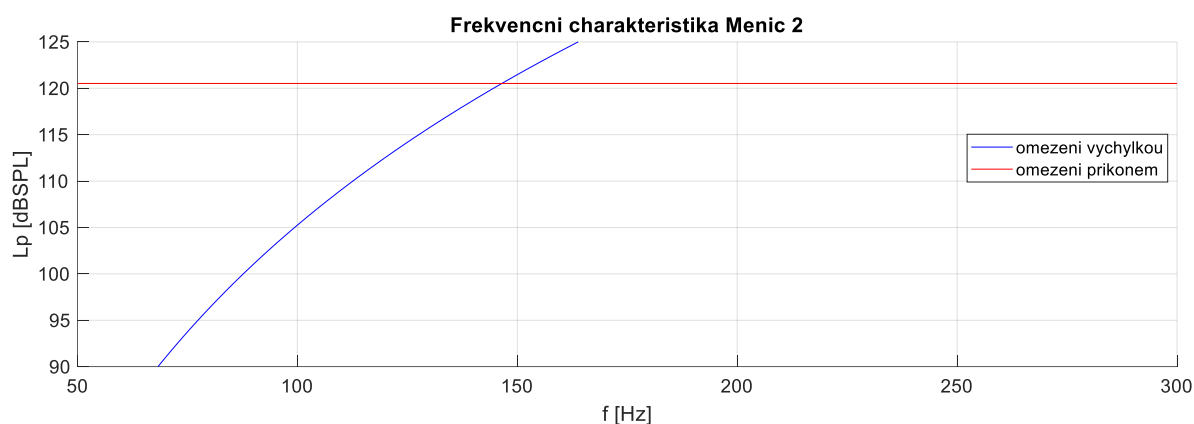
[5]

Na Obr. 2 je zobrazena frekvenční charakteristika pro maximální hladinu akustického tlaku měniče 1 (basového). Dle technických požadavků by měl měnič zvládnout vyprodukovat hladinu 112 dBSP od kmitočtu 40 Hz výše. Toto kritérium měnič splňuje od kmitočtu 36 Hz. Křivka odpovídá maximálnímu efektivnímu příkonu měniče 800 W, jedná se tedy o poměrně vysokou hodnotu s ohledem na požadavek na výkonový zesilovač.



Obr. 2 Frekvenční charakteristika maximální hladiny akustického tlaku měniče 1

Na Obr. 3 je frekvenční charakteristika pro maximální hladinu akustického tlaku měniče 2 (středobasového). Měnič je schopný vyprodukovat hladinu akustického tlaku 112 dBSP od kmitočtu 119 Hz. Je nutné zmínit, že tato křivka odpovídá umístění měniče v uzavřené ozvučnici. Cílem je však dělicí kmitočty mezi měničem 1 a 2 nastavit co nejnižší, aby byla soustava použitelná i bez připojeného subwooferu. Hladinu akustického tlaku ve spodním pásmu bude možné navýšit použitím bassreflexové ozvučnice.



Obr. 3 Výpočet maximální hladiny akustického tlaku měniče 2



### 3.4 Směrová charakteristika měniče

Směrová charakteristika měniče zobrazuje v polárních souřadnicích závislost hladiny akustického tlaku na vyzařovacím úhlu měniče. Z této charakteristiky můžeme zjistit, jakým způsobem měnič vyzařuje při určitém kmitočtu. Pomocí vzorce (4) je možné vypočítat směrovou funkci měniče o poloměru membrány  $R$  pro zadaný kmitočet a vyzařovací úhel  $\alpha$ . Pro zjednodušení výpočtu je membrána měniče uvažována jako kruhová pístová plocha. Amplituda je zde uvažována pouze jako jednotkové číslo.

#### Směrová funkce kruhového pístově kmitajícího zářiče

$$\varphi = \left| \frac{2J_1(k.R.\sin \alpha)}{k.R.\sin \alpha} \right| \quad (3.4)$$

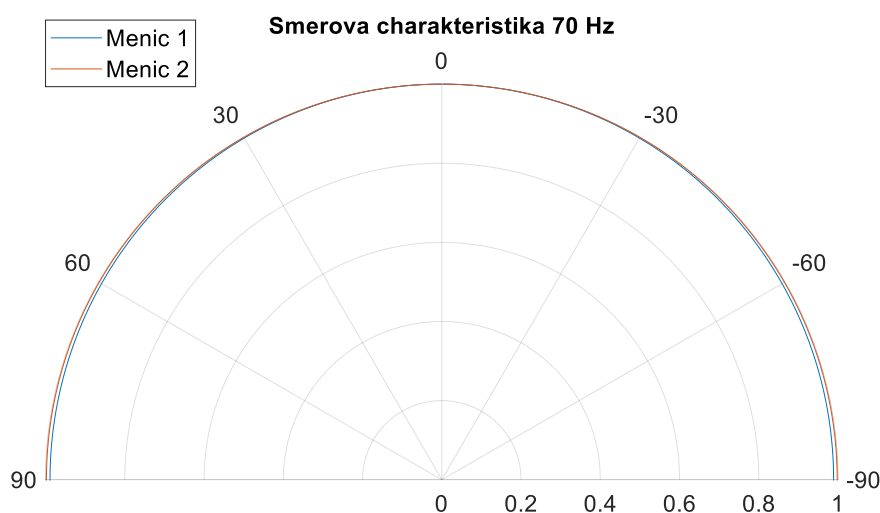
#### Vlnové číslo

$$k = \frac{2\pi.f}{c_0} \quad (3.5)$$

**Proměnné:**  $J_1$  – Besselova funkce řádu 1,  $R$  – poloměr membrány měniče [m],  $\alpha$  – vyzařovací úhel [rad],  $c_0$  – rychlost zvuku ve vzduchu [m/s]

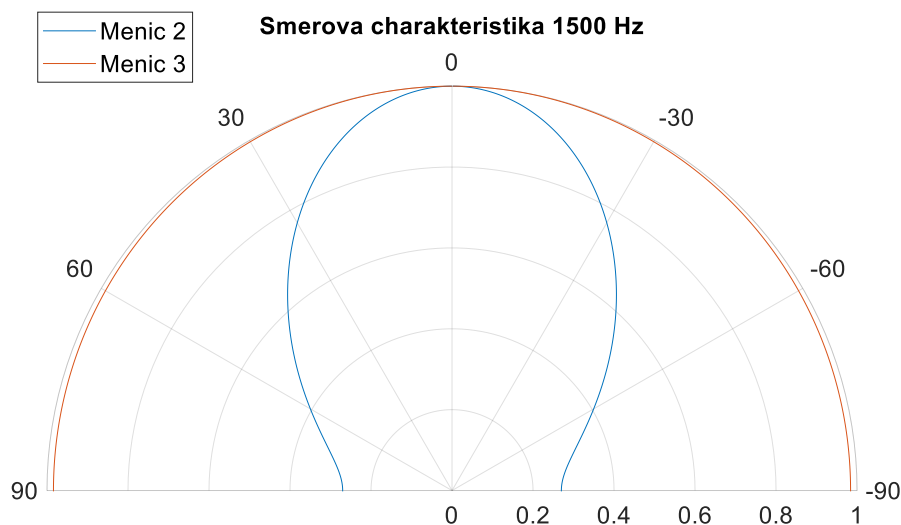
[7]

Z výše uvedených vzorců byly odvozené směrové charakteristiky pro jednotlivé měniče na předpokládaných dělicích kmitočtech. Na Obr. 4 je zobrazená směrová charakteristika pro měnič 1 (modrá křivka) a měnič 2 (červená křivka) na předpokládaném dělicím kmitočtu 70 Hz. Je patrné, že zde není vysoký rozdíl ve směrovosti těchto měničů.



Obr. 4 Směrová charakteristika pro měnič 1 a měnič 2 na kmitočtu 70 Hz

Na Obr. 5 je zobrazena směrová charakteristika pro měnič 2 (modrá křivka) a měnič 3 (červená křivka) na předpokládaném dělicím kmitočtu 1,5 kHz. Je patné, že měnič 2 na tomto kmitočtu začíná více směřovat. Není to ideální stav, ale s ohledem na harmonické zkreslení měniče 3 není možné posunout dělicí kmitočet níže.



Obr. 5 Směrová charakteristika pro měnič 2 a měnič 3 na kmitočtu 1,5 kHz

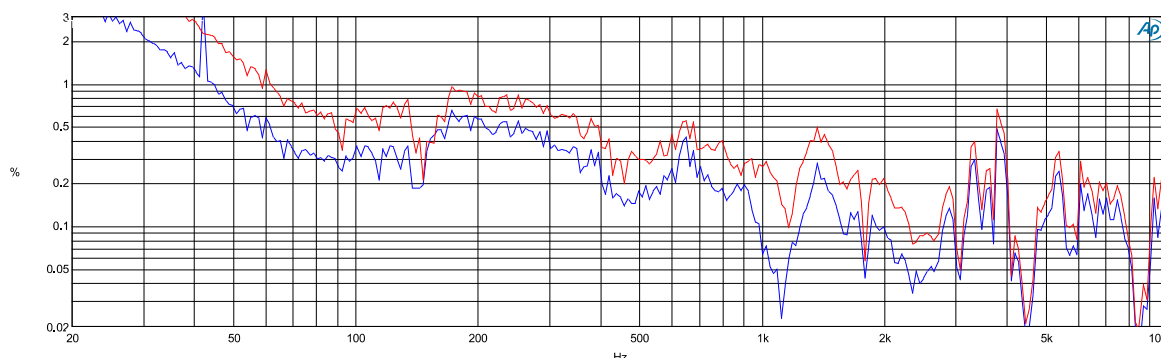
### 3.5 Harmonické zkreslení měničů

Tento parametr určuje, jakým způsobem je zkreslený sinusový signál reprodukován měničem oproti sinusovému signálu přivedenému na jeho vstupní svorky.

$$THD = \frac{\sum \text{Výkonů vyšších harmonických}}{\text{Výkon základní harmonické}} \cdot 100 [\%] \quad (3.6)$$

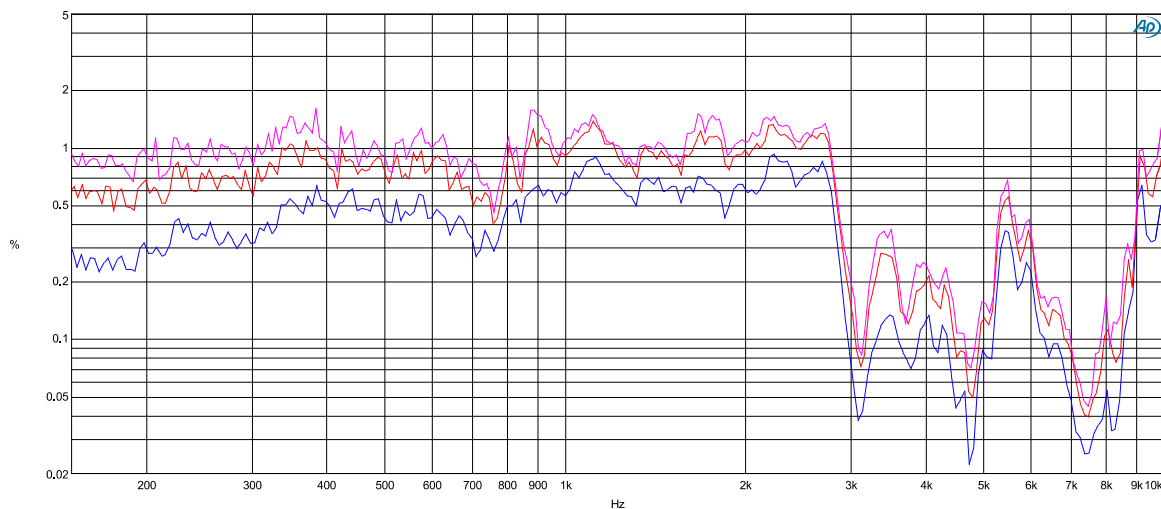
[8]

Na Obr. 6 je zobrazena závislost harmonického zkreslení na frekvenci pro měnič 1. Dle technických požadavků musí být zkreslení pod 100 Hz menší než 3% a nad 100 Hz menší než 1%. Toto kritérium se vztahuje k hladině akustického tlaku 96 dB SPL, tedy odpovídajícímu příkonu 1 W (modrá křivka). Měnič tedy tyto požadavky splňuje.



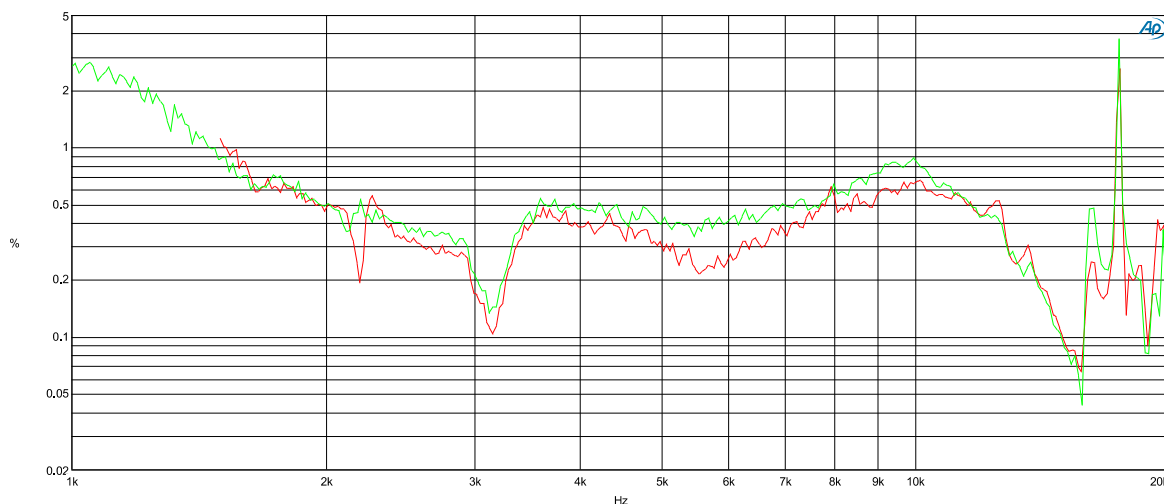
Obr. 6 Harmonické zkreslení měniče 1: příkon 1 W modrá, příkon 5 W červená křivka

Na Obr. 7 je zobrazena závislost harmonického zkreslení na frekvenci pro měnič 2. Z hlediska technických požadavků nás zajímá křivka pro 1 W (modrá). Tento měnič také splňuje požadavky na harmonické zkreslení.



**Obr. 7 Harmonické zkreslení měniče 2: příkon 1 W modrá, příkon 5 W červená, příkon 10 W fialová křivka**

Na Obr. 8 je zobrazena závislost harmonického zkreslení na frekvenci pro měnič 3. Zkreslení měniče bylo změřeno se dvěma různými zvukovody, z nichž byl vybrán zvukovod 1 (červená křivka) vykazující nižší zkreslení. Měnič také splňuje technické požadavky. Vzhledem ke stoupajícímu zkreslení pod kmitočtem 2 kHz by však nebylo vhodné volit dělicí frekvenci pod 1,5 kHz.



**Obr. 8 Harmonické zkreslení měniče 3, příkon 1 W: zvukovod 1 červená, zvukovod 2 zelená křivka**

## 4 Měření TS parametrů

K popisu chování elektroakustického měniče v reproduktorové ozvučnici je potřeba znát jeho TS (Thiele-Small) parametry. Tyto parametry jsou standardně udávány v katalogových listech měničů. Pro co nejpřesnější popis chování je však vhodné změřit impedanční charakteristiku reálného měniče a z ní následně TS parametry odvodit.

### 4.1 TS parametry

Níže jsou stručně popsány nejdůležitější TS parametry.

#### **F<sub>s</sub> [Hz] – rezonanční kmitočet měniče**

Viditelný na počátku impedanční charakteristiky jako kmitočet, při kterém přechází směr impedance ze stoupání na klesání (nejvyšší bod charakteristiky). Pod tímto kmitočtem se nedoporučuje měnič provozovat, protože dochází k nárůstu výchylky membrány.

#### **R<sub>e</sub> [Ω] – stejnosměrný odpor měniče**

Jedná se o stejnosměrný odpor kmitací cívky, který je možné změřit ohmmetrem na vstupních svorkách daného měniče.

#### **L<sub>e</sub> [mH] – indukčnost kmitací cívky měniče**

Udává indukčnost kmitací cívky měniče při standardizovaném kmitočtu 1 kHz.

#### **Q<sub>ms</sub> [-] – mechanický činitel jakosti**

Mechanický činitel jakosti zahrnuje mechanické ztráty pohyblivých částí měniče při činnosti měniče na rezonančním kmitočtu F<sub>s</sub>. Menší hodnota parametru znamená menší mechanické ztráty.

#### **Q<sub>es</sub> [-] – elektrický činitel jakosti**

Elektrický činitel jakosti zahrnuje elektrické ztráty v kmitací cívce při činnosti měniče na rezonančním kmitočtu F<sub>s</sub>. Menší hodnota parametru znamená menší elektrické ztráty.

#### **Q<sub>ts</sub> [-] – celkový činitel jakosti**

Celkový činitel jakosti kombinuje elektrický i mechanický činitel jakosti daného měniče. Čím vyšší hodnota tohoto parametru, tím méně je kmitací systém tlumený.

#### **S<sub>d</sub> [m<sup>2</sup>] – efektivní plocha membrány**

Udává obsah plochy membrány měniče.

#### **C<sub>ms</sub> [mm/N] – poddajnost mebrány**

Udává míru poddajnosti membrány měniče.

**M<sub>md</sub> [g] – hmotnost kmitacího systému**

Udává hmotnost kmitacího systému měniče.

**M<sub>ms</sub> [g] – hmotnost kmitacího systému včetně vzduchové zátěže**

Udává hmotnost kmitacího systému měniče včetně hmotnosti vzduchu, který mu klade odpor.

**V<sub>as</sub> [l] – ekvivalentní objem**

Udává objem uzavřeného vzduchu, který má stejnou poddajnost jako zavěšení membrány měniče.

**X<sub>max</sub> [mm] – maximální lineární výchylka membrány**

Udává maximální možnou výchylku membrány, při jejím překročení začne docházet ke zkreslení signálu produkovaného měničem. Nesmí však dojít k překročení maximální výchylky X<sub>lim</sub>, které by mohlo způsobit trvalé poškození měniče.

**Bl [T.m] – silový faktor**

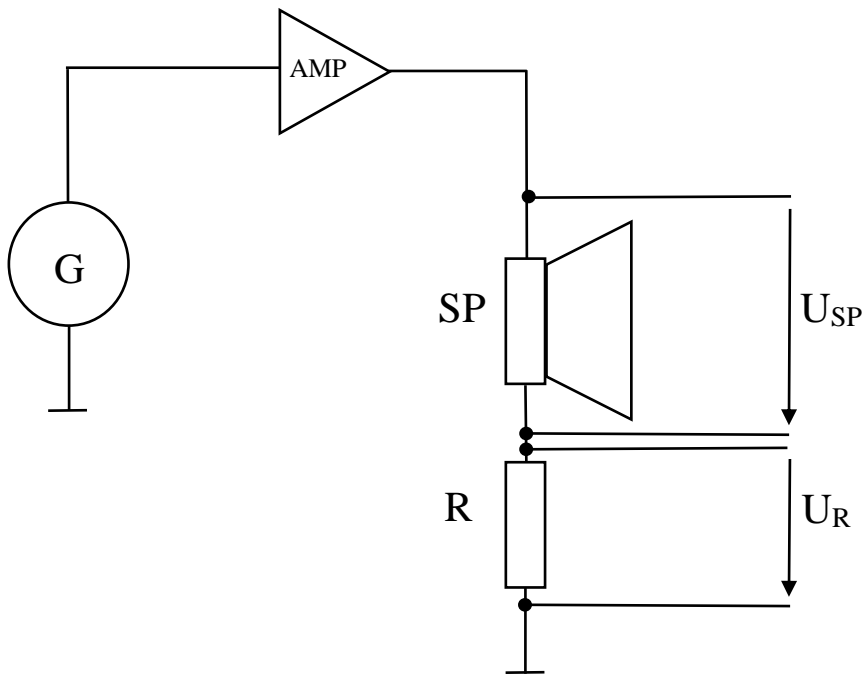
Udává schopnost měniče hýbat s membránou.

[9, 11]

**4.2 Princip měření impedanční charakteristiky měniče**

Princip měření impedanční charakteristiky reproduktoru spočívá v jeho sériovém spojení se snímacím rezistorem. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 9. Měříme jak napětí na měniči, tak napětí na snímacím rezistoru. Snímacím rezistorem ve skutečnosti měříme proud procházející měničem, který lze vypočítat dle vztahu 4.1. Výsledek dosadíme do vztahu 4.2 a získáme impedanci měniče. Nutno dodat, že impedance měniče je kmitočtově závislá, takže výpočet platí vždy pro daný kmitočet. Výstupní signál generátoru by měl tedy nejlépe obsahovat co nejširší pásmo např. 10 Hz – 20 kHz, aby byl viditelný rezonanční kmitočet měniče na nízkém kmitočtu, ale i nárůst impedance na vyšších kmitočtech. Při každé hodnotě kmitočtu je odečteno napětí na měniči, snímacím rezistoru a fázový posuv mezi nimi.

$$I_{SP} = \frac{U_R}{R} \angle \varphi_{UR} \quad (4.1) \quad Z = \frac{U_{SP}}{I_{SP}} \angle (\varphi_{U_{SP}} - \varphi_{I_{SP}}) \quad (4.2)$$

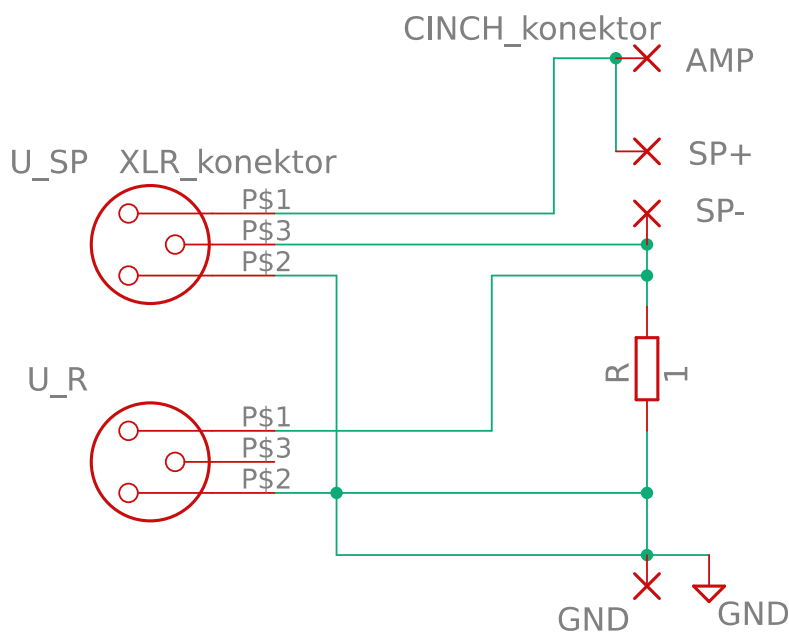


Obr. 9 Schéma zapojení pro měření impedance reproduktorového měniče

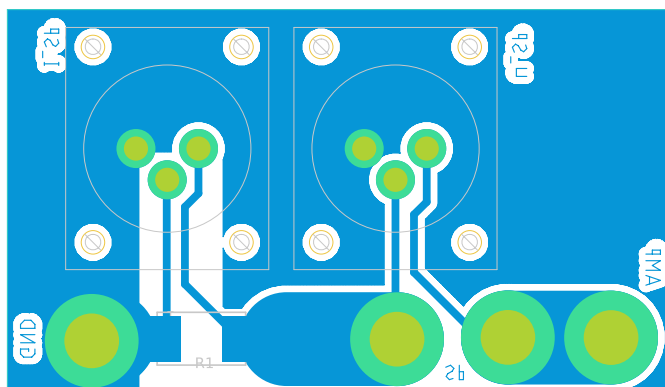
[10]

### 4.3 Návrh obvodu pro měření impedance měniče

Nejprve bylo nutné vhodně zvolit snímací rezistor. Rezistor musí mít takovou hodnotu odporu, aby při zvoleném vstupním výkonu nebyla překročena jeho výkonová zatížitelnost. Zároveň musí být na něm měřitelný úbytek napětí. Jelikož bude výstupní výkon zesilovače při měření impedance 1 W a jmenovitá impedance měničů 8  $\Omega$ , byl zvolen rezistor o hodnotě 1  $\Omega$  s maximální výkonovou ztrátou 2 W.



Obr. 10 Schéma zapojení obvodu pro měření impedance měniče



Obr. 11 Návrh DPS pro měření impedance měniče

Navržená deska obsahuje šroubovací konektory pro připojení výstupu zesilovače (AMP, GND) a měniče (SP). Dále dva XLR konektory pro měření úbytků napětí na měniči a snímacím rezistoru.



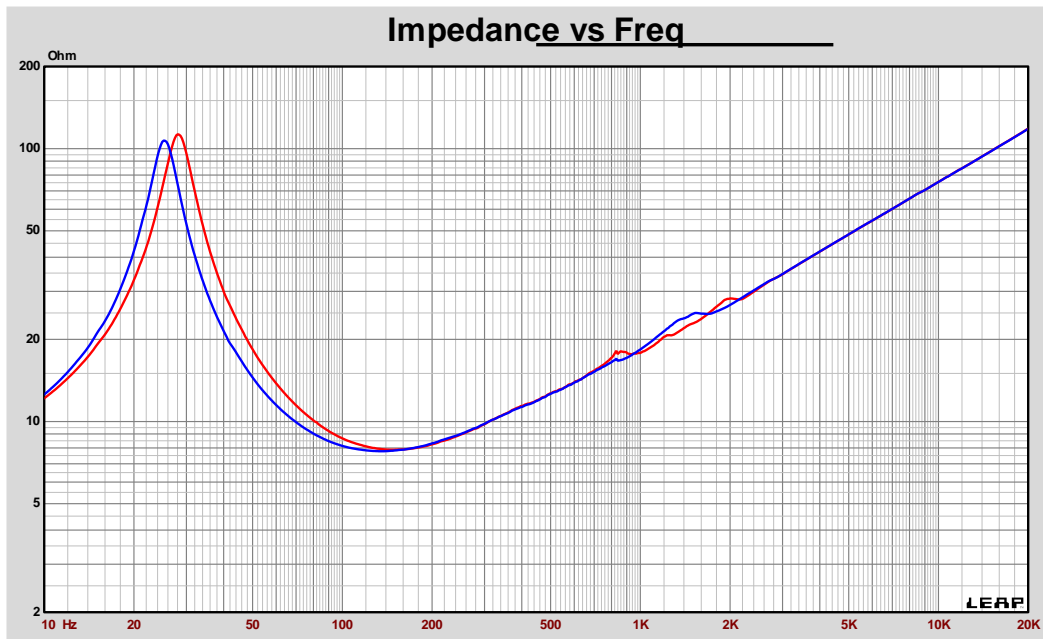
Obr. 12 Přípravek pro měření impedance reproduktoru

#### 4.4 Měření impedanční charakteristiky

K samotnému měření byl použit audio analyzátor AP2722, který posloužil jako generátor vstupního signálu (10 Hz – 20kHz) a zároveň k měření napěťových úbytků na měniči a snímacím rezistoru. Výstup audio analyzátoru byl následně přiveden do externího zesilovače a následně přiveden na vstup měřicí desky. Reproduktorový měnič byl při měření uchycený ve stojanu kolmo k zemi. Takto získaná impedanční charakteristika je dostačující pro odvození těchto TS parametrů: rezonanční frekvence  $f_s$ , celkový činitel jakosti  $Q_{ts}$ , mechanický činitel jakosti  $Q_{ms}$ , elektrický činitel jakosti  $Q_{es}$ . Pokud chceme určit také další parametry jako poddajnost kmitacího systému  $C_{ms}$  a ekvivalentní objem reproduktoru  $V_{as}$ , musíme změřit impedanční charakteristiku ještě jednou, pouze s tím rozdílem, že membrána bude zatížena závažím o známé hmotnosti. Tímto získáme impedanční charakteristiku s posunutým rezonančním kmitočtem. Zatížení se provádí nejčastěji pomocí plastelíny rovnoměrně rozložené kolem středu membrány měniče. Hmotnost závaží by měla být taková, aby byl znatelný posun rezonančního kmitočtu směrem dolů alespoň o 5% oproti prvnímu měření. Dále je nutné také změřit stejnosměrný odpor měniče  $R_e$  ohmmetrem na vstupních jeho svorkách.

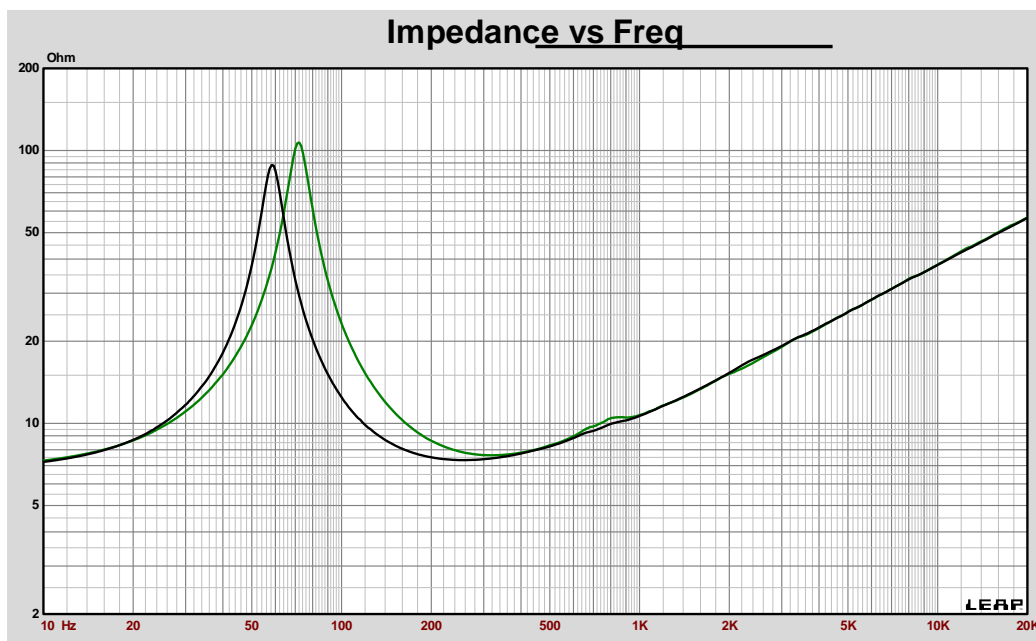
## 4.5 Impedanční charakteristiky měničů

Naměřená data z audio analyzátoru byla po konverzi v programu Matlab na formát [frekvence, impedance, fáze] následně importována do návrhového softwaru LEAP EnclosureShop. Na Obr. 13 jsou zobrazeny naměřené průběhy impedance pro měnič 1 (basový). Červený průběh zobrazuje impedanční charakteristiku bez zatížení, modrý se zatížením membrány plastelínou o celkové hmotnosti 40 g.



Obr. 13 Impedanční charakteristika měniče 1: červená bez závaží, modrá se závažím 40 g

Obr. 14 zobrazuje naměřenou impedanční charakteristiku pro měnič 2 (středobasový). Zelený průběh ukazuje charakteristiku bez zatížené membrány, černý s plastelínovým závažím o hmotnosti 10,36 g.



Obr. 14 Impedanční charakteristika měniče 2: zelená bez závaží, černá se závažím 10,36 g



## 4.6 Odvození TS parametrů

Návrhový software LEAP EnclosureShop má implementovaný nástroj, který při znalosti impedanční charakteristiky měniče s nezatíženou a zatíženou membránou zvládne odvodit model chování měniče – tedy i příslušné TS parametry. Srovnání naměřených a katalogových parametrů je zobrazeno v tabulkách uvedených níže.

Při pohledu na porovnání TS parametrů pro měnič 1 (basový) v Tab. 2 je zřejmé, že jsou mezi parametry malé rozdíly, ale neliší se nějak zásadně. Největší rozdíl je u parametru ekvivalentní objemu membrány  $V_{as}$ , který vyšel o cca 50 l menší oproti katalogové hodnotě.

**Tab. 2 Porovnání TS parametrů pro měnič 1: naměřených a katalogových**

Měnič 1	Naměřené	Katalogový list	Jednotka
Re	6.7	6.3	$\Omega$
Mmd	156.97	133	g
Mms	178.82	155	g
Cms	0.18	0.2084	mm/N
Vas	326.9	380	l
Fs	28.03	28	Hz
Qms	5.06	7.10	-
Qes	0.31	0.32	-
Qts	0.29	0.31	-
BL	26.24	23.10	T*m
Le	2.19	2.2	mH

Při porovnání parametrů u měniče 2 (středobasového) je viditelný rozdíl v rezonanční frekvenci  $F_s$ . Naměřená hodnota je o skoro 10 Hz vyšší než udávaná v katalogovém listu.

**Tab. 3 Porovnání TS parametrů pro měnič 2: naměřených a katalogových**

Měnič 2	Naměřené	Katalogový list	Jednotka
Re	6.5	6.1	$\Omega$
Mmd	19.12	19	g
Mms	20.99	21	g
Cms	0.23	0.3185	mm/N
Vas	16.1	22	l
Fs	71.75	62	Hz
Qms	6.39	4.30	-
Qes	0.43	0.42	-
Qts	0.40	0.38	-
BL	11.94	10.82	T*m
Le	1.04	1.2	mH

## 5 Návrh reproduktorových ozvučnic

K návrhu a simulaci reproduktorových ozvučnic se využilo vytvořených modelů měničů v návrhovém softwaru LEAP EnclosureShop. Z pohledu chování měničů v ozvučnici nás zajímá hlavně basový a středobasový měnič. Výškový měnič nepotřebuje ke své funkci skoro žádný objem, a tak není pro návrh zcela zásadní.

### 5.1 Koncepce ozvučnic

Nejprve muselo být rozhodnuto o koncepci ozvučnice. V úvahu přicházela uzavřená nebo bassreflexová ozvučnice. S ohledem na požadavek vyrovnané frekvenční charakteristiky v pásmu 40 Hz -16 kHz byla zvolena u obou měničů bassreflexová ozvučnice. Bassreflexová ozvučnice díky rezonanci vlastního nátrubku dokáže vyzářit při nízkých kmitočtech vyšší hladinu akustického tlaku než uzavřená. Tím pádem může měnič 1 i měnič 2 vyzařovat od nižších kmitočtů. Pod rezonančním kmitočtem bassreflexového nátrubku však začíná prudce narůstat výchylka membrány měniče, proto je potřeba zajistit, aby nedošlo k jejímu překročení. To je možné realizovat pomocí filtru typu horní propust, který bude navržený tak, aby na měnič nebyl přivedený signál o příliš nízkém kmitočtu.

### 5.2 Postup návrhu ozvučnic

Veškerý návrh se prováděl při standartním příkonu reproduktorového měniče 1 W. Návrh byl zaměřený především na dosažení co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiky jednotlivých měničů. Návrhový software dle parametrů měniče vypočítá doporučený objem a ten je možné použít jako základ pro simulaci. Z doporučeného objemu lze snadno vypočítat přibližné rozměry stran ozvučnice. S ohledem na možnost vzniku stojatého vlnění uvnitř ozvučnice je vhodné volit odlišné délky jednotlivých stran. Dále je třeba vhodně zvolit rezonanční kmitočet a s ním spojené rozměry bassreflexového nátrubku. Plocha vyústění bassreflexového nátrubku by měla odpovídat alespoň 25% z efektivní plochy membrány měniče  $S_d$  z důvodu eliminace turbulentního proudění uvnitř nátrubku.

Po zadání rozměrů ozvučnice a bassreflexového nátrubku můžeme začít simulovat frekvenční charakteristiku dané ozvučnice. V návrhovém softwaru lze volit prostor, do kterého měnič vyzařuje. Proto je vhodné nejprve zvolit umístění měniče v nekonečné ozvučnici a snažit se úpravou čistého objemu ozvučnice a rezonančního kmitočtu nátrubku dosáhnout co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiky. Pokud je totiž měnič umístěn v nekonečné ozvučnici, na frekvenční charakteristice se neprojeví deformace způsobená rozměrem ozvučnice a difrakce na jejích hranách.

Pokud je frekvenční charakteristika dostatečně vyrovnaná, můžeme v návrhovém systému změnit vyzařovací prostor měniče na celoprostor. Na frekvenční charakteristice se projeví pokles hladiny akustického tlaku na nízkých kmitočtech o 6dB způsobený zvětšením prostoru, do kterého měnič vyzařuje, na dvojnásobný. Na vyšších kmitočtech se naopak projeví jev zvaný baffle step, tedy navýšení hladiny akustického tlaku vlivem rozměrů ozvučnice, které jsou v tomto pásmu srovnatelné s velikostmi vlnových délek zvukové vlny. Další jev, který se zde projeví, je difrakce akustické vlny na hranách ozvučnice. Difrakce způsobují lokální převýšení nebo propady na frekvenční charakteristice. Tento jev lze potlačit vhodným umístěním měniče na čelní stěně a sražením hran ozvučnice. Dále je možné nastavit procentuálně vylutnění ozvučnice

materiálem o zadané hustotě, které pomůže snížit vliv stojatého vlnění. Opět se snažíme získat úpravou rozměrů ozvučnice co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiku.

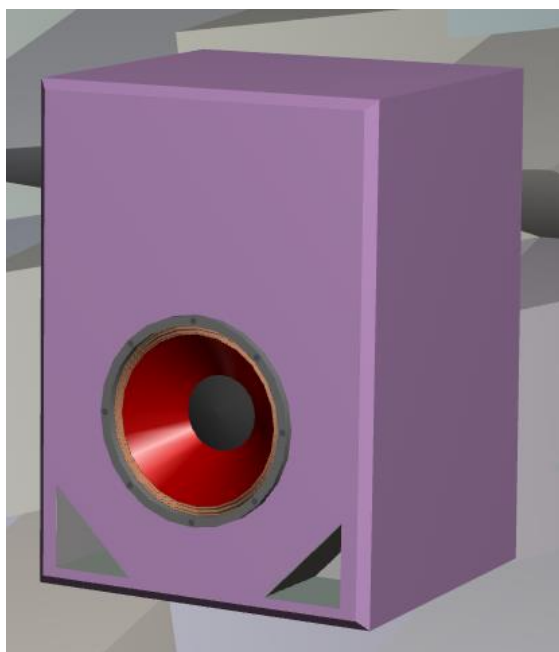
[12, 13]

### 5.3 Návrh ozvučnice satelitu

Ozvučnice satelitu byla navržena s následujícími parametry:

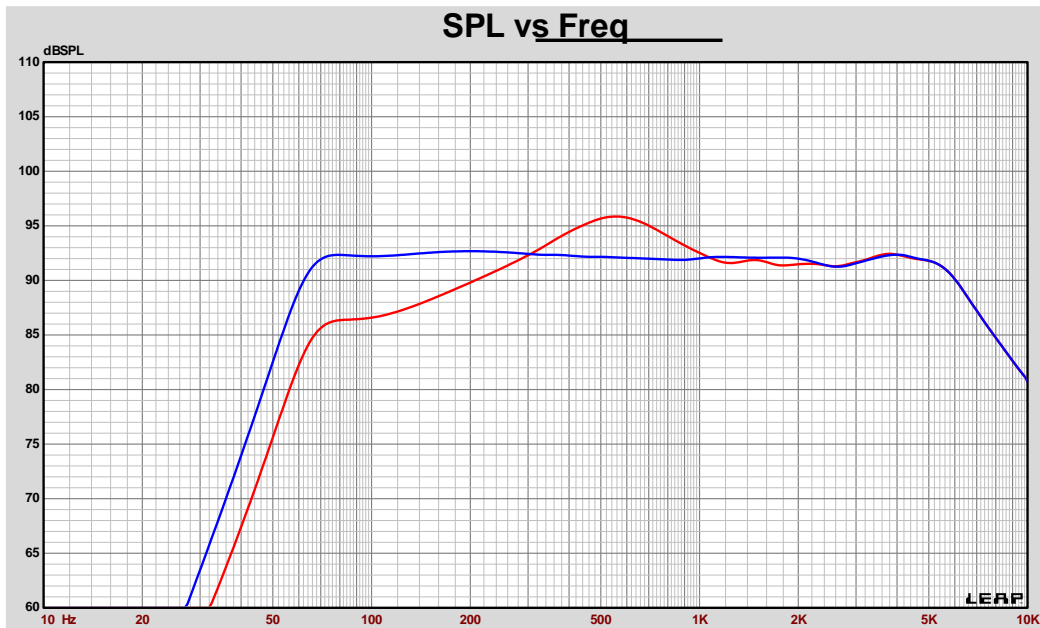
- *Vnější rozměry 450 x 330 x 300 mm, tloušťka stěn 18 mm*
- *Čistý objem 26,13 l + rezerva 6 l (měniče, výztuže, nátrubek)*
- *Nátrubky: dva trojúhelníkové naladěné na 68 Hz, s délkou vnitřních odvěsen 75 mm a hloubkou nátrubku 89 mm*
- *Celková plocha nátrubků odpovídá 56,25 cm<sup>2</sup> a je rovna 25,6% z efektivní plochy membrány 220 cm<sup>2</sup> -> podmínka pro zamezení turbulentního proudění nátrubkem je tedy splněna*
- *30% výplň vatou o hustotě 40 kg/m<sup>3</sup>*
- *Zkosení hran přední strany ozvučnice 9 mm*

Při návrhu byly zohledněny také rozměry podstavce stojanu, na kterém bude ozvučnice satelitu umístěna, aby byla zajištěná její stabilita. Na Obr. 15 je možné vidět grafické zobrazení ozvučnice v návrhovém softwaru.



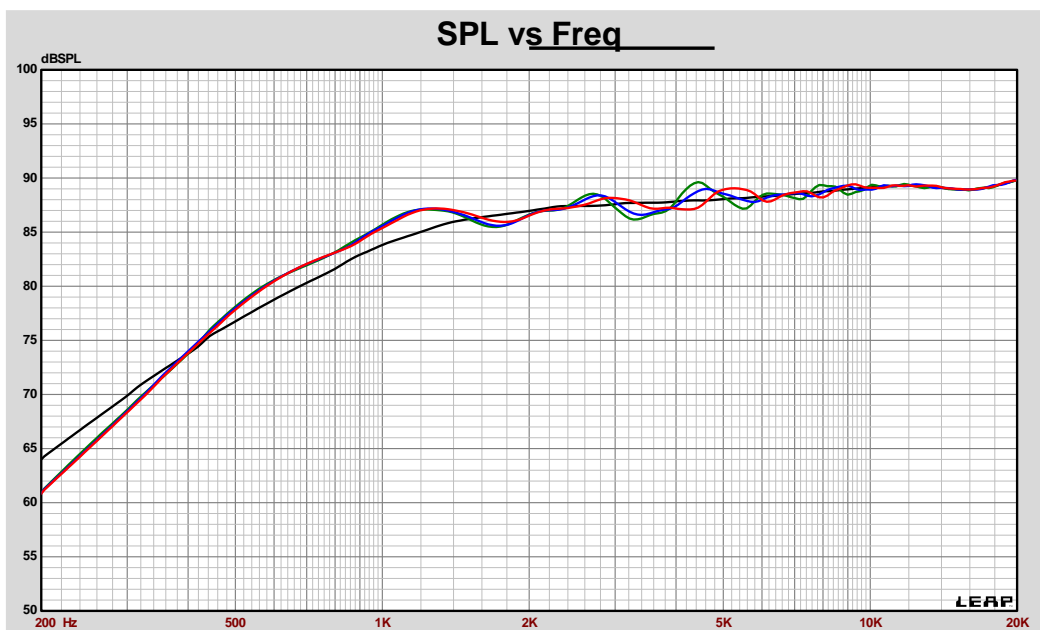
Obr. 15 Grafické zobrazení ozvučnice satelitu

Na Obr. 16 je zobrazena závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci. Modrá křivka odpovídá umístění měniče v nekonečné rovině, tedy vyzařování do poloprostoru. Červená křivka znázorňuje případ vyzařování do celoprostoru.



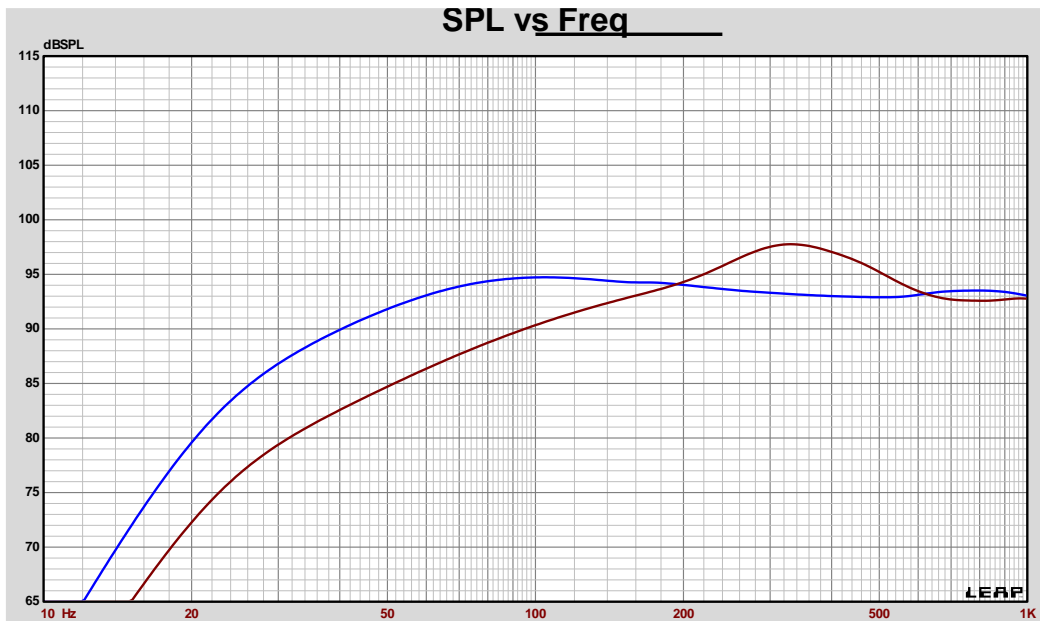
Obr. 16 Frekvenční charakteristika měniče 2 v ozvučnici: modře nekonečná rovina, červeně vyzářování do celoprostoru

V navržené ozvučnici bylo odsimulované také chování výškového měniče. K tomu byl zvolený obecný model jednopalcového měniče, který byl obsažený v simulačním softwaru. U výškového měniče nás totiž zajímá výhradně vliv difrakcí na hranách ozvučnice. Na Obr. 17 je zobrazen vliv zkosení hran na frekvenční charakteristiku. Černý průběh zobrazuje měnič v nekonečné ozvučnici – tedy bez jakýchkoliv difrakčních jevů. Ostatní průběhy zobrazují měnič zářící do celoprostoru s tím rozdílem, že: zelený průběh je pro ozvučnici bez zkosených hran, modrý průběh pro zkosení hran o 9 mm a červený pro zkosení hran o 18 mm. Jako nejpříjemnější bylo vybráno zkosení hran o 9 mm.



Obr. 17 Vliv zkosení předních hran ozvučnice na frekvenční charakteristiku





Obr. 20 Frekvenční charakteristika měniče 1 v ozvučnici: modře nekonečná rovina, červeně vyzařování do celoprostoru

## 6 Výroba ozvučnic

Byla vyrobena ozvučnice subwooferu a jedna ozvučnice satelitu. K výrobě ozvučnic byla použita OSB deska o tloušťce 18 mm. Veškeré spoje jsou lepené a v namáhaných spojích jsou navíc použity vruty. Celá konstrukce je vyztužena laťovými příčkami. Jako tlumící materiál je použitý Caruso Isobond WLG035 s hustotou 40 kg/m<sup>3</sup>. Pro zatěsnění prostoru mezi měničem a samotnou ozvučnicí bylo použito těsnění na okna. Na zadní straně ozvučnic je umístěný vstupní konektor Neutrik NLAMP.



Obr. 21 Ozvučnice osazené měniči

## 7 Měření frekvenčních charakteristik měničů

Měření frekvenčních charakteristik jednotlivých měničů proběhlo v bezodrazové komoře. Na vstup měniče byl přiveden signál v podobě růžového šumu o výkonu 1W. Ve vzdálenosti 1 m od referenční osy měniče byl umístěn měřicí mikrofón. Z naměřených dat byly vytvořeny závislosti hladiny akustického tlaku na frekvenci jednotlivých měničů.

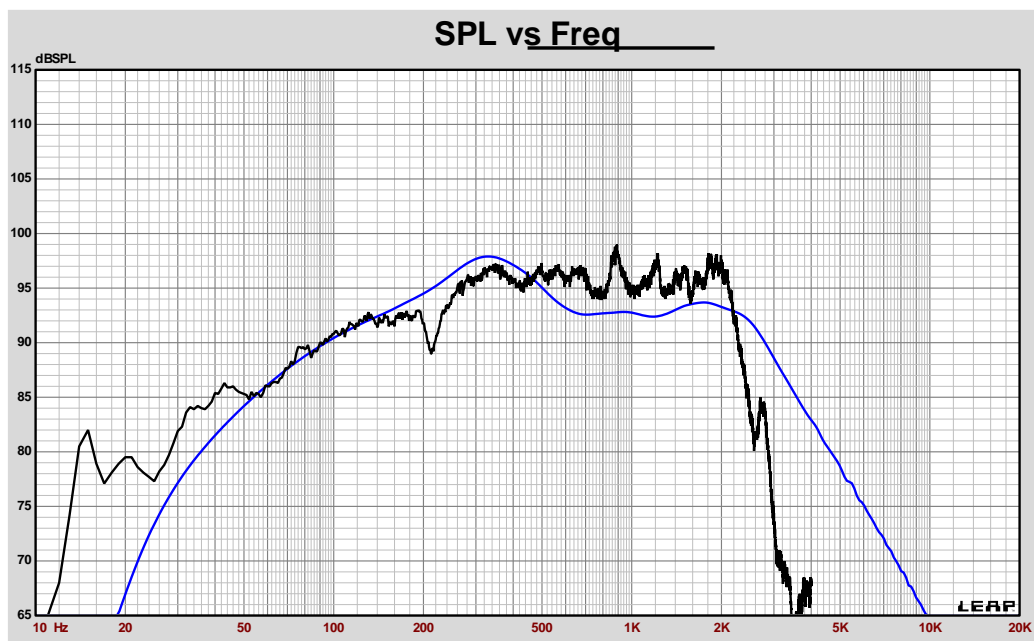


Obr. 22 Měření v bezodrazové komoře

### 7.1 Frekvenční charakteristika basového měniče 1

Na obr. 23 je zobrazeno porovnání nasimulované a naměřené frekvenční charakteristiky. Referenční osa byla stanovena uprostřed měniče. V rozsahu 50 - 140 Hz se obě charakteristiky téměř shodují. Při kmitočtu zhruba 220 Hz vzniká na naměřené charakteristice špičkový propad hladiny akustického tlaku. Ten je způsobený vznikem stojatého vlnění uvnitř ozvučnice. Subwooferová ozvučnice má totiž téměř krychlový tvar – nejhorší varianta z hlediska interních rezonancí. Jelikož bude dělicí frekvence basového měniče kolem 70 Hz, tento propad už bude mimo jeho pracovní oblast. Tento jev by však mohl být problém u ozvučnice satelitu, kde jsou vlnové délky vyzařované měniči mnohem kratší.

Další rozdíl je v rezonančním kmitočtu ozvučnice, který je o 5 Hz nižší, než v případě simulace. Ten může být způsobený nepřesností simulačního programu, ale také mírnými odchylkami v rozměrech vyrobené ozvučnice oproti nasimulovaným. Řešením je zkrácení délky bassreflexového nátrubku.



Obr. 23 Frekvenční charakteristika basového měniče 1: modře nasimulovaná, černě naměřená

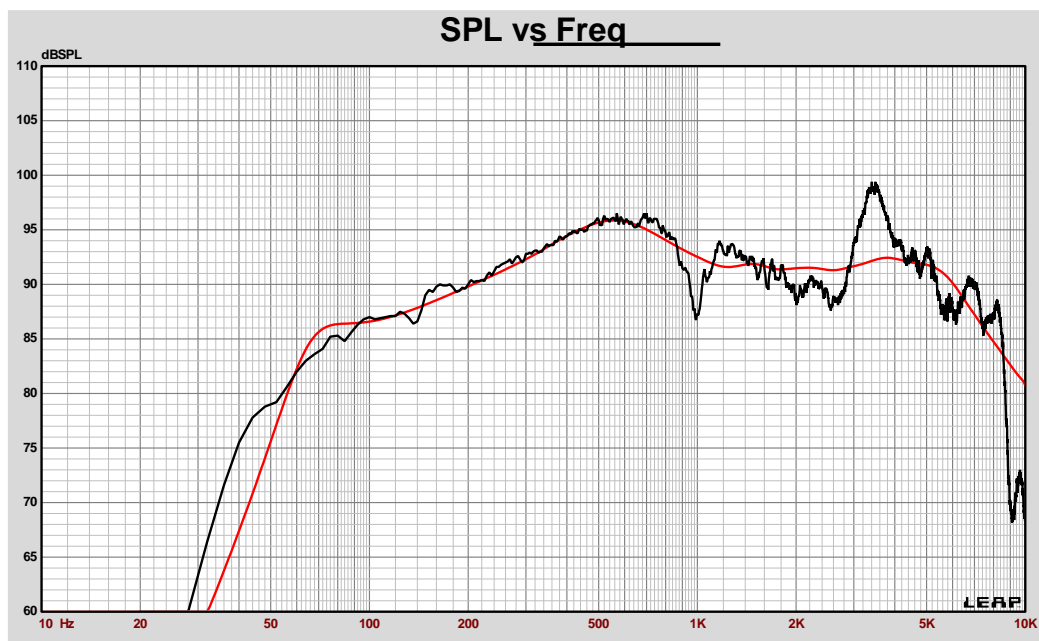
## 7.2 Frekvenční charakteristika středobasového měniče 2

Na obr. 24 je zobrazeno srovnání naměřené a nasimulované frekvenční charakteristiky středobasového měniče. Referenční osa je stanovena uprostřed mezery mezi horní hranou středobasového a dolní hranou zvukovodu výškového měniče. Při porovnání křivek je zřejmý posun rezonančního kmitočtu z původních 68 Hz na 51 Hz. Důvod může být stejný jako u basového měniče. S ohledem na objem ozvučnice vychází délka nátrubků velmi krátká, a proto se může projevit větší chyba při simulaci. Řešením je opět zkrácení délky bassreflexových nátrubků.

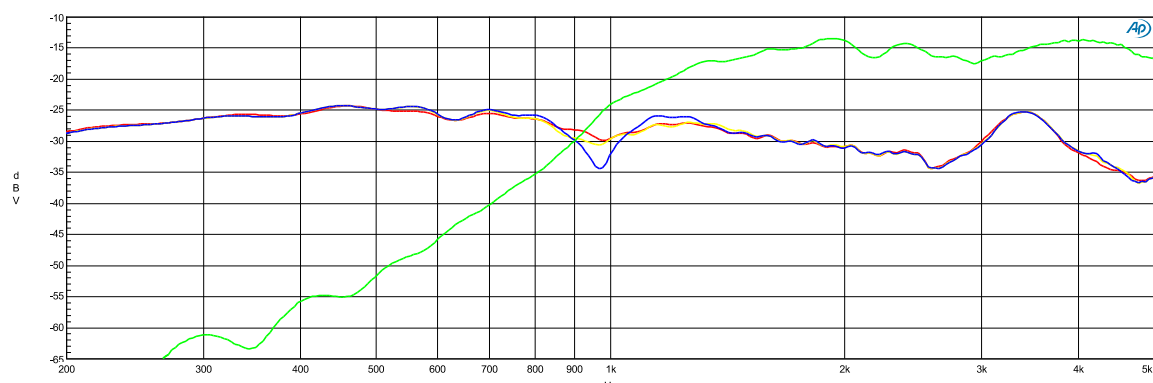
Nežádoucím jevem je úzký propad hladiny akustického tlaku na frekvenci 1 kHz. Tento propad je s ohledem na dělicí frekvenci 1,5 kHz v pracovním pásmu měniče. Při experimentálním měření v blízkém poli bylo zjištěno, že propad je způsobený odrazem zvukové vlny vyzářené měničem 2 uvnitř zvukovodu měniče 3 a následnou interferencí této odražené vlny s přímou v měřicím bodě. Na Obr. 25 je zobrazen vliv zakrytí zvukovodu na frekvenční charakteristiku. Modrá křivka je bez zakrytí zvukovodu, žlutá křivka se zakrytým ústím zvukovodu, červená křivka se zakrytým celým zvukovodem a zelená křivka je frekvenční charakteristika měniče 3 bez zakrytí zvukovodu. Všechny případy zakrytí jsou zdokumentovány na Obr. 26.

Tento propad je také závislý na poloze měřícího mikrofону. Pokud je mikrofón v akustické ose měniče 2, propad je minimální. Pokud však mikrofón posuneme výše mezi měnič 2 a zvukovod, kde je zvolená referenční osa soustavy, propad je více znatelný. Nad referenční osou soustavy se propad zvětšuje a zároveň je znatelný i jeho frekvenční posun směrem nahoru. Vzhledem k tomu, že je tento propad závislý na poloze měřícího mikrofónu a je frekvenčně závislý, není možné ho korektně elektronicky vykompenzovat. Řešením je částečná kompenzace elektrickou ekvalizací se ziskem na kmitočtu 1 kHz.





Obr. 24 Frekvenční charakteristika středobasového měniče 2: červeně nasimulovaná, černě naměřená



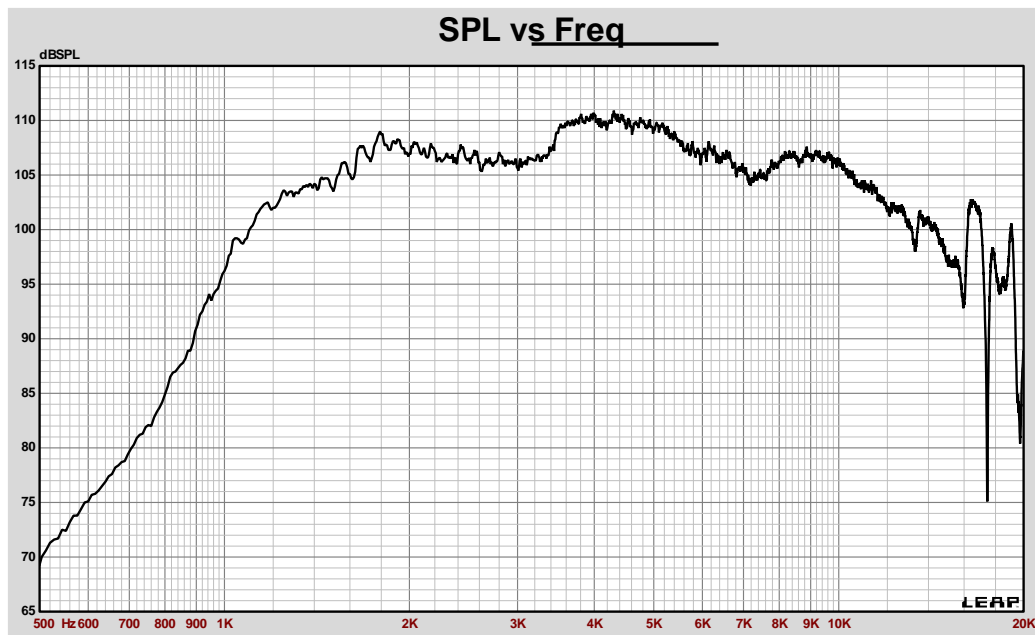
Obr. 25 Vliv zakrytí zvukovodu na frekvenční charakteristiku měniče 2: modrá křivka bez krytí, žlutá zakryté pouze ústí zvukovodu, červená zakrytý celý zvukovod, zelená měnič 3



Obr. 26 Experiment se zakrytím zvukovodu: vlevo bez krytí, uprostřed zakrytý celý zvukovod, vpravo zakryté ústí zvukovodu

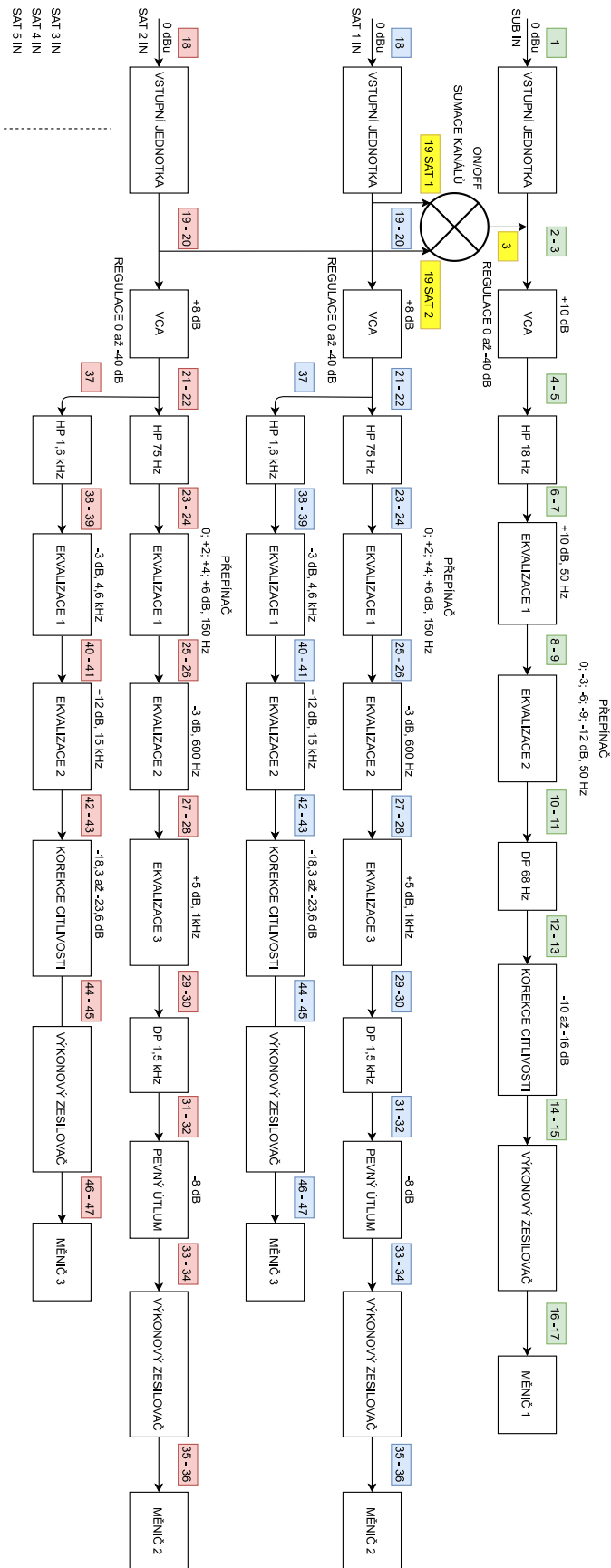
### 7.3 Frekvenční charakteristika výškového měniče 3

Jelikož výškový měnič nebyl simulován, je na Obr. 27 zobrazena pouze naměřená frekvenční charakteristika. Z charakteristiky je patrné, že bude třeba ji v určitých místech elektricky ekvalizovat, aby se více vyrovnala.



Obr. 27 Frekvenční charakteristika výškového měniče

## 8 Blokové schéma soustavy

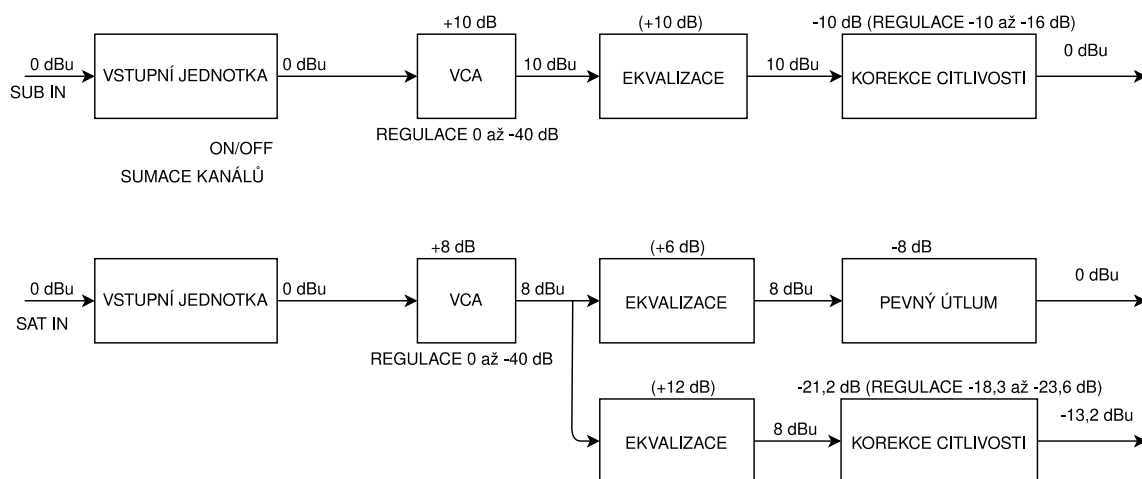


Obr. 28 Blokové schéma reprosoustavy

Na Obr. 28 je zobrazeno blokové schéma reprosoustavy. Skládá se celkem z šesti hlavních větví: jedna pro subwoofer (měnič 1) a pět pro jednotlivé satelity (měnič 2 + měnič 3). Ve schématu jsou zobrazeny pouze dvě větve pro satelity, následující tři jsou shodné. Jediná odlišnost je v tom, že z prvních dvou větví satelitů (SAT 1 a SAT 2) je možnost provést sumaci kanálu pro subwoofer. Tu je možné využít v případě, že by byl k dispozici pouze stereo signál. Každá větev má vlastní vstup v podobě XLR konektoru pro připojení vstupního signálu. Tento signál je převeden ve vstupní jednotce ze symetrického na nesymetrický a následně zpracován bloky elektroniky, které jsou podrobněji popsány v následující kapitole. Zpracovaný signál je následně přiveden na výkonový zesilovač a z něj na příslušný měnič.

## 8.1 Signálové úrovně v elektronice soustavy

Obr. 29 zobrazuje maximální signálové úrovně v jednotlivých větvích elektroniky soustavy. Požadovaná úroveň vstupního signálu je stanovena na 0 dBu. Při této vstupní úrovni bychom měli na výstupu soustavy dosáhnout maximální hladiny akustického tlaku. Vstupní úroveň je následně v bloku VCA zesílena z důvodu využití maximálního dynamického rozsahu při zpracování signálu elektronikou. Zesílení je pro větev subwooferu pevně nastavené na 10 dB a pro větev satelitu na 8 dB. Zároveň můžeme při požadavku na nižší hladinu akustického tlaku na výstupu snížit potenciometrem úroveň signálu až o -40 dB. Potenciometrem řídíme zisk bloku VCA ve všech větvích. Následně přijde signál do bloku ekvalizace, který znázorňuje maximální zisk ekvalizačních filtrů dané větve. Poté je úroveň signálu v posledním bloku pevně utlumena o stejnou úroveň, jako byl na začátku řetězce v bloku VCA zesílen. To platí pouze pro měnič 2, ostatní měniče mají možnost regulace útlumu tohoto bloku, aby bylo možné vyrovnat citlivosti jednotlivých měničů. To znamená, že při použití výkonových zesilovačů se stejným ziskem budou všechny tři měniče produkovat stejnou hladinu akustického tlaku.



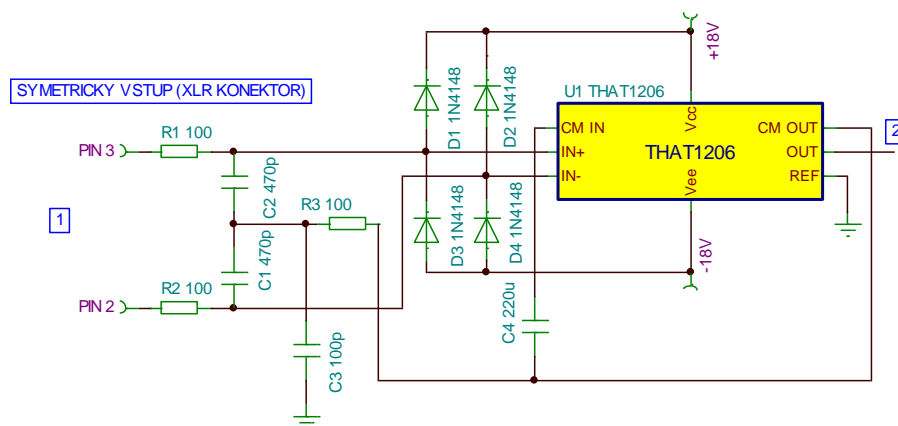
Obr. 29 Schéma signálových úrovní

## 9 Návrh elektroniky

K návrhu elektroniky byl převážně využit návrhový software LEAP CrossoverShop.

### 9.1 Blok vstupní jednotka

Vstupní jednotka reprosoustavy slouží k převodu vstupního symetrického signálu přivedeného na vstupní XLR konektor na signál nesymetrický. K tomuto účelu je použitý integrovaný obvod THAT 1206. Tento integrovaný obvod slouží sám o sobě jako převodník signálu, jsou k němu však přidány ještě pomocné obvody. Jedním z nich je ochrana proti přepětí pomocí čtyř diod. Pokud by vstupní signál překročil úroveň napájecího napětí + napěťového úbytku diody, vstupní proud by byl odveden do napájení. Dále je zde filtr potlačující RFI rušení, které by mohlo ovlivnit šumové parametry integrovaného obvodu.

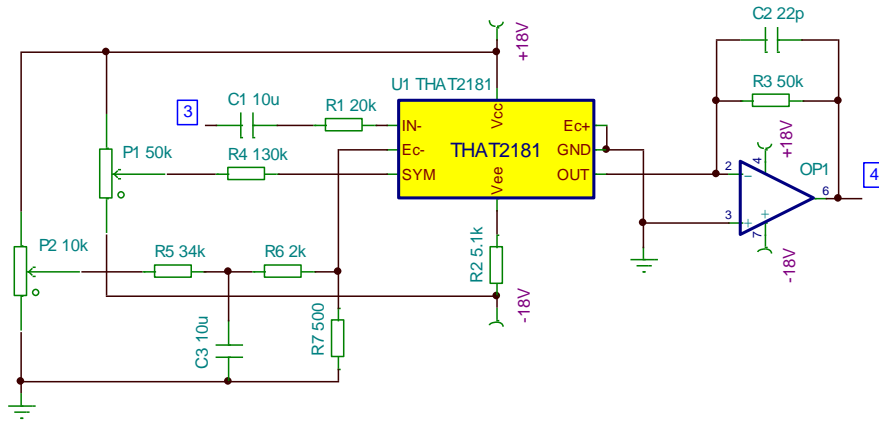


Obr. 30 Schéma vstupní jednotky

[16]

### 9.2 Blok VCA

Tento blok slouží k regulaci hladiny akustického tlaku produkované soustavou ve vzdálenosti 1 m od její referenční osy. K tomu bylo využito napěťově řízeného zesilovače ve formě integrovaného obvodu THAT 2181. Obvod zpracovává signál takovým způsobem, že nejdříve je proveden převod napětí/proud, signál zpracován IO a na výstupu je provedena opačná konverze. Regulace je možná v rozsahu 0 dB až -40 dB pomocí potenciometru P2, kterým je řízený napěťový dělič s výstupním napětím přivedeným na řídicím pin Ec- obvodu THAT 2181. Výstupem tohoto napěťového děliče řídíme i všechna ostatní VCA ve schématu. Potenciometrem P1 je možné kompenzovat nesymetrii obvodu, která je způsobena rozdílným napětím tranzistorů. Hodnota rezistoru R3, který určuje zesílení výstupního signálu, se liší dle použití: 50 k $\Omega$  pro větev subwooferu (zisk 10dB) a 64 k $\Omega$  pro větev satelitu (zisk 8 dB). Výstupní signál je zesílen z důvodu využití dynamického rozsahu a potlačení šumového pozadí.

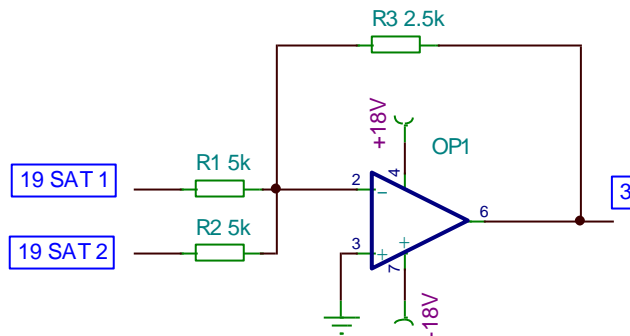


Obr. 31 Schéma ovládání hlasitosti

[17]

### 9.3 Sumační člen

Sumační člen se uplatní v případě, že k reprosoustavě připojíme pouze stereo signál. Slouží ke sloučení kanálů dvou satelitů za účelem vytvoření signálu pro kanál subwooferu. Na výstupu obvodu je signál odpovídající úrovni vstupních signálů.



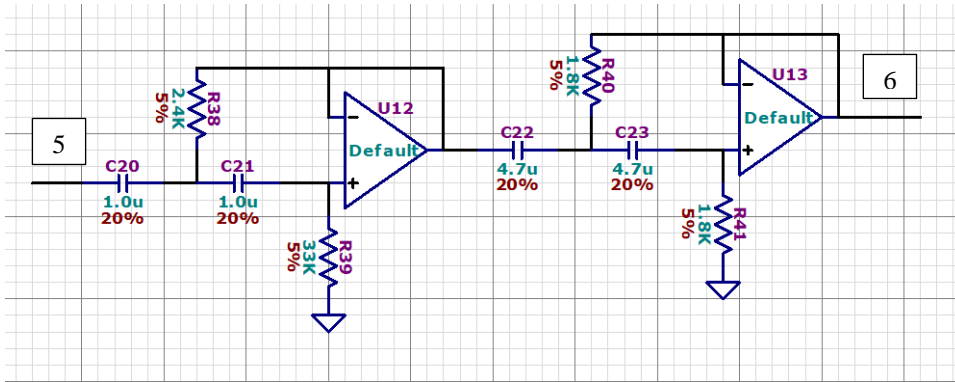
Obr. 32 Schéma sumačního členu

### 9.4 Bloky elektroniky větve měniče 1

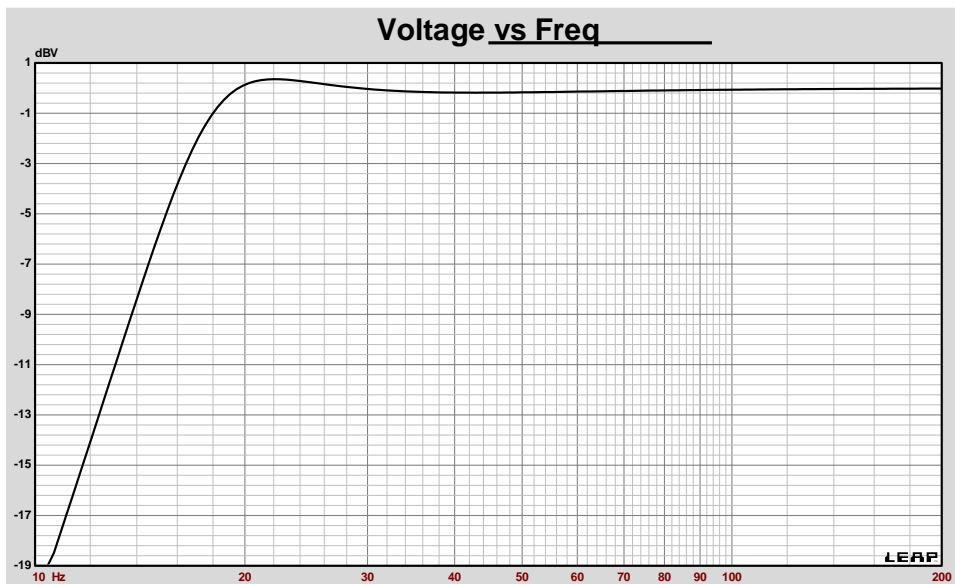
#### 9.4.1 Horní propust 18 Hz

Jedná se o filtr typu horní propust (Butterworth 3dB) druhého řádu se strmostí 24 dB na oktávu. Filtr je naladěný na 18 Hz a slouží k omezení výchylky basového měniče při nižších frekvencích. Mezní frekvenci filtru, při níž nastane pokles úrovně vstupního signálu o 3 dB, lze spočítat dle vztahu (9.1).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \text{ [Hz]} \quad (9.1)$$



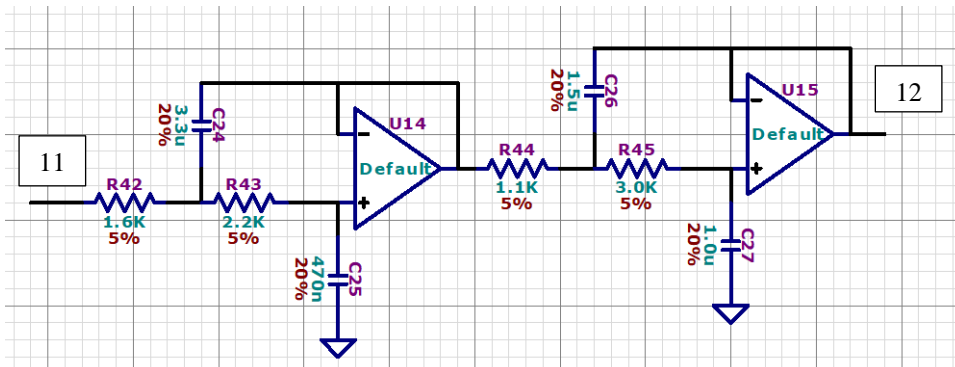
Obr. 33 Schéma HP basového měniče 1



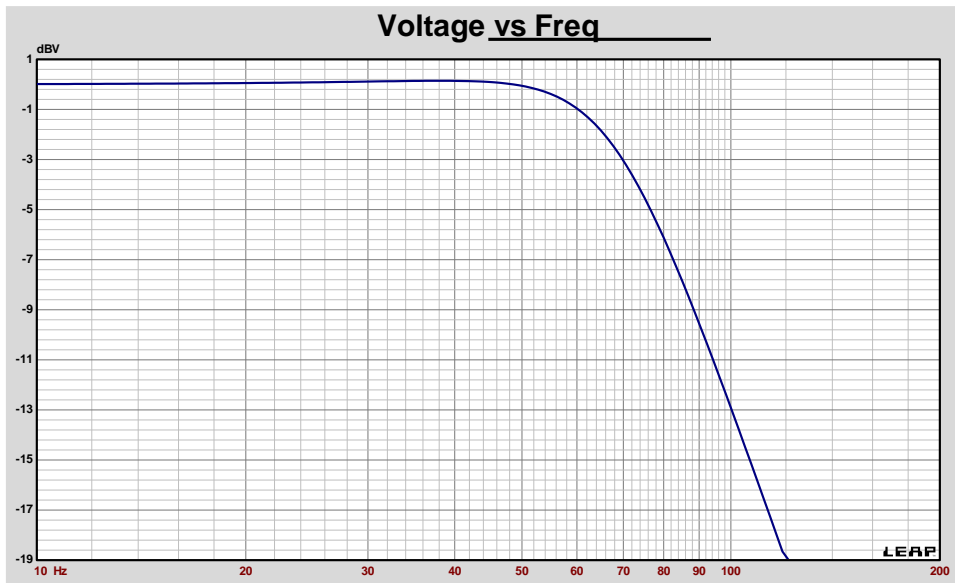
Obr. 34 Přenosová charakteristika HP basového měniče 1

### 9.4.2 Dolní propust 68 Hz

Jedná se o filtr typu dolní propust (Butterworth 3dB) druhého řádu se strmostí 24 dB na oktávu. Filtr má mezní frekvenci 68 Hz, vyšší frekvence už bude vyzařovat měnič 2.



Obr. 35 Schéma DP basového měniče 1



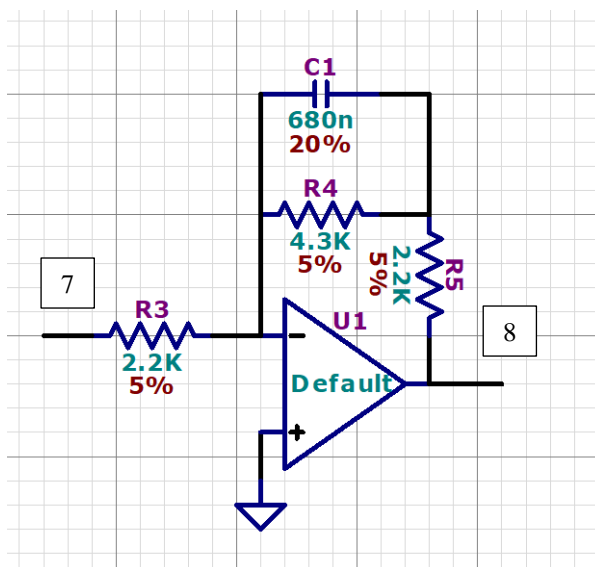
Obr. 36 Přenosová charakteristika HP basového měniče 1

### 9.4.3 Ekvalizace 1

Tento ekvalizační filtr s nastaveným ziskem 10 dB a mezní frekvencí 50 Hz narovnáva spodní pásmo frekvenční charakteristiky basového měniče. Zesílení filtru lze vypočítat dle vztahu (9.2) a mezní frekvenci dle vztahu (9.3)

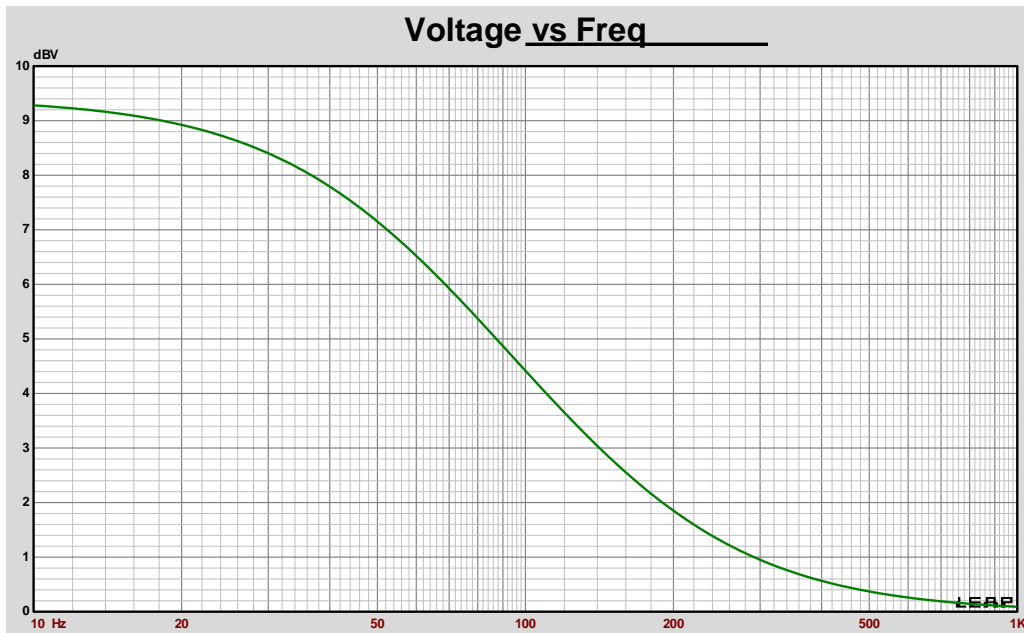
$$A = -\frac{R_4 + R_5}{R_3} [dB] \quad (9.2)$$

$$f = \frac{1}{2\pi R_4 R_5 C_1} [Hz] \quad (9.3)$$



Obr. 37 Schéma ekvalizace 1 měniče 1

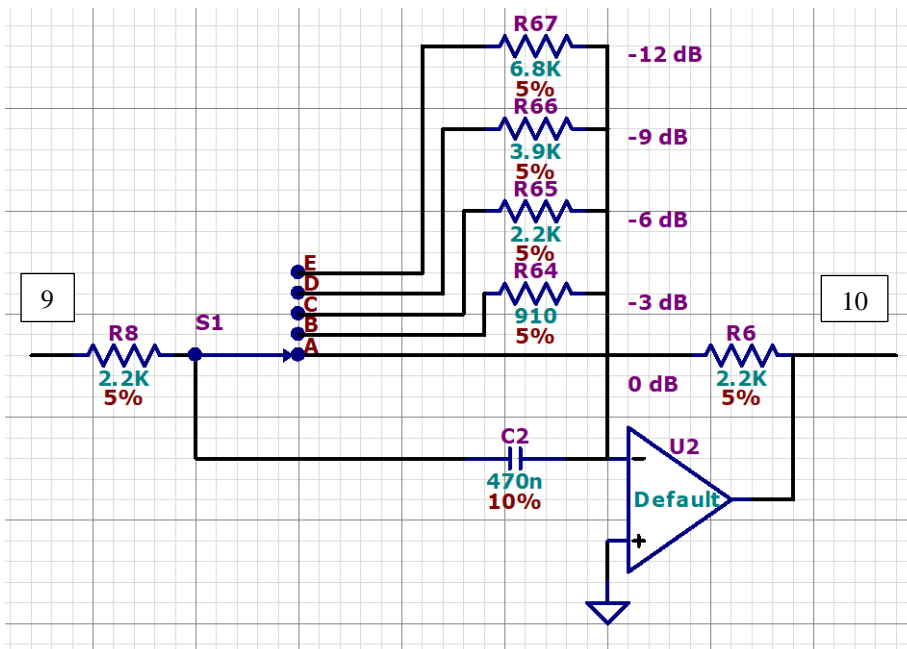




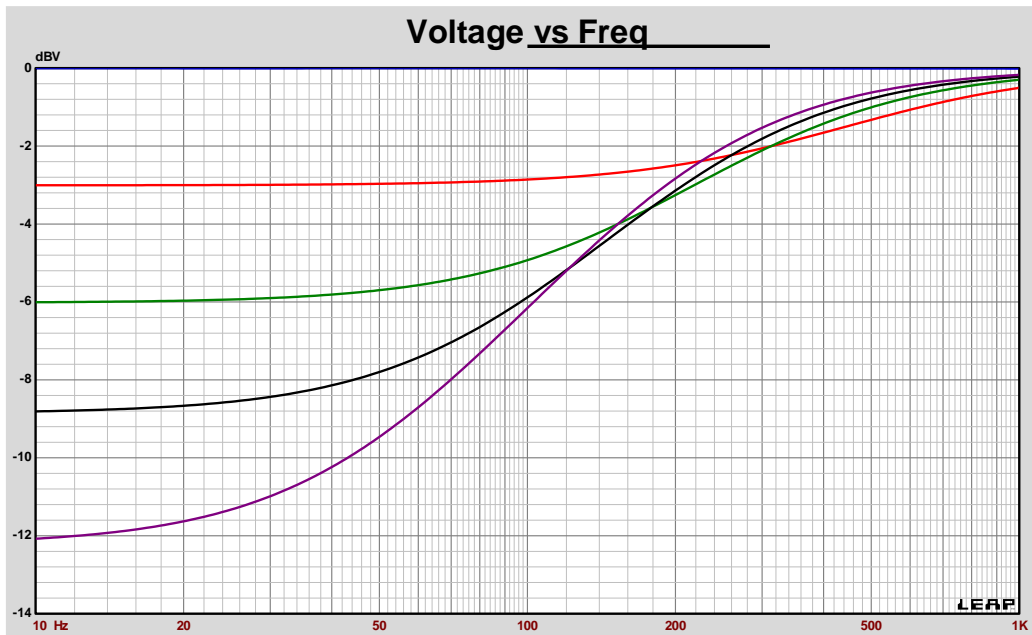
Obr. 38 Přenosová charakteristika ekvalizace 1 měniče 1

#### 9.4.4 Ekvalizace 2

Ekvalizační filtr s přepínatelným útlumem a nastavenou mezní frekvencí 50 Hz umožňuje přizpůsobovat frekvenční charakteristiku dle prostoru, do kterého bude měnič vyzářovat. Je možno volit kroky útlumu: 0; -3; -6; -9; -12 dB.



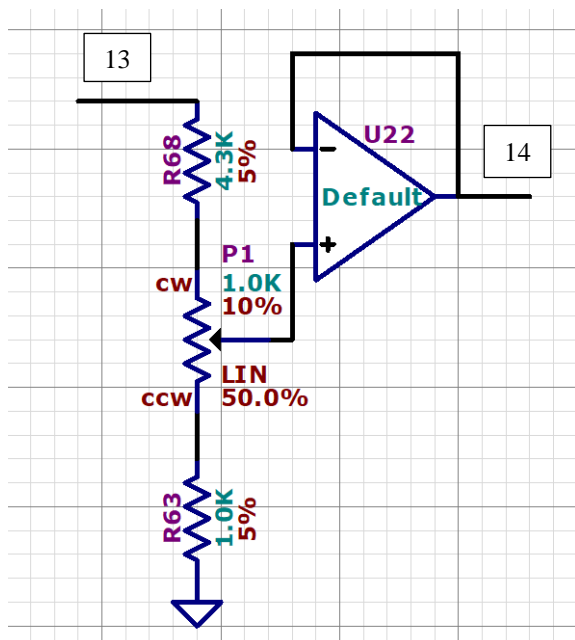
Obr. 39 Schéma přepínatelné ekvalizace 2 měniče 1



Obr. 40 Přenosová charakteristika přepínatelné ekvalizace 2 měniče 1

### 9.4.5 Korekce citlivosti měniče 1

V tomto bloku dochází ke snížení úrovně výstupního signálu. Je možná regulace v rozsahu -10 až -16 dB. Jednak je potřeba pevně snížit zisk 10dB, který vznikl na začátku řetězce pro využití dynamického rozsahu systému. Dále je možnost potenciometrem snížit úroveň signálu až o 6 dB. Tímto způsobem lze vyrovnat citlivosti jednotlivých měničů.

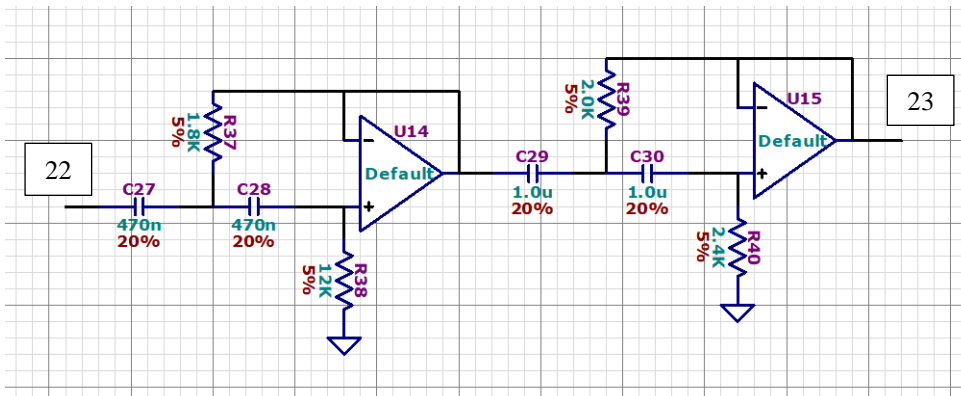


Obr. 41 Schéma korekce citlivosti měniče 1

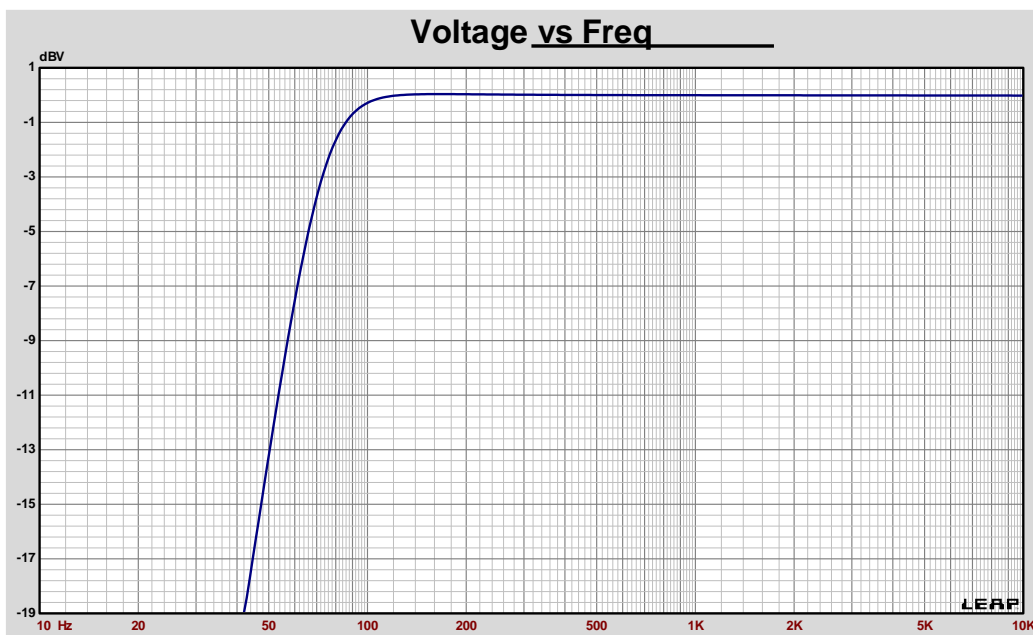
## 9.5 Bloky elektroniky větve měniče 2

### 9.5.1 Horní propust 75 Hz

Jedná se o filtr typu horní propust (Butterworth 3dB) druhého řádu se strmostí 24 dB na oktávu. Filtr je naladěný na 75 Hz a má dvě funkce. Nepropustí kmitočty, které vyzařuje měnič 1 a navíc zajišťuje, aby nebyla překročena maximální výchylka měniče, která by při nižších kmitočtech prudce rostla.



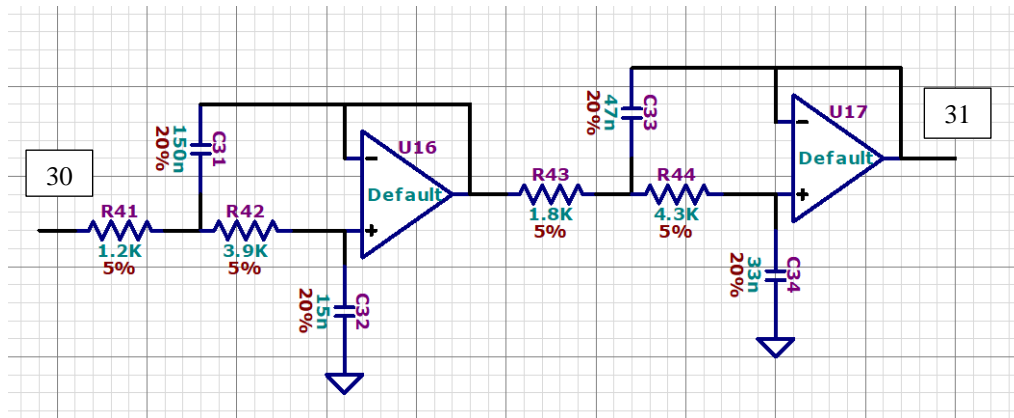
Obr. 42 Schéma HP měniče 2



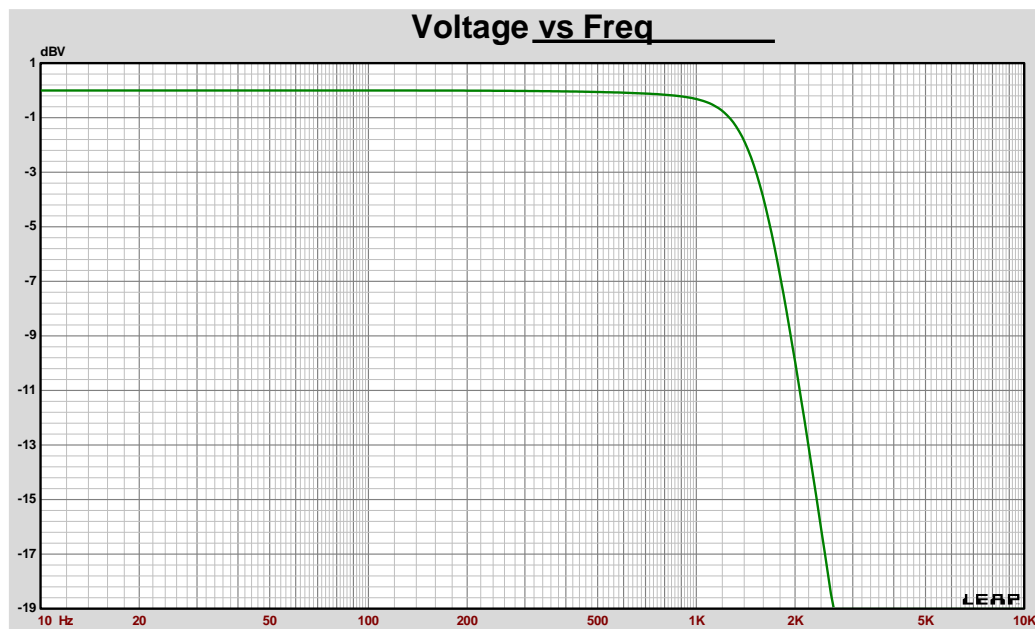
Obr. 43 Přenosová charakteristika HP měniče 2

### 9.5.2 Dolní propust 1,5 kHz

Jedná se o filtr typu dolní propust (Butterworth 3dB) druhého řádu se strmostí 24 dB na oktávu. Filtr má mezní frekvenci 1,5 kHz, vyšší frekvence přebírá měnič 3.



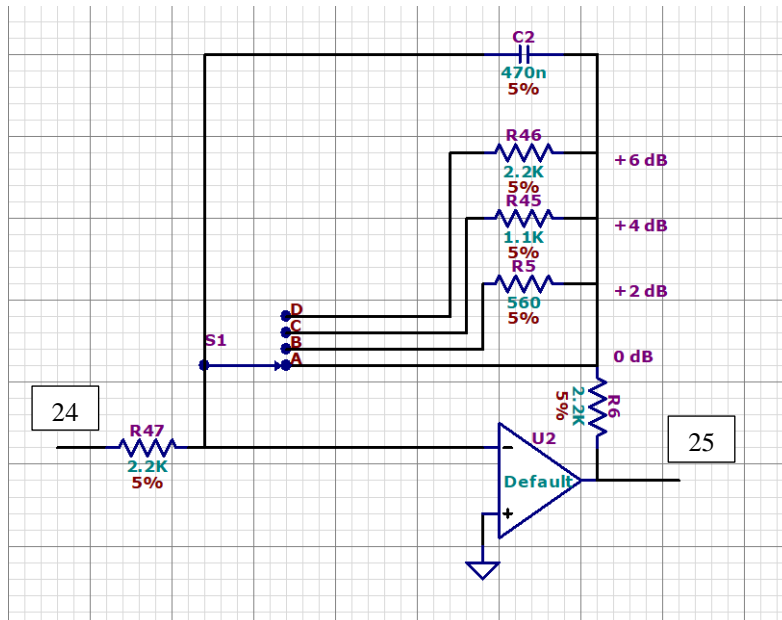
Obr. 44 Schéma DP středobasového měniče 2



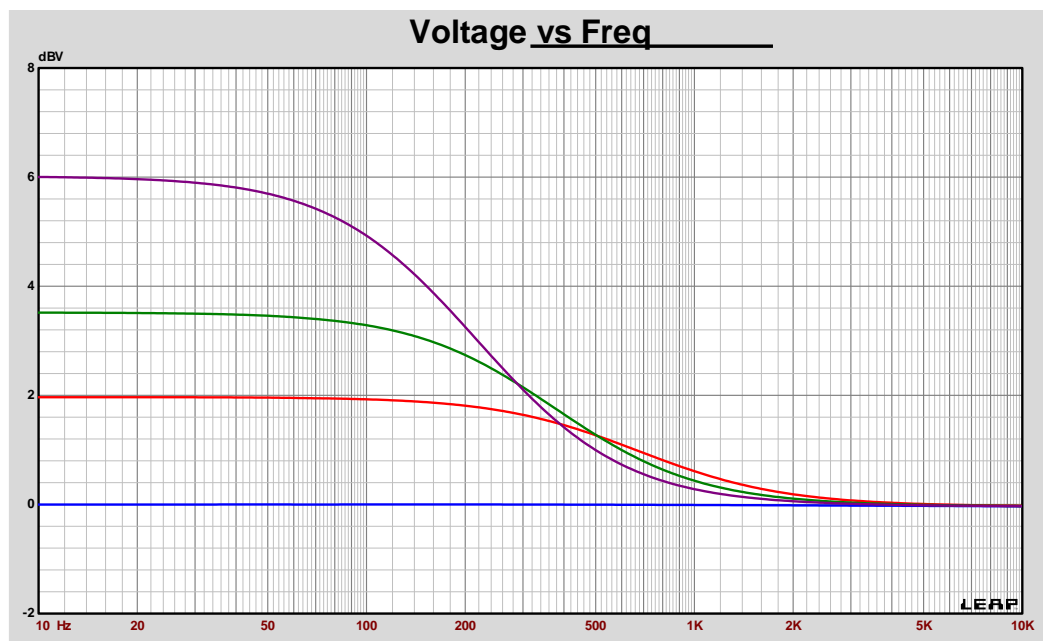
Obr. 45 Přenosová charakteristika DP středobasového měniče 2

### 9.5.3 Ekvalizace 1

Ekvalizační filtr s nastavenou mezní frekvencí 150 Hz umožňuje přizpůsobovat frekvenční charakteristiku prostoru, do kterého měnič 2 bude vyzařovat. Je možno volit kroky zisku: 0; +2; +4; +6 dB.



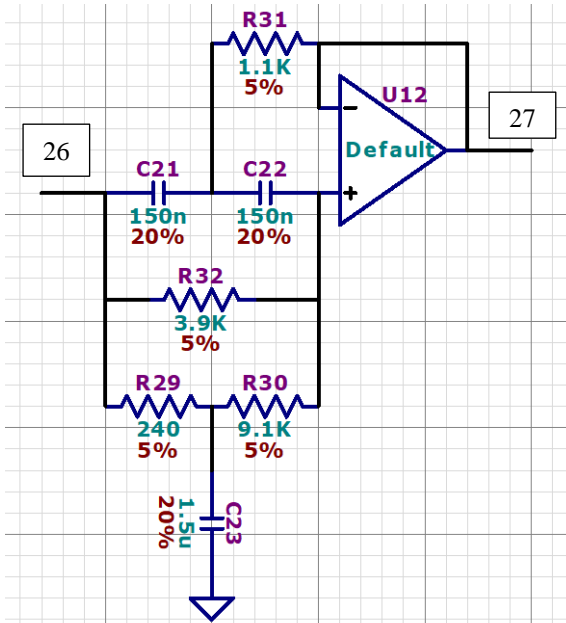
Obr. 46 Schéma přepínatelné ekvalizace měniče 2



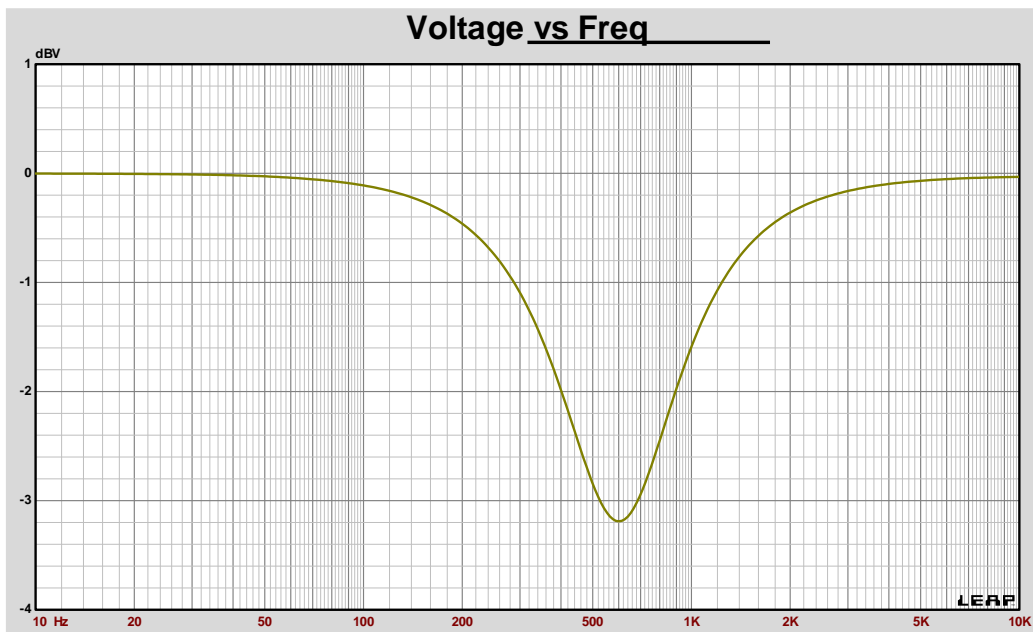
Obr. 47 Přenosová charakteristika přepínatelné ekvalizace měniče 2

### 9.5.4 Ekvalizace 2

Filtr s útlumem 3 dB a mezní frekvencí 300 Hz zajišťuje kompenzaci jevu zvaného baffle step. Jedná se o navýšení hladiny akustického tlaku vlivem rozměrů ozvučnice, které v pásmu vzniku tohoto jevu odpovídají vlnovým délkám vyzařovaných měničem.



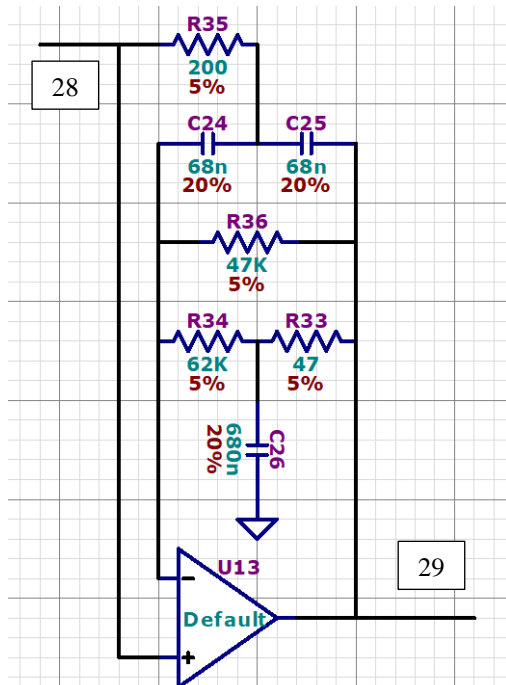
Obr. 48 Schéma kompenzace baffle stepu měniče 2



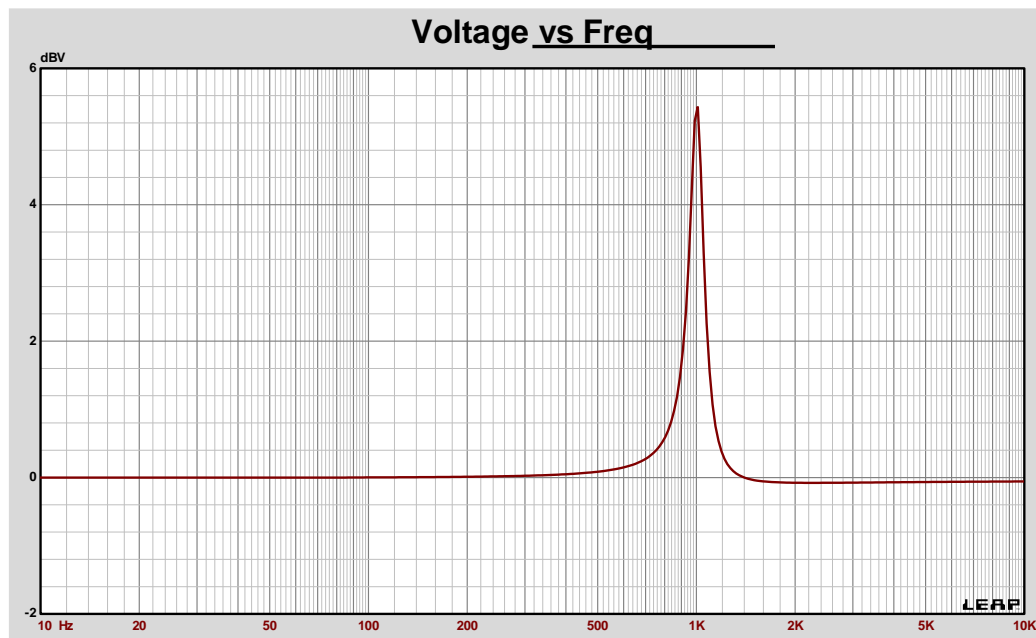
Obr. 49 Přenosová charakteristika kompenzace baffle stepu měniče 2

### 9.5.5 Ekvalizace 3

Filtr zajišťuje korekci propadu frekvenční charakteristiky měniče na 1 kHz ziskem 5 dB.



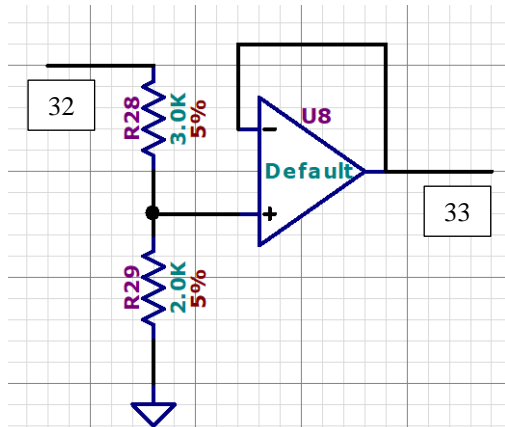
Obr. 50 Schéma korekce propadu na 1 kHz měniče 2



Obr. 51 Přenosová charakteristika korekce propadu na 1 kHz měniče 2

## 9.5.6 Korekce citlivosti středobasového měniče 2

Jedná se o napěťový dělič, který zajišťuje snížení signálové úrovně o 8 dB. Signálová úroveň byla zvýšena na začátku řetězce pro využití dynamického rozsahu systému.

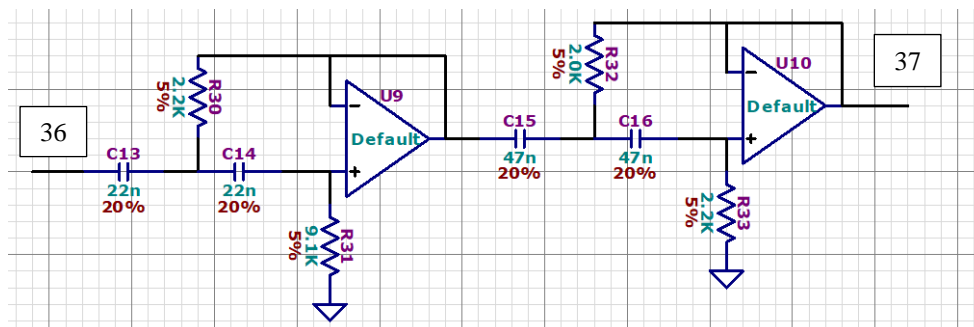


Obr. 52 Schéma korekce citlivosti měniče 2

## 9.6 Bloky elektroniky větve měniče 3

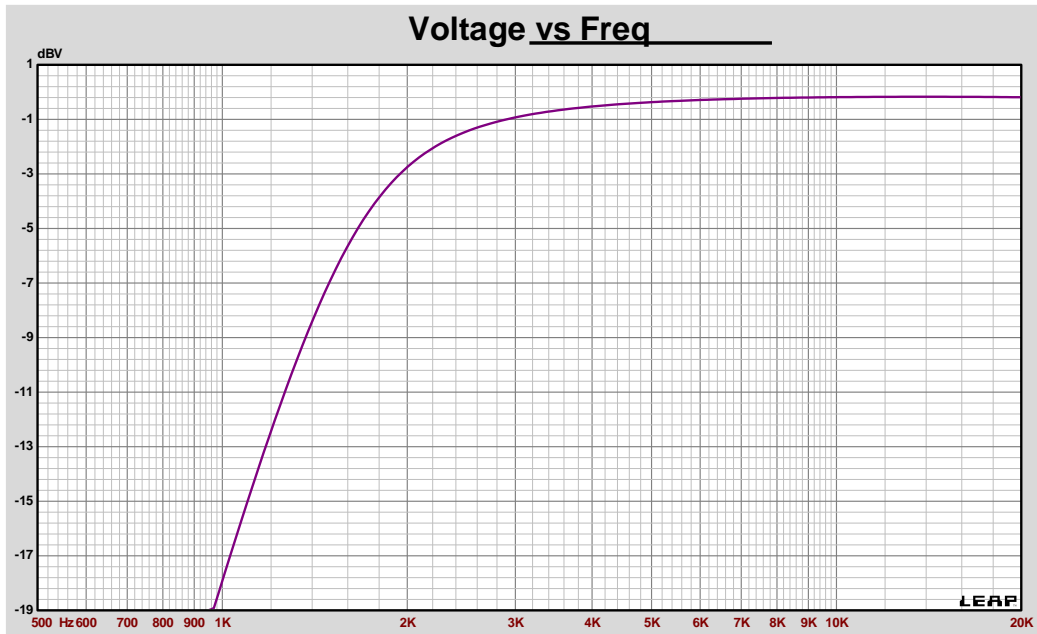
### 9.6.1 Horní propust 1,6 kHz

Jedná se o filtr typu horní propust (Butterworth 3dB) druhého řádu se strmostí 24 dB na oktávu. Filtr je naladěný na 1,6 kHz a má za úkol propustit kmitočty určené pouze pro měnič 3.



Obr. 53 Schéma HP výškového měniče 3

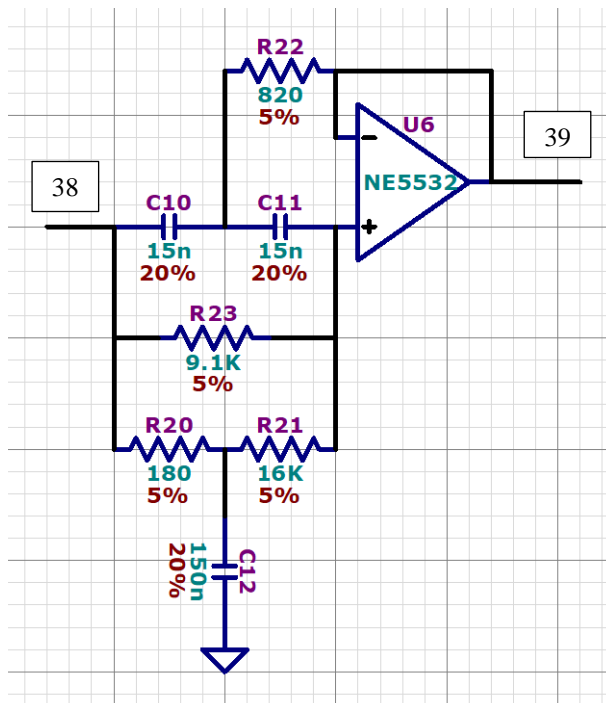




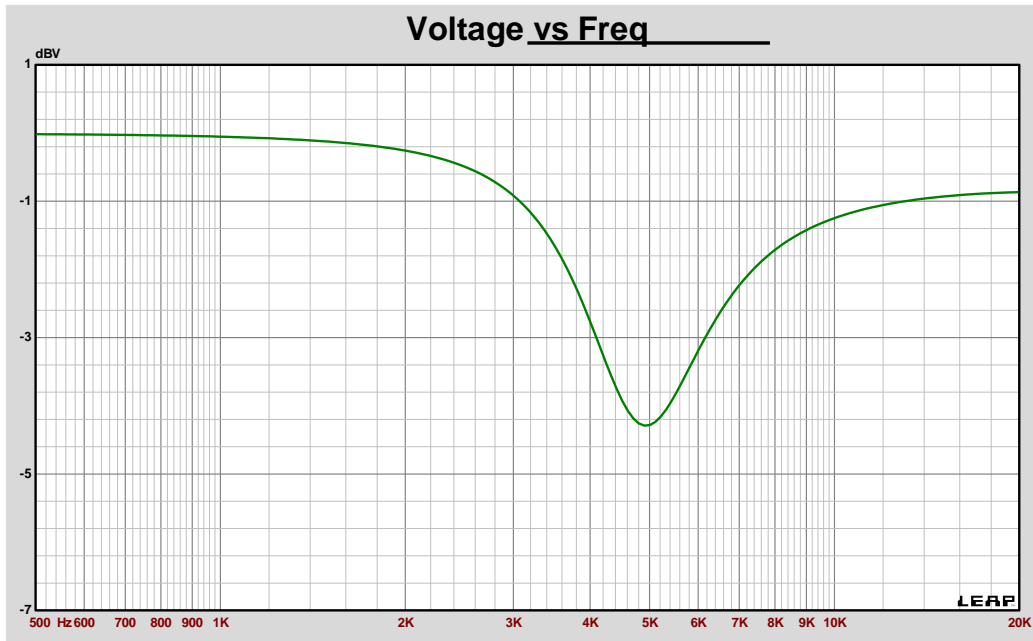
Obr. 54 Přenosová charakteristika HP výškového měniče 3

### 9.6.2 Ekvalizace 1

Filtr kompenzuje zvlnění frekvenční charakteristiky na kmitočtu 4,6 kHz. Toho je docíleno útlumem 3 dB v okolí tohoto kmitočtu.



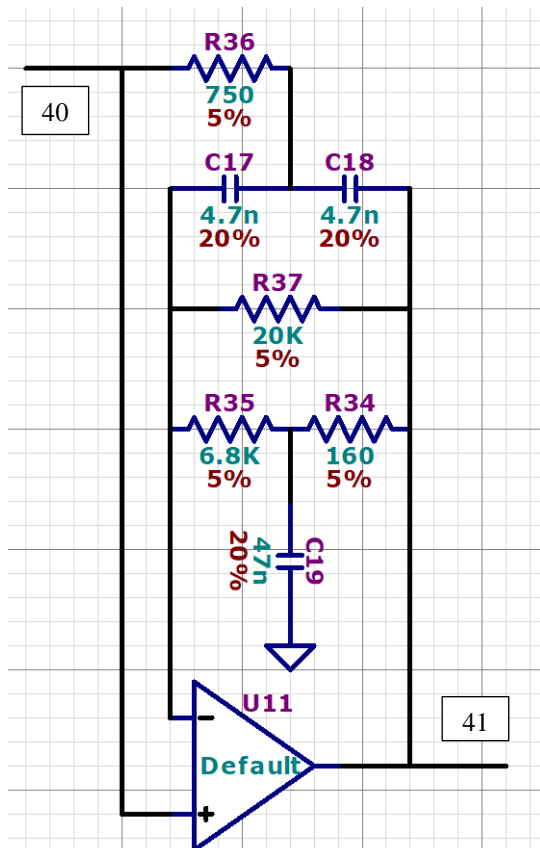
Obr. 55 Schéma kompenzace zvlnění na 4,6 kHz



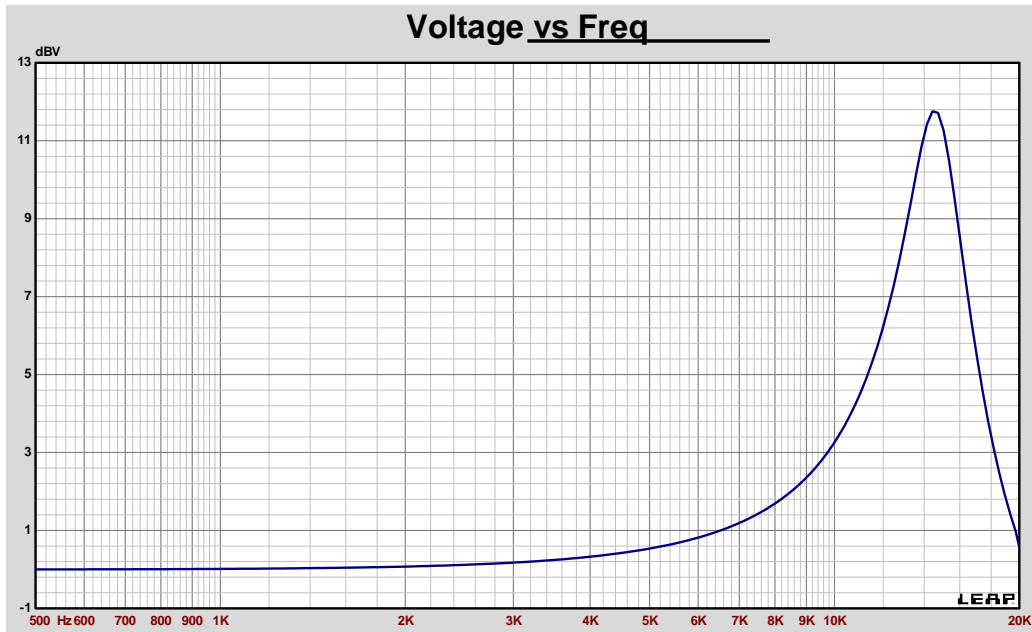
Obr. 56 Přenosová charakteristika kompenzace zvlnění na 4,6 kHz

### 9.6.3 Ekvalizace 2

Jedná se o filtr se ziskem 12 dB na kmitočtu 15 kHz, který vyrovnává pokles frekvenční charakteristiky v pásmu 10 – 16 kHz.



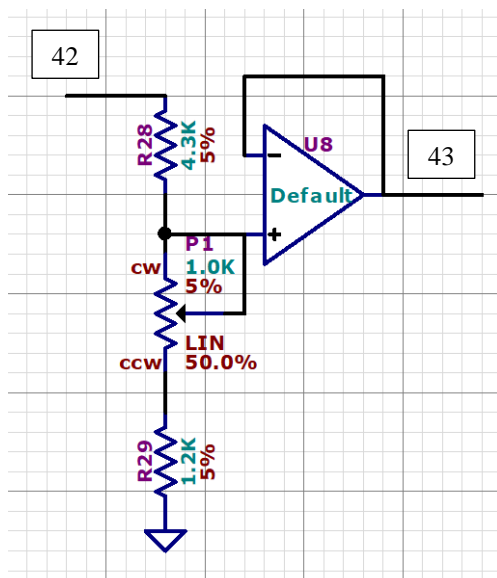
Obr. 57 Schéma naklopení pásma 10 – 16 kHz



Obr. 58 Přenosová charakteristika naklopení pásma 10 – 16 kHz

#### 9.6.4 Korekce citlivosti měniče 3

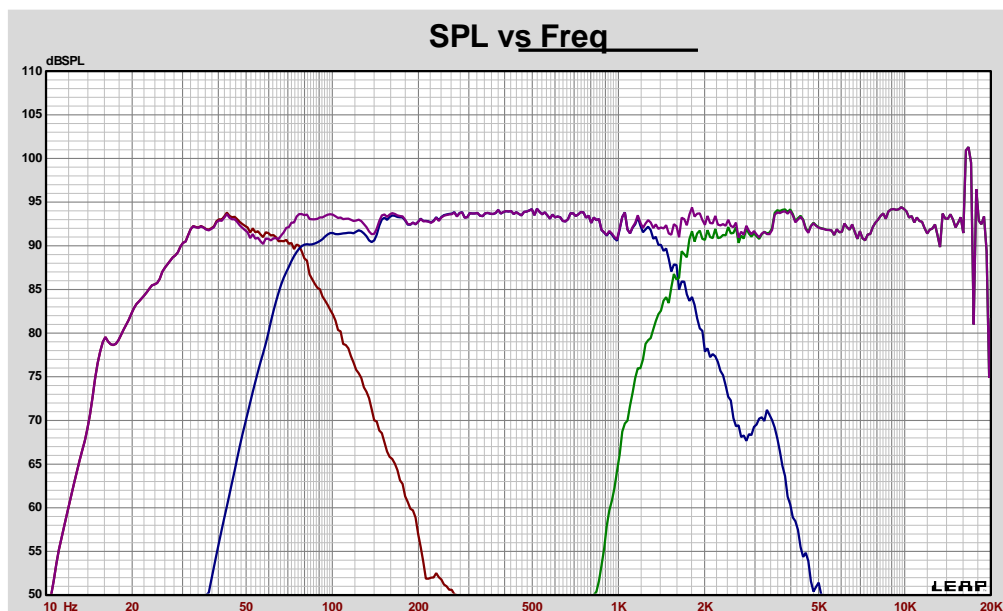
V tomto napěťovém děliči dochází ke snížení úrovně výstupního signálu. Je možná regulace v rozsahu -18,35 až -23,6 dB. Jednak je potřeba pevně snížit zisk 8 dB, který vznikl na začátku řetězce pro kvalitnější zpracování signálu. Zároveň je potřeba vyrovnat citlivosti jednotlivých měničů, tomu odpovídá i rozsah nastavení úrovně pomocí potenciometru.



Obr. 59 Korekce citlivosti měniče 3

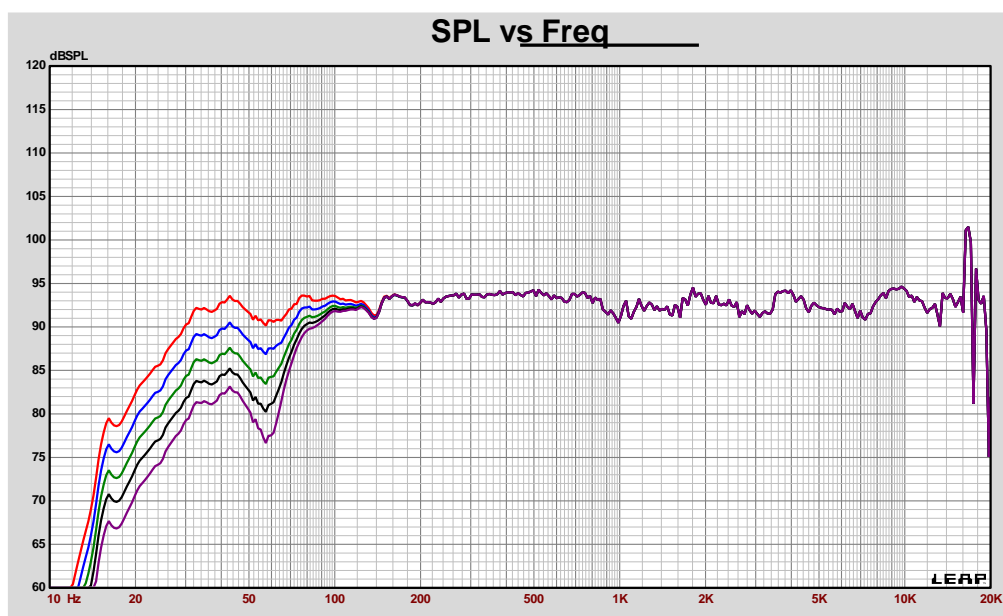
## 10 Výsledná charakteristika soustavy

Na Obr. 60 je zobrazena výsledná frekvenční charakteristika reprosoustavy (fialová křivka) s využitím navržené elektroniky. Je dána součtem tří pásem jednotlivých měničů: měnič 1 - modrá křivka, měnič 2 – modrá křivka, měnič 3 – zelená křivka. Charakteristika odpovídá vzdálenosti 1 m od referenční osy soustavy (vyzařovací úhel  $0^\circ$ ) a příkonu všech měničů 1 W.



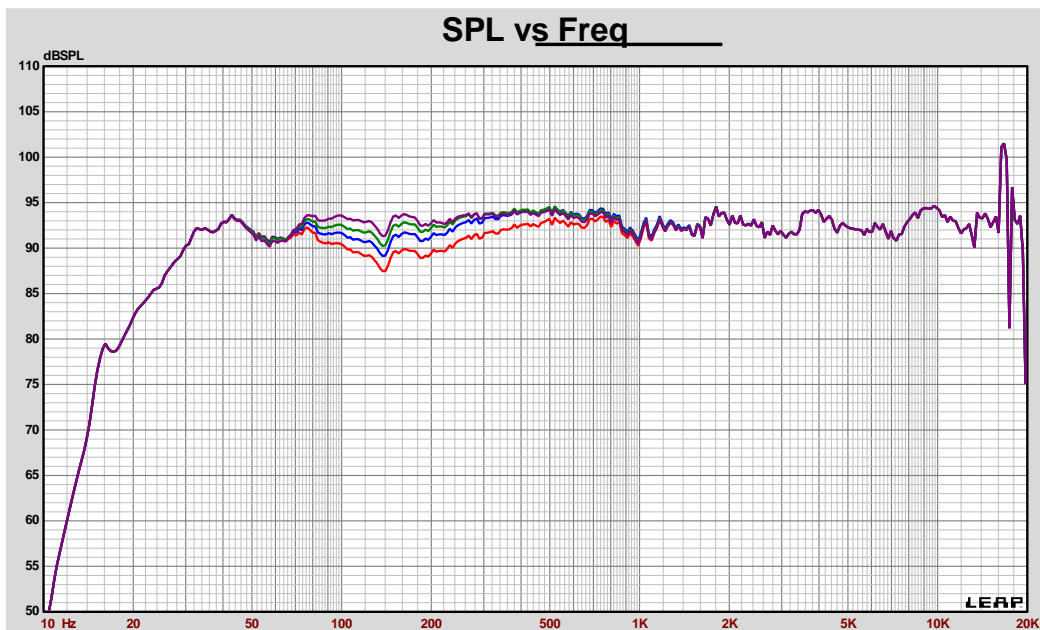
Obr. 60 Výsledná frekvenční charakteristika soustavy

Na Obr. 61 je zobrazen vliv nastavitelné ekvalizace u měniče 1 na frekvenční charakteristiku soustavy. Červená křivka odpovídá přepínači v poloze 0 dB, tedy s vypnutou ekvalizací. Modrá křivka odpovídá přepínači v poloze -3 dB, zelená -6 dB, černá -9 dB a fialová -12 dB.



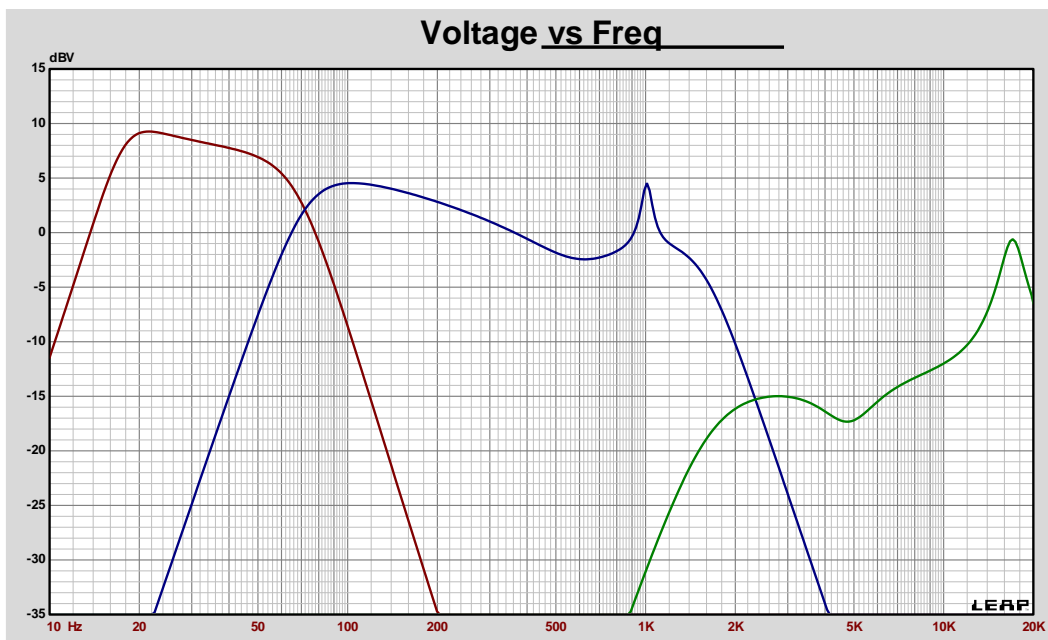
Obr. 61 Možnost ekvalizace subwooferu (měnič 1)

Na Obr. 62 je zobrazen vliv přepínatelné ekvalizace měniče 2 na frekvenční charakteristiku soustavy. Červená křivka odpovídá přepínači v poloze 0 dB, modrá křivka odpovídá přepínači v poloze +2 dB, zelená +4 dB a fialová +6 dB.



Obr. 62 Možnost ekvalizace satelitu (měnič 2)

Na Obr. 63 jsou zobrazeny přenosové charakteristiky větví elektroniky jednotlivých měničů. Elektronika měniče 1 - modrá křivka, měniče 2 – modrá křivka, měniče 3 – zelená křivka.



Obr. 63 Přenosové charakteristiky jednotlivých větví elektroniky

## 11 Návrh DPS s elektronikou soustavy

Návrh desky plošného spoje s elektronikou soustavy je zobrazen v příloze B. Jedná se o oboustrannou desku o rozměrech 259 x 225 mm. Na DPS je umístěno pět XLR konektorů pro přivedení vstupního signálu pro jednotlivé kanály. Výstupní signál je přiveden na dvoupinové kolíkové lišty. K napájecí svorkovnici musí být přivedené symetrické napájecí napětí  $\pm 18$  V. Přepínače ekvalizací a možnost zapnutí sumárního obvodu jsou řešeny pomocí jumperů. Jumpery jsou vloženy také mezi jednotlivými bloky elektroniky pro případné zjednodušení při oživení obvodu.

## 12 Výsledky měření reprosoustavy

Výsledky měření budou předneseny při obhajobě diplomové práce.

## 13 Závěr

Prvním krokem bylo stanovením technických požadavků na reprosoustavu, které nám určily kritéria pro výběr jednotlivých měničů. Při výběru měničů byl brán zřetel hlavně na vysokou vlastní citlivost, vyrovnanou frekvenční charakteristiku a vysokou maximální lineární výchylku. Katalogové parametry měničů byly ověřeny měřením pomocí navrženého přípravku pro měření impedance měniče a následného odvození TS parametrů.

Při znalosti TS parametrů bylo možné provést simulaci a návrh reproduktorových ozvučnic v návrhovém softwaru. Následně byly vyrobeny dva vzorky bassreflexových ozvučnic z OSB desek. Po jejich osazení měniči bylo provedeno měření frekvenčních charakteristik v bezodrazové komoře. Při pohledu na naměřené charakteristiky byly zjištěny některé nedostatky. Obě ozvučnice měly posunutý rezonanční kmitočet bassreflexového nátrubku směrem dolů oproti návrhu. Nejvhodnějším řešením problému je zkrácení hloubky bassreflexových nátrubků. Druhý nedostatek nastal u ozvučnice satelitu, kde dochází k odrazu zvukové vlny vyzářené měničem 2 od zvukovodu měniče 3, a sečtením přímé a odražené zvukové vlny v měřicím bodě vzniká propad ve frekvenční charakteristice na kmitočtu 1 kHz. Tento jev dle všeho nemá úplné řešení, protože je závislý také na poloze měřícího mikrofону.

Dle naměřených frekvenčních charakteristik byla navržena elektronika reprosoustavy. Ta obsahuje vstupní jednotku pro převod nesymetrického vstupního signálu na nesymetrický, regulaci hlasitosti, frekvenční výhybky, ekvalizační filtry a obvody pro korekci citlivosti měničů. Pro elektroniku byla následně navržena DPS. Bohužel už se její funkčnost nestihla před odevzdáním práce ověřit. Proto budou naměřená data k dispozici až u obhajoby.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

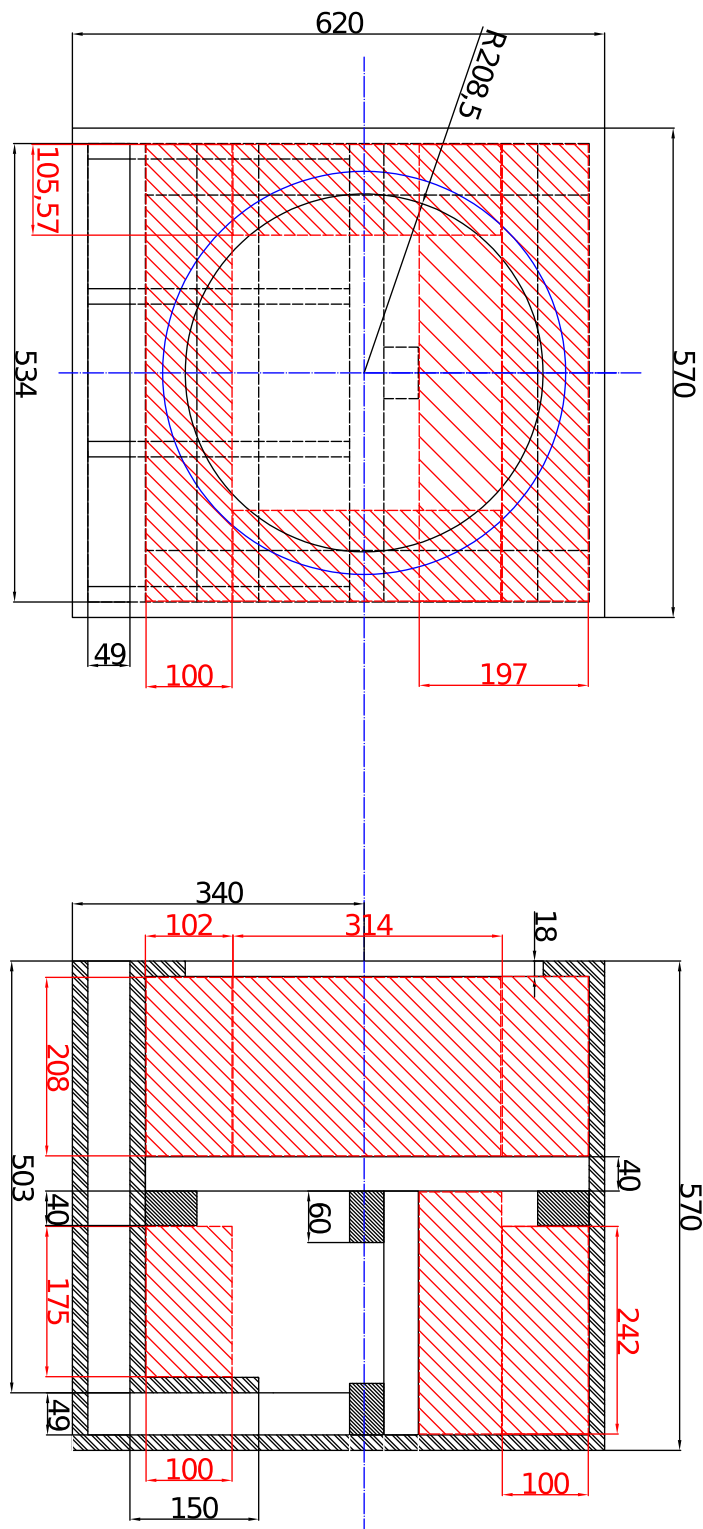
- [1] Recommendations ITU-R BS.1116-1: Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems [online]. 1997 [cit. 04.06.2020]. Dostupné z: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-1-199710-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1116-1-199710-S!!PDF-E.pdf)
- [2] EBU Tech 3276: Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic [online]. 1998 [cit. 04.06.2020]. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276.pdf>
- [3] EBU Tech 3276-E: Listening conditions for the assessment of sound programme material [online]. 2004 [cit. 04.06.2020]. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3276s1.pdf>
- [4] AES TECHNICAL COUNCIL Document AESTD1001.1.01-10: Multichannel surround sound systems and operations [Online]. 2001, [cit. 04.06.2020]. Dostupné z: <http://www.aes.org/technical/documents/AESTD1001.pdf>
- [5] Dickason, Vance. *The loudspeaker design cookbook 7th edition*. Peterborough, N.H: Audio Amateur Press, 2006. ISBN 1882580478 [cit. 06.07.2020]
- [6] Sýkora, Bohumil. *Stavíme reproduktorové soustavy*, Praktická elektronika A Radio, 1997 – 2001 [cit. 07.07.2020]
- [7] Škvor, Zdeněk. *Elektroakustika a akustika*, ČVUT Praha, 2012. ISBN 978-80-01-025034-7 [cit. 07.07.2020]
- [8] THD – Wikipedie [online]. [cit. 07.07.2020] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/THD>
- [9] Thiele/Small parameters – Wikipedia [online]. [cit. 08.07.2020] Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small\\_parameters](https://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small_parameters)
- [10] APx500 User Manual – Audio Precision [online]. [cit. 08.07.2020] Dostupné z: <https://www.ap.com/download/apx500-user-manual-2/>
- [11] Parametry reproduktoru – Repromania [online]. [cit. 08.07.2020] Dostupné z: <http://www.repromania.net/teorie/parametry-reproduktoru.php>
- [12] LEAP EnclosureShop – Reference Manual, LinearX Systems, 2003. [cit. 09.07.2020]
- [13] LEAP EnclosureShop – Application Manual, LinearX Systems, 2003. [cit. 09.07.2020]
- [14] LEAP CrossoverShop – Reference Manual, LinearX Systems, 2003. [cit. 09.07.2020]

- [15] LEAP CrossoverShop – Application Manual, LinearX Systems, 2003. [cit. 09.07.2020]
  
- [16] THAT 1200-SERIES datasheet, THAT corporation [online]. [cit. 09.07.2020]  
Dostupné z: [http://www.thatcorp.com/datashts/THAT\\_1200-Series\\_Datasheet.pdf](http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_1200-Series_Datasheet.pdf)
  
- [17] THAT 2181-SERIES datasheet, THAT corporation [online]. [cit. 09.07.2020]  
Dostupné z: [http://www.thatcorp.com/datashts/THAT\\_2181-Series\\_Datasheet.pdf](http://www.thatcorp.com/datashts/THAT_2181-Series_Datasheet.pdf)

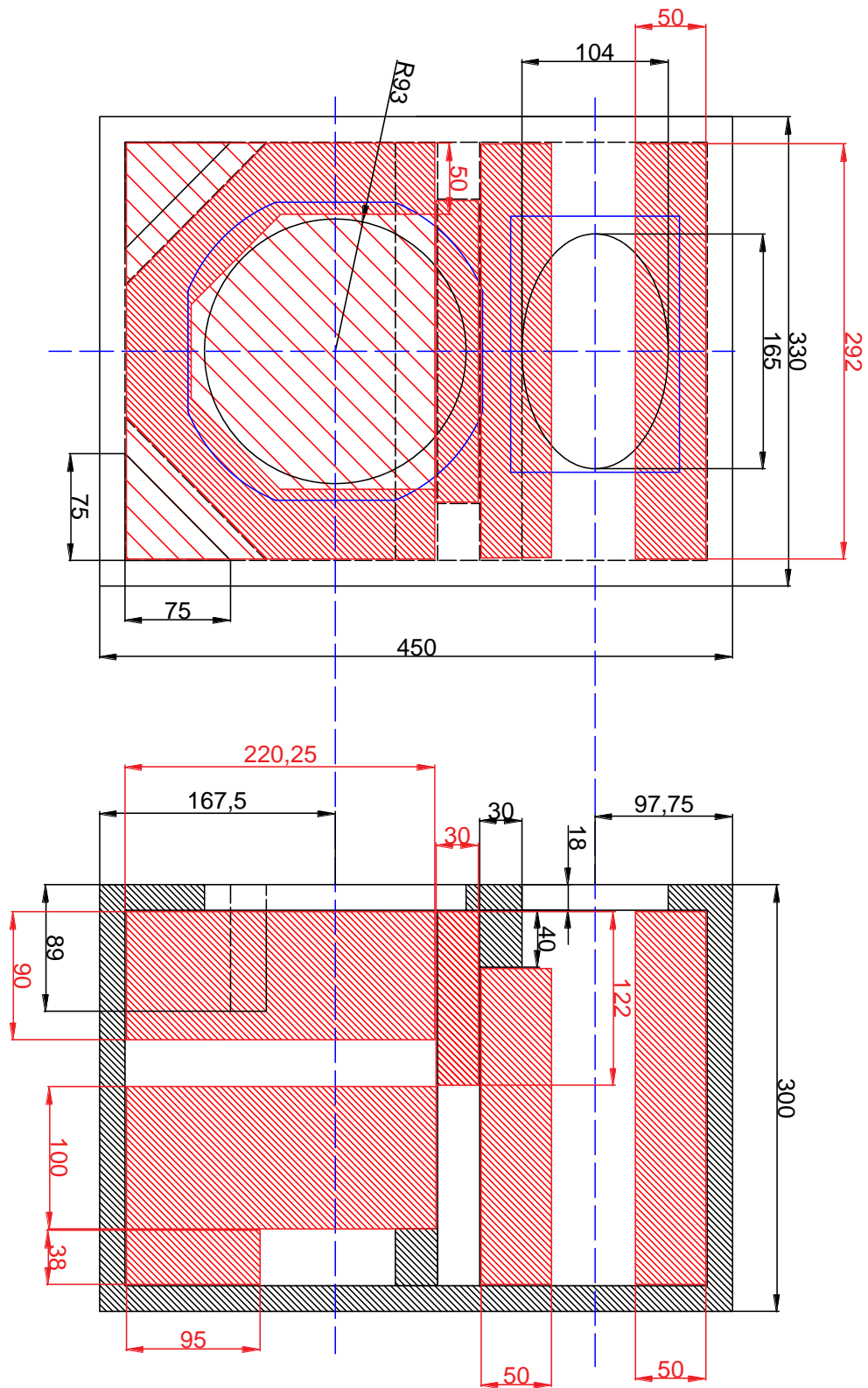


## Přílohy

### Příloha A: Technické výkresy ozvučnic

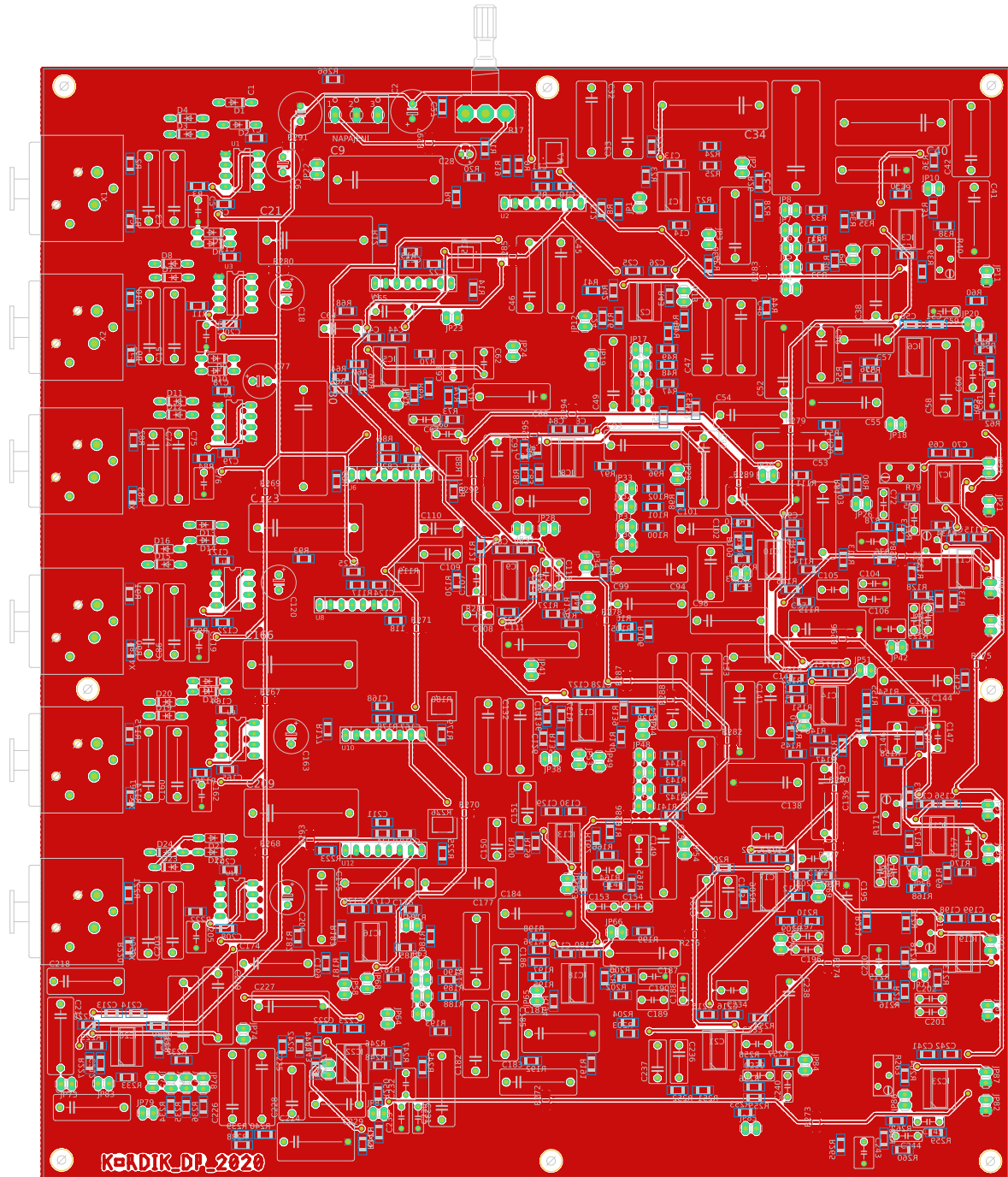


Obr. A1 Technický výkres ozvučnice subwooferu

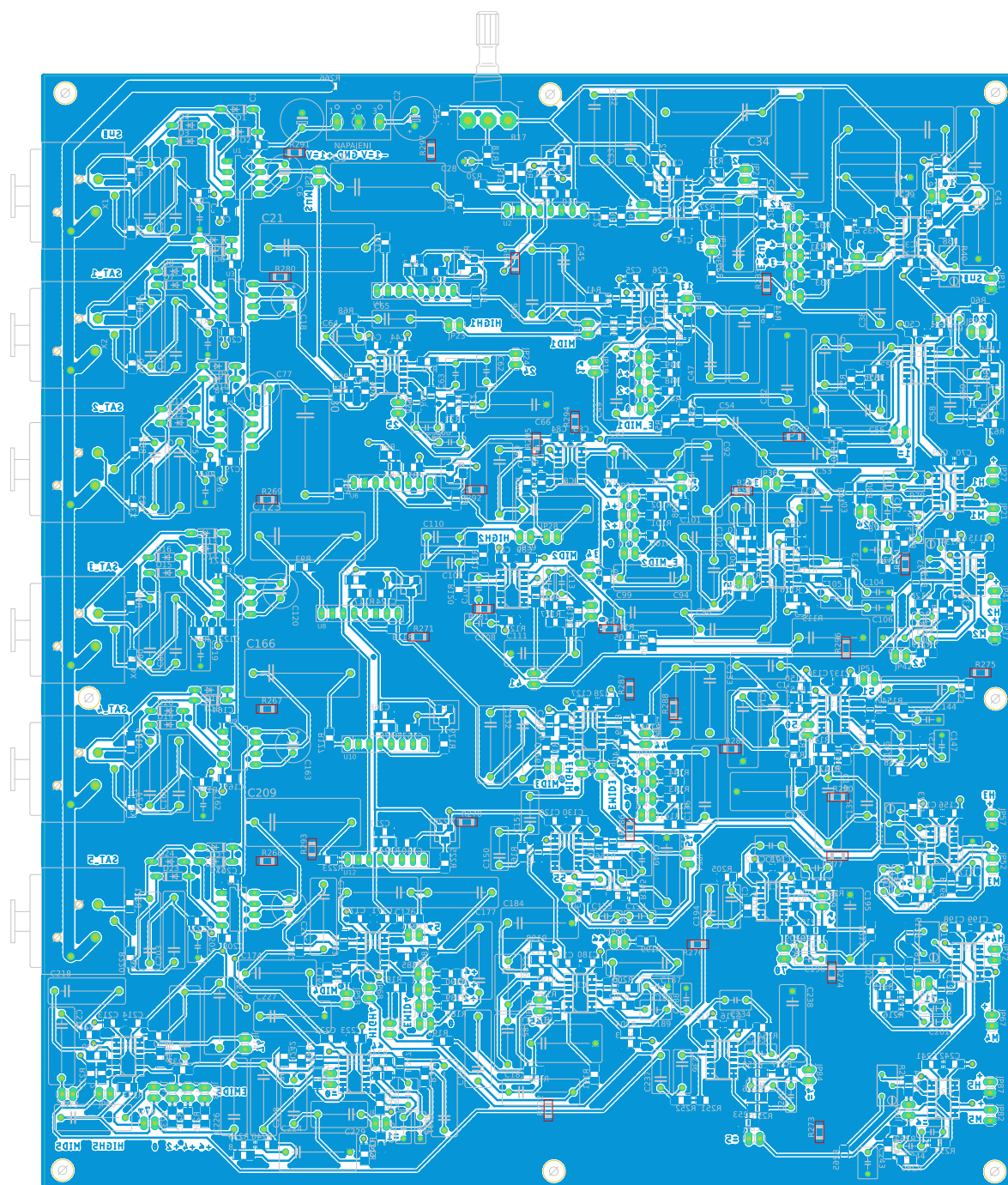


Obr. A2 Technický výkres ozvučnice satelitu

**Příloha B: Motiv DPS pro elektroniku soustavy**



**Obř. B1 Motiv DPS strana TOP**



Obr. B2 DPS strana BOTTOM