

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

AKTIVNÍ REPRODUKTOROVÁ SKŘÍŇ PRO WAVEFIELD SYNTÉZU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

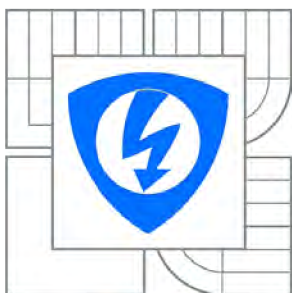
PAVEL NAŇÁK

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## AKTIVNÍ REPRODUKTOROVÁ SKŘÍŇ PRO WAVEFIELD SYNTÉZU

LOUDSPEAKER BOX FOR WAVEFIELD SYNTHESIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

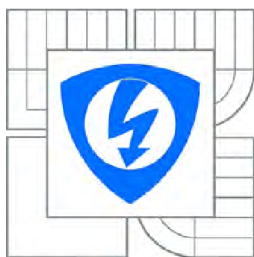
PAVEL NAŇÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Pavel Naňák

**ID:** 106663

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Aktivní reproduktorová skříň pro wavefield syntézu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte jednopásmovou aktivní reproduktorovou skříň s externím napájecím zdrojem osazenou širokopásmovým reproduktorem vhodnou jako zdroj zvukového signálu pro wavefield syntézu, tj. s malými rozměry a šířkou nepřesahující 15 cm. Zvolte vhodný reproduktor a proveďte simulaci kmitočtové a směrové charakteristiky soustavy v programu LspCAD nebo podobném. navrhněte schéma zapojení a desku plošných spojů zesilovače pro tento reproduktor a napájecí zdroj. Uvažujte linkovou vstupní úroveň -10 dBU a +4 dBU. Zařízení realizujte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Sýkora, B., "Stavíme reproduktorové soustavy", 1. - 48. díl. A Radio 10/1997 - 9/2001.
- [2] Toman, K., Reprodukory a reprosoustavy, 1 díl. 2003.
- [3] Benson, K., B. Audio Engineering Handbook. McGraw-Hill, 1988. 1040 p. ISBN 0-07-004777-4
- [4] Brandenburg, K., Brix, S., Sporer, T., "Wave field synthesis: From research to applications". In Proceeding of European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2004. TU Wien, 2004, pp. 1369-1376.

**Termín zadání:** 29.1.2010

**Termín odevzdání:** 2.6.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*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.

# Anotace

Cílem této práce je navrhnout aktivní reproduktorovou soustavu, jako zdroj zvuku vhodný pro wavefield syntézu. Reproduktorová soustava je uvažována jako jednopásmová a svoji šířkou by neměla přesahovat 15 cm. Měla by být navržena co nejlépe, což se týká hlavně parametrů jako kmitočtová charakteristika a charakteristika směrová. Část práce je věnována teoretické problematice, která pojednává o principu samotné wavefield syntézy a jejím užití na poli prostorového zvuku, dále pak o akustických měničích, speciálně o měniči elektrodynamickém, který je v práci použit a části problematiky o ozvučnicích pro reproduktory. V práci jsou uvedeny dva návrhy ozvučnic, kdy jedna je koncepce uzavřená ozvučnice a druhá je ozvučnice bassreflexová. Obě tyto ozvučnice jsou odsimulovány v programu LEAP-5 a optimalizovány pro užití v této práci. Všechny konstrukční možnosti, v této práci uvedené, jsou přehledně dokumentovány v příloze. Zvláštní pozornost je věnována výběru měniče pro tento reproduktor a popisu jeho vlastností, kdy jsou diskutovány pozitiva a negativa každého z vybraných měničů a vhodnost jeho užití pro tuto práci. Čistě elektronickou částí práce je návrh zesilovače a napájecího zdroje, vhodného pro napájení minimálně čtyř těchto reproduktorů. Zesilovač je uzpůsoben pro přepínání vstupní úrovně signálu mezi -10 dBu a +4 dBu, toho je dosaženo přepínáním zesílení zesilovače. Zesilovač, aby vyhověl malým rozměrům celé soustavy, je realizován ve třídě D. K jeho napájení slouží externí zdroj, který byl především navrhován jako co nejmenší a zároveň co nejvýkonnější. Každý z modulů zdroje a zesilovač mají své schémata a návrhy desek plošného spoje uvedeny přehledně v příloze.

## Klíčová slova

Wavefield syntéza, reproduktorová skříň, prostorový zvuk, zesilovač, širokopásmový měnič, třída D

# Abstract

Purpose of this work is to design active loudspeaker system as a source of sound proper for wavefield synthesis. Loudspeaker system is considered as a singleband and its length should not overlap 15cm. System should be designed at the best in parameters like frequency characteristic and directional characteristic. Part of work is dedicated to theoretical aspects, explanation of wavefield principles itself and its usage on the field of surround sound, further this work concerns aural transducers, especially electrodynamic one, which is used in this work, and the last topic is about baffle-board for loudspeakers. Hereinafter there are laid two proposals of baffles, one conception is closed baffle and second is bassreflex baffle. Both of those baffle conceptions are simulated in program LEAP-5 and are optimized for this current work. All construction possibilities introduced in this work are digestedly documented in appendix. Special attention is dedicated to right choice of aural transducer for this loudspeaker and to description of its attributes, there are discussed pro and cons of every chosen transducer and its suitability for this work. Electronic part of work is designing of amplifier and power source suitable for at least four of loudspeakers. Amplifier is modified for switching input level of signal between -10 dBu and +4 dBu, this range is reached by switching the amplification of amplifier. Amplifier is realized in class D, because of the demands on small the size of the system. Amplifier is powered by external source designated to be small and effective at the same time. Each module of power source and amplifier has their schemes and designs of printed circuit boards are documented in appendix.

# Keywords

wave field synthesis, baffle, surround sound, amplifier, fullrange transducer, D class

NAŇÁK, P. *Aktivní reproduktorová skříň pro wavefield syntézu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 68 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Aktivní reproduktorová skříň pro wavefield syntézu“ 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 práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. 5. 2010

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za užitečnou metodickou pomoc, cenné rady a poskytnutí technických prostředků při zpracování a realizaci bakalářské práce.

V Brně dne 28. 5. 2010

.....

podpis autora



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Wavefield syntéza</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Měniče</b>	<b>14</b>
3.1	Ideální měnič	14
3.2	Rozdělení měničů	14
3.2.1	Rozdělení podle kmitočtového rozsahu	14
3.2.2	Rozdělení podle principu činnosti a konstrukčního řešení	15
3.2.3	Rozdělení podle aplikace	17
3.3	Parametry měničů	18
<b>4</b>	<b>Ozvučnice</b>	<b>19</b>
4.1	Ozvučnice rovinná deska	19
4.2	Uzavřená ozvučnice	20
4.3	Ozvučnice typu bassreflex	20
<b>5</b>	<b>Konstrukční řešení</b>	<b>22</b>
5.1	Výběr reproduktoru	22
5.2	Popis měniče Visaton FRS 8	24
5.3	Návrh ozvučnice	25
5.3.1	Koncepce uzavřená ozvučnice	26
5.3.2	Koncepce bassreflexové ozvučnice	27
5.4	Návrh zesilovače	29
5.5	Návrh zdroje	30
5.5.1	Transformátor	30
5.5.2	Usměrňovač	30
5.5.3	Stabilizátor	31
<b>6</b>	<b>Realizace konstrukce a výsledky měření soustavy</b>	<b>32</b>
6.1	Realizace ozvučnice	32
6.2	Realizace zesilovače	34
6.3	Realizace napájecího zdroje	36
6.4	Měření soustavy	36
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>37</b>

<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>39</b>
<b>Seznam použitých zkratek .....</b>	<b>41</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>43</b>

# 1 Úvod

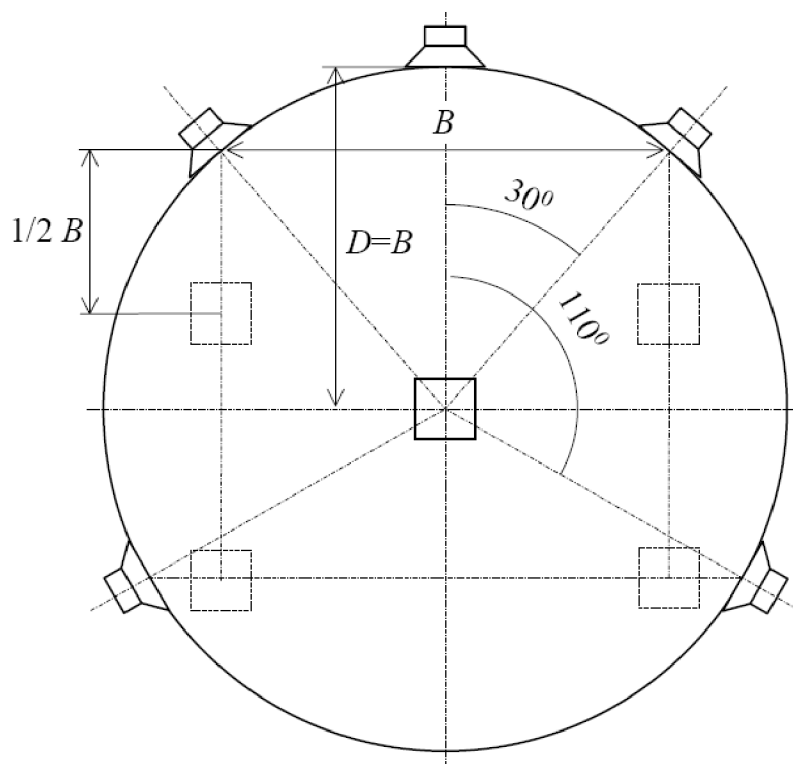
Na úvod je patrně vhodné objasnit pojem wavefield syntéza. Jedná se o jistý matematický aparát pro realizaci prostorové reprodukce zvuku, podobně jako například reprodukce stereo, či prostorovější Dolby nebo DTS a SDDS.[1] Každý z uvedených systému dokáže navodit jakýsi prostorový vjem. Tyto systémy reprodukce mají však nevýhody, ze kterých je tou, která právě odůvodňuje použití wavefield syntézy, normou určená pozice posluchače. Čili se dá říci, že posluchač se nemůže nacházet libovolně v prostoru, do kterého je nahrávka reprodukována, aniž by nebyly narušeny optimální poslechové podmínky. A to právě eliminuje použití wavefield syntézy, její základní myšlenkou je tedy libovolná poloha posluchače, při nezměněných poslechových podmínkách. [2]

Wavefield syntéza je ovšem pouze matematický aparát k adekvátnímu zpracování zvuku. K tomu, aby se mohlo tohoto aparátu využít k reprodukci zvuku, je potřeba celý řetězec zvukových zařízení, na jehož konci je právě reproduktorová soustava vhodná jako zdroj signálu pro wavefield syntézu. Jejímž návrhem a možnostmi konstrukce se budu v této práci zabývat.

V jednotlivých kategoriích je popsán teoretický základ, ze kterého jsem vycházel při návrhu. Dále je pak samotný popis mnou navrhnutého konstrukčního řešení.

## 2 Wavefield syntéza

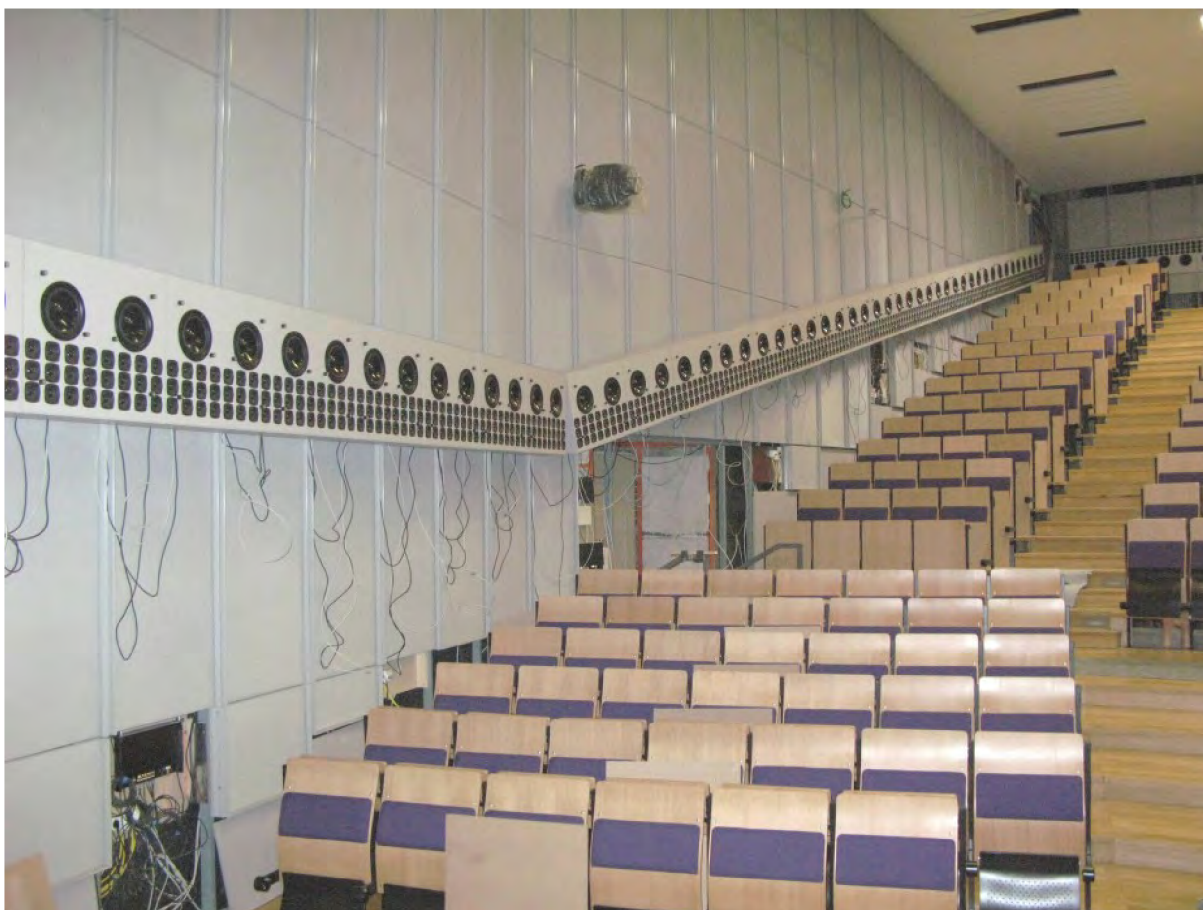
Pro lepší nastínění problematiky, bych uvedl typický příklad systému, kde záleží na pozici posluchače. Na obr. 2.1 je znázorněna doporučená konfigurace takového systému, pro jednoho posluchače, obrázek je převzat z [1].



Obr. 2.1: Doporučení ITU-R pro konfiguraci kanálů 5.1 Surround Sound.[1]

Je zřejmé, že pro více než jednoho posluchače a případně kinosál, či podobné zařízení bude doporučení a konfigurace reproduktorů odlišná. A také je jisté, že při narušení optimální pozice posluchače dojde ke zhoršení lokalizace virtuálního zdroje zvuku. [1]

Zde dostává prostor wavefield syntéza. Jak je zmíněno v úvodu práce, je reprodukce pomocí wavefield syntézy, nezávislá na poloze posluchače. Dalo by se tedy použít přirovnání k obrazovému hologramu, kdy je obraz viditelný z jakéhokoliv místa v 3D prostoru, jakoby se divák pohyboval okolo skutečného 3D předmětu. Obdobně je to u zvukové produkce pomocí wavefield syntézy. Virtuální zdroj zvuku bude posluchač schopen stále lokalizovat ze stejného místa, i když se bude pohybovat. Intenzita a složení zvuku bude závislá na poloze posluchače, opět tak jako v reálném prostředí.



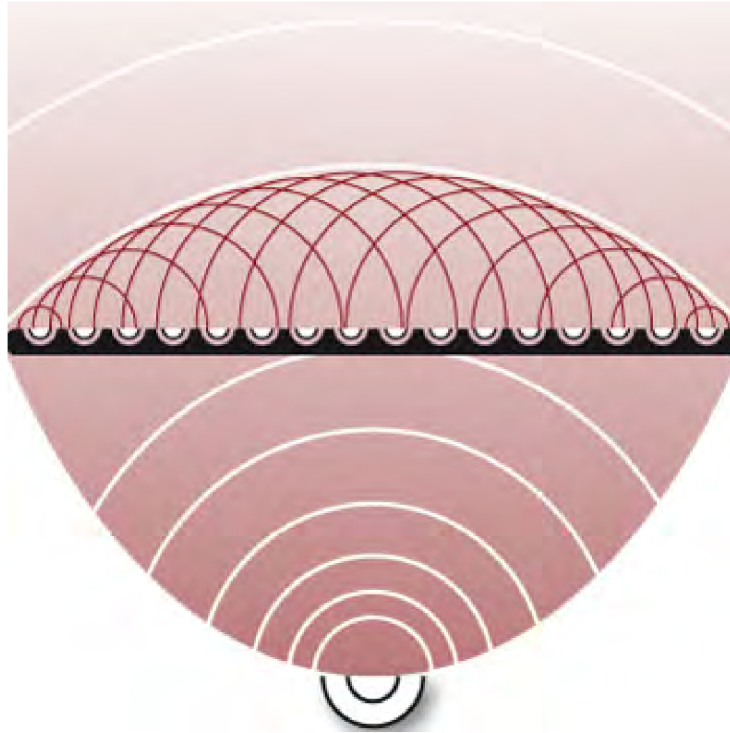
Obr. 2.2: Skutečná realizace aparatury pro wavefield syntézu na univerzitě v Berlíně.[4]

Princip wavefield syntézy spočívá ve využití podstaty Huyghensova principu. Zjednodušeně se dá o Huygensovu principu říci, že každý bod vlnoplochy je zdrojem nového vlnění. To znamená, že virtuální zdroj se dá vytvořit tak, že se nahradí stěna místnosti polem reproduktorů (podobně jako se může nahradit okno televizní obrazovkou). Tato metoda předpokládá velký počet individuálně řízených reproduktorů.[3] Na obrázku výše je vidět praktická realizace wavefield aparatury, zdrojem obrázku je [4].

Podle fyzikální interpretace obsahuje Huygensův princip dvě tvrzení:

- a. Každý bod homogenního a izotropního prostředí, do něhož dospěje vlnění, tj. každý bod čela vlny, je zdrojem sekundární kulové vlny.
- b. Vlnoplocha v okamžiku  $t + \Delta t$  je obálkou sekundárních kulových vln, které vyšly z bodu vlnoplochy v předcházejícím okamžiku  $t$ .

Na obr. 2.3 je nakreslena obecná představa Huygensova principu, obrázek je převzat z [5]



Obr. 2.3: Ilustrace principu wavefield syntézy.[5]

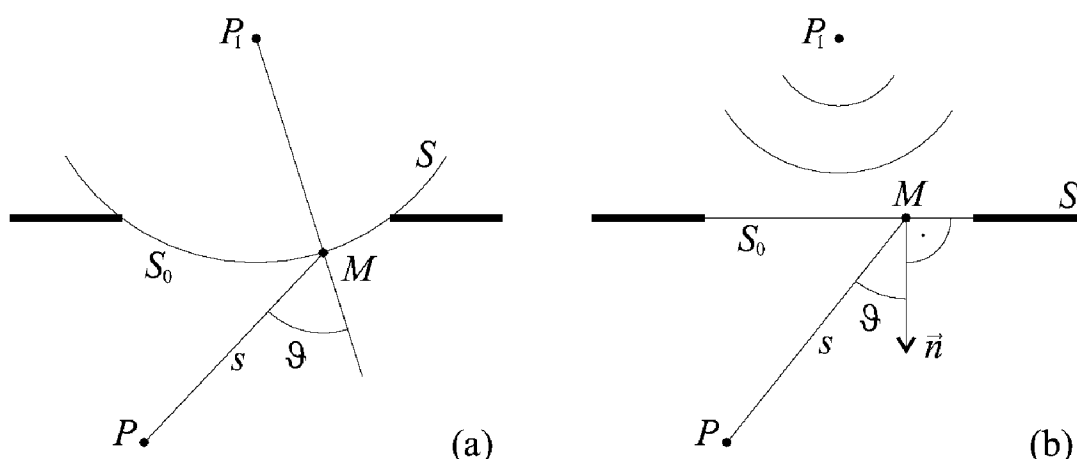
Hlouběji ve fyzikální teorii je uvedeno, že Huygensův princip není zcela přesný a jeho interpretaci upřesňuje Augustin Jean Fresnel, pak jde o Huygensův-Fresnelův princip. Fresnel upřesňuje druhé tvrzení Huygensova principu, kteréžto je patrně nesprávné, jelikož odporuje především jevům pozorovaných při difrakcích a interferencích vln.[6]

Celou věc ozřejmí matematická formulace Huygensova-Fresnelova principu: Necht' všechny zdroje vlnění jsou uvnitř prostorové oblasti  $V$  (konečné nebo nekonečné) vymezené plochou  $S$  a necht' v bodech  $M$  této plochy je známa vlnová funkce  $\psi_0(M)$ . Z každého bodu  $M$  plochy  $S$  vychází do vnější části prostorové oblasti  $V$  sekundární „vlna“

$$\psi(s, \vartheta) = -\frac{i}{\lambda} K(\vartheta) \psi_0(M) \frac{\exp(iks)}{s} = \frac{k}{2\pi} K(\vartheta) \psi_0(M) \frac{\exp\left[i\left(ks - \frac{\pi}{2}\right)\right]}{s}. \quad (2.1)$$

Výraz (2.1) sice nazýváme sekundární vlnou, dokonce sekundární kulovou vlnou, avšak o vlnu ve vlastním smyslu toho slova nemusí vůbec jít. Konkrétní tvar funkce  $K(\vartheta)$  může totiž způsobit, že výraz (2.1) není řešením Helmholtzovy rovnice.[6]

Jednotlivé faktory výrazu (2.1) mají tento význam:



Obr. 2.4: K Huygensovu-Fresnelovu principu ve Fresnelově pojetí (a) a ve tvaru nejčastěji používaném při výpočtech (b).[6]

Kdy symboly v obrázku znamenají následující:[6]

- $s$  je vzdálenost od bodu  $M$
- $\frac{\exp iks}{s}$  je divergentní kulová vlna vycházející z bodu  $M$ .
- $\Psi_0(M)$  je známá hodnota vlnové funkce v bodech  $M$  plochy  $S$ . Říkáme jí též *primární rozruch*. Výraz (2.1) jím vyjadřuje tvrzení, že amplituda sekundárních vln je úměrná primárnímu rozruchu.
- $-\frac{i}{\lambda} = \frac{k}{2\pi} \exp\left(-i\frac{\pi}{2}\right)$  je faktor, který vyjadřuje skutečnost, že sekundární vlny mají amplitudu nepřímo úměrnou vlnové délce a že jejich fáze předbíhá o čtvrt periody fázi primárního rozruchu (nebo se za ní o tři čtvrtiny periody opoždí). Proto se faktoru  $-i = \exp\left(-i\frac{\pi}{2}\right)$  někdy v této souvislosti říká *Fresnelův fázový předstih*.

Při heuristické formulaci Huygensova–Fresnelova principu není původ faktoru  $-\frac{i}{\lambda}$  zřejmý. Fresnel jej zavedl proto, aby dostal správný výsledek pro nerušené šíření vlnění (tj. pro volné šíření za nepřítomnosti jakéhokoli difrakčního stínítka, které by omezovalo nebo nějak modifikovalo dopadající vlnu).

- $K(\vartheta)$  je nejproblematičtějším faktorem výrazu (2.1). Vyjadřuje skutečnost, že amplituda sekundárních „vln“ závisí na směru šíření vln a říká se mu faktor sklonu. Fresnel volil za plochu  $S$  vždy vlnoplochu. Pak úhel  $\vartheta$  byl úhel mezi normálou k vlnoploše v bodě  $M$  a směrem určeným spojnici bodu  $M$  a bodu pozorování  $P$  (viz obr. 2.4(a)) a faktor  $K(\vartheta)$  předpokládal ve tvaru

$$K(\vartheta) = \begin{cases} \cos\vartheta & \text{pro } \vartheta \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \\ 0 & \text{pro } \vartheta \in \left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right). \end{cases} \quad (2.2)$$

Podmínka (2.2) zajišťuje, že sekundární „vlny“ se šíří jen ve směru od zdroje vlnění. Po pravdě řečeno, pro velkou většinu výpočtů není tvar funkce  $K(\vartheta)$  podstatný. V konkrétních aplikacích Fresnel téměř vždy kladl

$$K(\vartheta) = 1. \quad (2.3)$$

Zbývá ještě se zmínit o ploše  $S$ , v jejíchž bodech  $M$  je znám primární rozruch  $\psi_0(M)$ . Z praktických důvodů však není účelné ani možné „volit“ tuto plochu příliš obecně. Fresnel volil za plochu  $S$  vždy vlnoplochu vlnění vycházejícího z bodového nebo čárového zdroje, tedy kulovou nebo válcovou plochu. V současné době se za plochu  $S$  volí rovina určená rovinným difrakčním stínítkem (viz obr. 2.4(b)) a eventuálně uzavřená částí koule o nekonečném poloměru. V případě, kdy plocha  $S$  je rovinou, přestává být Huygensův-Fresnelův princip principem ve vlastním smyslu toho slova, a lze jej považovat za aproximaci difrakčního integrálu získaného matematicky korektním způsobem z vlnové rovnice. Sekundární „vlny“ mají v tomto případě tvar[6]

$$\psi(s, \vartheta) = -\frac{ik}{2\pi} \cos \vartheta \psi_0(M) \frac{\exp(iks)}{s} \left(1 + \frac{i}{ks}\right) \quad (2.4)$$

I zde nejde ovšem o vlny ve vlastním smyslu toho slova, neboť výraz (2.4) není řešením Helmholtzovy rovnice. Je zřejmé, že pro  $s \gg \lambda$ , tj.  $ks \gg 1$ , je výraz (2.1), (2.2), používaný Fresnelem, dobrým přiblížením přesnému výrazu (2.4).[6]

Představme si nyní, že vyšetřujeme difrakci na nějakém difrakčním stínítku a že plocha  $S$  vyplňuje otvory v difrakčním stínítku. Označme  $S_0$  část plochy  $S$ , která není zastíněna nepropustnými částmi difrakčního stínítka (viz obr. 2.4). Podle Fresnela je vlnová funkce v bode  $P$  vně plochy  $S$  dána součtem všech sekundárních vln vycházejících z bodu plochy  $S_0$ , tedy integrálem[6]

$$\psi(P) = -\frac{ik}{2\pi} \iint_{S_0} \psi_0(M) \frac{\exp(iks)}{s} \cos \vartheta dS_0. \quad (2.5)$$

Tento integrál je matematickým zápisem Huygensova-Fresnelova principu. Na integrálu (2.5), tak jak je napsán, je nepříjemné, že se s ním nedá téměř nic analyticky vypočítat. Použijeme-li ho totiž bez různých aproximací integrandu k výpočtu konkrétních difrakčních jevů, shledáme, že integrace nelze provést nebo že příslušný integrál neexistuje. Proto se dělají aproximativní úpravy integrandu. Konkrétně kulová vlna  $\frac{\exp(iks)}{s}$  se aproximuje paraxiální aproximací a  $\cos \vartheta$  se položí roven jedné. Tím se však ještě více setře představa kulových sekundárních vln, která je tolik zdůrazňovaná při recitacích Huygensova-Fresnelova principu. Předcházející text je převzat a upraven, pro použití v této práci, z [6].

V konkrétním případě této práce je uvažováno, že pole reproduktorů vyzařujících do prostoru, bude mít přiveden zdroj signálu individuální pro každý reproduktor. Tento signál bude výsledkem výpočtu vlastností akustické vlny, virtuálního zdroje zvuku, v místě prostoru, kde je umístěn reproduktor, který funguje jako samostatný zářič. Podle obr. 2.3 se dá vyvodit, že pole vedle sebe umístěných reproduktorů vytvoří, dle Huygensova principu, při buzení odpovídajícím signálem akustickou vlnu vycházející jakoby z virtuálního zdroje zvuku.



## 3 Měníče

Měníčem, jinak také reproduktorem, se rozumí zařízení, které mění elektrickou energii na akustickou.[7] Děje se tak ale s velmi malou účinností a velká většina energie se mění v teplo, čili dá se říci, že měniče jsou topná tělesa, kdy vedlejším produktem jejich činnosti je zvuk.[9]

### 3.1 Ideální měnič

Od měniče vyžadujeme vyrovnanou modulovou kmitočtovou charakteristiku, která bude kmitočtově nezávislá. Dále pak ideální (kruhovou) směrovou charakteristiku, konstantní impedanci, především kmitočtově nezávislou, minimální zkreslení (nejlépe nulové), libovolnou velikost výchylky membrány a nakonec již zmiňovanou nectnost a to eliminaci ztrát, čili maximální možnou účinnost a s tím související citlivost.[7]

Všechny tyto parametry se daří více či méně dosahovat. U většiny měničů je vyváženost těchto vlastností dána spíše kompromisem, ať už ve prospěch některého z parametrů, v závislosti na charakteru jeho užití, či jako kompromis mezi pomyslným výkonem a cenou.

### 3.2 Rozdělení měničů

Měníče můžeme řadit do kategorií podle mnoha hledisek. Jako nejzásadnější je dělení podle kmitočtového rozsahu, kdy jsou jednotlivé měniče rozděleny do kategorií, podle schopnosti reprodukovat dané kmitočtové pásmo.

Logicky druhým hlediskem rozdělení je konstrukční provedení měniče. Zde záleží především na mechanismu, který zapříčiňuje, že měnič je schopen reprodukovat zvuk, od toho se odvíjí také optický vzhled měniče.

Jako poslední často poněkud opomíjeným hlediskem je, zda měnič bude fungovat v soustavě pro domácí kino, nebo bude užíván v profesionální soustavě, zde se liší, na první pohled, měniče především údajem o možné výkonové zatížitelnosti, případně charakteristické citlivosti.

#### 3.2.1 Rozdělení podle kmitočtového rozsahu

V této kategorii hraje nejdůležitější roli kmitočet, přesněji tedy signál v kmitočtovém pásmu, který měnič dokáže vyzářit v závislosti na jistých kvalitativních parametrech.

Pokud začneme na začátku kmitočtového pásma, je jako první měnič hlubokotónový. Reprodukuje hluboké tóny, neboli také kmitočty nízké, jejichž rozsah se různí, ovšem jako základ se považuje za hluboké tóny kmitočtové pásmo cca 30 – 1000 Hz. Tyto měniče mají veskrze větší průměr membrány, vyžadují větší objem ozvučnice, mají také větší možnou výchylku.[7]

Při posunu po ose kmitočtu se dostaneme k měničům středotónovým, jejichž úkolem je kvalitně reprodukovat pásmo kmitočtů cca 500 – 4000 Hz. Kvalita těchto měničů bývá stěžejní při konstrukci vícepásmových reproduktorových soustav, plyne to ze závislosti citlivosti lidského sluchu na kmitočtu. Lidské ucho je nejcitlivější okolo kmitočtu 3500 Hz.

Zde je právě potřeba, aby měnič měl co možná nejrovnější kmitočtovou charakteristiku a nedosahoval přílišné směrovosti.[7]

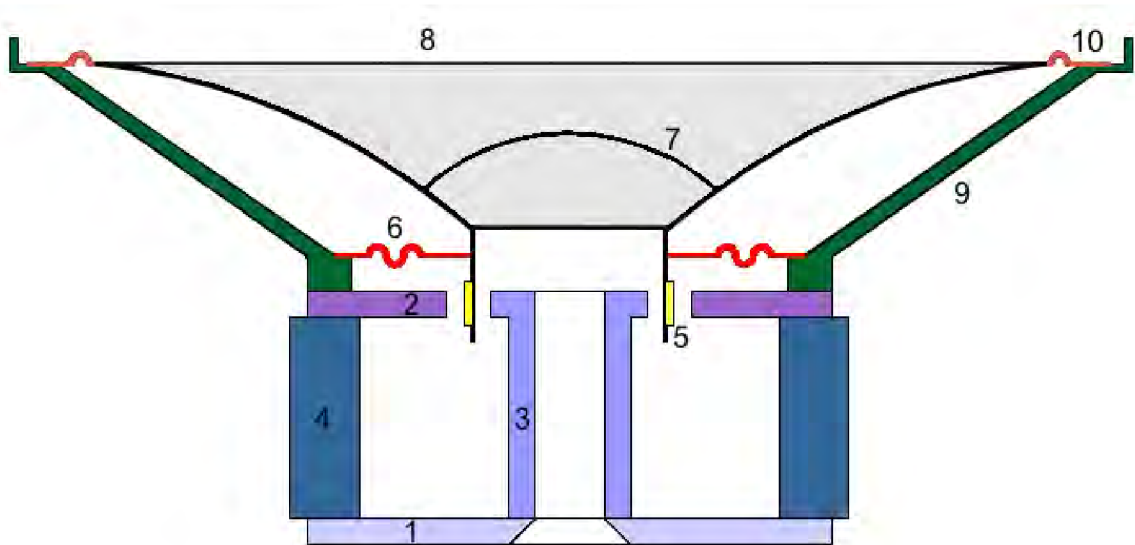
Na úplném vrcholu akustického kmitočtového pásma jsou měniče vysokotónové, jejich kmitočtová pracovní oblast je vymezena od 3000 Hz do konce slyšitelných kmitočtů, což je okolo 20000 Hz. Tato hranice není striktně dána, jelikož každý člověk má tuto hranici posunutou, ať už podle věku, či podle opotřebení sluchového orgánu, například vlivem pobytu v hlučném prostředí. U vysokotónových měničů je také k vidění nejširší paleta konstrukčních provedení.[7]

Za zvláštní typ by se dal považovat širokopásmový měnič, jehož hlavní vlastností je schopnost přenést a s rozumnými parametry reprodukovat celé akustické pásmo. Technologií, jak takový měnič vyrobit je hned několik, dají se konstruovat jako běžné měniče, bez jakýchkoliv přídavných částí. Existují také v provedení s difuzorem, kdy difuzor v provedení podobnému kalíšku je umístěn na stejném kmitacím mechanismu jako hlavní membrána a zvyšuje horní mezní kmitočet měniče. Někteří výrobci konstruují tento kalíšek z kovu, který lépe odvádí teplo vzniklé v kmitací cívce měniče. Další typy jsou realizovány jako koaxiální měniče, kdy jsou dva měniče umístěny v jedné ose. Tyto měniče mají vynikající směrové charakteristiky, jelikož zvuk vychází ve své podstatě z jednoho bodu.[7]

### **3.2.2 Rozdělení podle principu činnosti a konstrukčního řešení**

#### **Elektrodynamický systém**

Nejrozšířenějším konstrukčním řešením je elektrodynamický měnič. Membrána takového měniče má tvar pláště komolého kužele, je pružně zavěšena do rámu měniče, který se nazývá koš. Pístový pohyb membrány způsobuje zředování a zhušťování vzduchu čímž vzniká zvuková vlna. Funkce elektrodynamického měniče je založena na principu silového působení na vodič s protékajícím proudem umístěným v magnetickém poli.[7] Více je viditelné na obr. 3.1



**1 – Spodní deska, 2 – Horní deska, 3 – Pólový nástavec, 4 – Magnet, 5 – Kmitačka s vinutím, 6 – Středící membrána, 7 – Vrchlík (prachovka), 8 – Membrána, 9 – Koš, 10 – Závěs membrány**

Obr. 3.1: Konstrukce elektrodynamického měniče.[8]

Membrána takového měniče by měla být maximálně tuhá a zároveň mít minimální hmotnost. Pokud nebude membrána maximálně tuhá, bude jistým způsobem deformována a na jejím povrchu bude vznikat nežádoucí vlnění, jehož hlavním produktem bude subharmonické zkreslení, jinými slovy sníží se kvalita reprodukováného zvuku, ve smyslu věrohodnosti zvukové reprodukce. Proto se používají k výrobě materiály, které vyhovují zmíněným parametrům. Je jich k dispozici velké množství. Za zmínku stojí především papír, jelikož je zastoupen u měničů v převážné většině. Dalším již zajímavějším materiálem je hliník, kdy je membrána vyrobena celá jako jeden kus hliníku, nebo je jiný materiál, který tvoří jádro membrány, potažen vrstvou hliníku. Zcela nejlepší membrány jsou však vyrobeny různým způsobem z uhlíkových vláken, jsou lehké a extrémně tuhé, ovšem jsou také poměrně drahé, což je hlavní překážkou pro jejich masové rozšíření.[7]

Aby mohla membrána vykonávat pístový pohyb, je třeba, aby byla uchycena pružným způsobem ke zbytku systému, přesněji ke koši měniče. K tomu slouží dva závěsné systémy. Oba dva udržují membránu uprostřed kmitacího systému, aby nedošlo ke kontaktu s pólovým nástavcem nebo horní deskou. Tyto pružné elementy mohou být vyrobeny opět z různých materiálů. Častým materiálem pro výrobu je guma, papír a vhodně upravené textilie. Závěs jako takový udává v podstatě životnost membrány.[7]

Kostrou celého měniče je koš, čili většinou kovový rám, do kterého se montují ostatní součásti. Na první pohled se zdá, že je to, ve vztahu ke kvalitě reproduktoru, nepodstatná část, ale opak je pravdou. Výrobci profesionálních reproduktorů přišli na to, jak je důležitá tuhost koše. Při pohybu membrány, ale i stárnutí měniče, dochází k nemalému pnutí a tím i deformacím koše, i všeho co je umístěno uvnitř. Jako materiál pro výrobu může být ocelový plech, který je masovou záležitostí a také nijak nevzniká svými vlastnostmi. Lepší to již je

s hliníkovým košem, kdy hliník je velmi tuhý a zároveň lehký. Spíše okrajově a výjimečně se používá plast.[7]

Aby mohl celý výše zmíněný systém pracovat je třeba hnací motor, který způsobí pístový pohyb membrány. Je jím soustava magnetický obvod a kmitací cívka. Magnetický obvod samotný bývá vyroben zpravidla z více částí, magnet, pólové nástavce, horní a dolní deska a občas chladicí otvor. Magnet samotný je magneticky tvrdý ferit, na nějž jsou připojeny naopak magneticky měkké pólové nástavce, jejichž úkolem je soustřeďovat magnetickou energii do pracovní mezery, ve které se pohybuje kmitací cívka. Ta je navinuta na kostře z hliníku, opět však není jediným materiálem pro výrobu kostry cívky. Motorická síla, kterou bude soustava cívky a magnetu pracovat je vyjádřena  $Bl$  konstantou, neboli součinem magnetické indukce  $B$  a délky navinutého vodiče  $l$ . Bude-li alespoň jedno z toho větší, i charakteristická citlivost měniče bude větší. Kmitací cívka neudává pouze motorické vlastnosti měniče, ale má i podstatný vliv na kmitočtovou charakteristiku. Všeobecně technologie výroby kmitací cívky je považována za vůbec nejsložitější z celého měniče.[7]

### **Elektrostatický systém**

Zatímco u elektromagnetického systému byla síla generována samotným principem silového působení na vodič protékaný proudem v magnetickém poli, tak u elektrostatického systému je síla generovaná jako silové působení dvou elektrod o vzdálenosti  $d$  a ploše  $S$ . [7]

Elektrostatický systém patří mezi kvalitnější motorické síly, protože výsledné měniče mají nízké zkreslení, plochou kmitočtovou charakteristiku a dokonce i málo kmitočtově závislou vstupní impedanci.[7]

Elektrostatické měniče jsou vhodné hlavně jako vysokotónové, proto je bezpředmětné se jimi více zabývat v této práci.

### **Piezoelektrický systém**

Piezoelektrické měniče nemají magnet nebo kmitací cívku, pracují na principu piezoelektrického jevu, kdy na piezoelektrický krystal přivedeme napětí a ten se jeho vlivem mechanicky zdeformuje. Opět tyto měniče mají využití pouze jako vysokotónové, je tedy zbytečné jejich popis dále rozvíjet.

## **3.2.3 Rozdělení podle aplikace**

Do tohoto dělení zapadají všechny z předešlých měničů. Hlavním kritériem dělení je otázka, kde budou měniče fungovat.

Běžnému člověku je nejdostupnější kategorie Hi-Fi měničů. Od nich požadujeme především co nejmenší zkreslení, malou směrovost a co nejrovnější kmitočtovou charakteristiku.[7]

Naopak od měničů pro profesionální aplikace žádáme směrovost, velký příkon, velkou citlivost, velkou životnost. Jsou to měniče užité v soustavách pro ozvučování koncertů a různých typů exteriérových produkcí.[7]

Jako poslední kategorii, relativně speciálních měničů, je možné chápat měniče pro ozvučení automobilů, měniče pro ozvučení velkých prostorů (např. nádražních prostor)

nebo měniče pro skutečně speciální záležitosti typu podvodní ozvučení či výbušné prostředí.[7]

### 3.3 Parametry měničů

Parametry měniče dělíme na mechanické (rozměry, hmotnost), všeobecné (maximální standardizovaný příkon, citlivost, jmenovitá impedance, kmitočtový rozsah), Thiele – Small (TS) parametry, které popisují měnič jako mechanicko – elektrickou soustavu (činitele jakosti, rezonanční kmitočet, poddajnost), a grafické, což jsou především kmitočtové a směrové charakteristiky.[7]

Většina výrobců udává všechny tyto parametry v katalogovém listu měniče. Zmíním zde jen pár nejdůležitějších a skutečně základních parametrů, jelikož je tato problematika značně obsáhlá, nemá smysl v této práci parametry měničů rozebírat. Vše je možné nalézt v literatuře [7] a případně [9].

Asi úplně základními parametry jsou příkon měniče, který je schopen vydržet bez trvalého poškození a jmenovitá impedance, která určuje fungování měniče s adekvátním zesilovačem. Dalšími parametry jsou rezonanční kmitočet, činitele jakosti, ekvivalentní objem, poddajnost, stejnosměrný odpor kmitací cívky, indukčnost cívky a další parametry potřebné již jen pro návrh reproduktorové soustavy. V této chvíli bych opět odkázal na literaturu [7] případně [9], kde jsou tyto parametry velmi dobře a velmi podrobně popsány.

## 4 Ozvučnice

Měnič z principu své konstrukce vyzařuje nejenom směrem k posluchači, ale také směrem přesně opačným, čili o  $180^\circ$  otočeným, od posluchače. Tato vlastnost je nevýhodná, proto se jí snažíme omezit. Jsou však i výjimky, kdy této skutečnosti využíváme. K realizaci obou zmíněných faktů využíváme právě reproduktorové skříně, všeobecněji ozvučnice.

Ozvučnice jako taková má hlavní vliv na množství basů, které daný měnič dokáže vyzářit. Její hlavní účel je ten, že slouží k oddělení přední a zadní zvukové vlny z reproduktoru, neboli k zamezení jevu zvaného *akustický zkrat*, kdy přední a zadní vlna se na jistých kmitočtech vzájemně vyruší.[7]

Sekundárním účelem ozvučnice je ochrana basového reproduktoru, kdy chrání kmitací systém před mechanickým poškozením. To znamená, přesněji před přílišnou výchylkou kmitací cívky, tak aby se nedostala ven z magnetického obvodu, nebo naopak aby nenarazila do spodní desky magnetického obvodu. Prakticky to znamená, že ozvučnice se navrhuje především pro basový reproduktor.[7]

Typů ozvučnic existuje poměrně mnoho, ovšem zabývat se všemi typy a jejich modifikacemi přesahuje účelnost této práce. Dále proto popíšeme pouze ozvučnici ideální, kteroužto je rovinná nekonečná deska, ozvučnici uzavřenou a ozvučnici typu bassreflex.

### 4.1 Ozvučnice rovinná deska

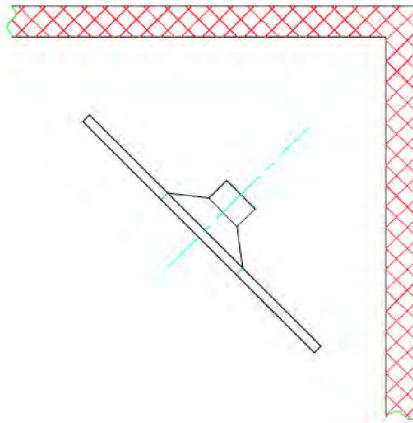
Jedná se o nejjednodušší provedení ozvučnice, teoreticky ji uvažujeme jako nekonečnou (ideální), přesněji nekonečné jsou její rozměry. V praxi je to samozřejmě nemožné, proto se používá ozvučnice s konečnými rozměry a tudíž bude správně fungovat až od určitého kmitočtu.[7] Adekvátní rozměr je možno spočítat podle (4.1), který je převzat z [7]. V tomto vztahu je  $a$  rozměr desky v metrech a  $f_s$  rezonanční kmitočet měniče.

$$a \cong \frac{120}{f_s}. \quad (4.1)$$

Dále z [7] je převzat vztah pro dolní mezní kmitočet  $f_m$  s rozměrem  $a$  a rezonančním kmitočtem reproduktoru  $f_s$ .

$$f_m \cong \frac{170}{a}. \quad (4.2)$$

Na obr. 4.1, který je převzat z [10], je vidět ozvučnice rovinná deska s konečnými rozměry s osazeným měničem. Celá soustava je schematicky znázorněna jakoby v rohu místnosti.



Obr. 4.1: Schematické znázornění ozvučnice rovinná deska.[10]

Rozšířením ozvučnice rovinná deska je ozvučnice otevřená, což je záležitost převážně kytarových komb.

## 4.2 Uzavřená ozvučnice

U této koncepce se jedná o hermeticky uzavřenou skříň daného objemu. Je zřejmé, že pokud do takovéto skříně bude zabudován měnič, bude splněn základní požadavek na ozvučnici, a to zamezení akustického zkratu.[7]

Z širší teorie, která je rozvedena v literatuře [7] a [9], vyplývá následující popis vlastností, které se změní u reproduktoru, pokud jej vestavíme do uzavřené ozvučnice.

Nejzásadnější změna nastane u rezonančního kmitočtu měniče, který se zvýší v jisté závislosti na objemu ozvučnice, jak je postřehnutelné ze (4.3), který je převzat z [7].

$$\frac{f_c}{f_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}, \quad (4.3)$$

kde  $f_s$  je rezonanční kmitočet měniče,  $f_c$  rezonanční kmitočet měniče zabudovaného do ozvučnice,  $V_{as}$  ekvivalentní objem udávaný výrobcem měniče a  $V_b$  je objem ozvučnice. V důsledku to znamená, že pokud bude měnič zabudován do ozvučnice menšího objemu než je zapotřebí, budou jeho schopnosti reprodukce nízkých kmitočtů podstatně omezeny.[7]

Dalším parametrem, který bude montáží měniče ovlivněn, je činitel jakosti  $Q_{ts}$ . Ten se po zabudování měniče do ozvučnice také zvýší, obdobně jako rezonanční kmitočet. To má vliv na kmitočtovou charakteristiku reproduktorové soustavy.

Podrobnější rozbor tématiky, včetně postupu návrhu bez použití simulačního programu, je možno nalézt v [7].

## 4.3 Ozvučnice typu bassreflex

Jedná se o konstrukčně o řešení, které je mezičlánkem zcela uzavřené ozvučnice a otevřené ozvučnice. Bassreflexová ozvučnice má, jednoduše řečeno, někde ve stěně bassreflexové nátrubek, který je ve své podstatě Helmholtzovým rezonátorem.[7] Podstatným

parametrem je v tomto případě vhodnost měniče pro montáž do takovéto ozvučnice. Lehce se to dá zjistit ze vztahu převzatého z [7].

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}}, \quad (4.4)$$

kde *EBP* (Efficiency Bandwidth Product), je činitel stanoven pro tento účel,  $f_s$  je rezonanční kmitočet měniče a  $Q_{es}$  je činitel jakosti uvedený výrobcem měniče v jeho katalogovém listu.[7] Pokud bude *EBP* větší jak hodnota 50, je tento měnič vhodný do soustavy s uzavřenou ozvučnicí, pokud je větší jak 50 tak zcela jistě můžeme použít ozvučnici typu bassreflex.

Hlavní důvod pro užití bassreflexové ozvučnice se odvíjí od požadavků na reproduktorovou soustavu. Konkrétně v této práci jsem ji použil kvůli snížení dolního mezního kmitočtu.

Podrobnější teorii, včetně výpočtů a možností návrhu, je možno nalézt opět v [7]. Zde jsem použil metodu návrhu opět pomocí simulačního programu, který uvažuje při výpočtu i proudění vzduchu v bassreflexovém nátrubku, což je pro manuální výpočet již značně složité.



## 5 Konstrukční řešení

### 5.1 Výběr reproduktoru

Vzhledem ke specifickým parametrům reproduktorové skříně, byl výběr měniče, poněkud náročnější, než je tomu při konstrukci běžné reproduktorové skříně. A pokud domyslíme důsledky užití, hlavně tedy potřebu mnoha takovýchto měničů, je výběr již značně obtížný. Roli hraje po technických parametrech především dostupnost měniče u prodejce a jeho cena.

Hlavním technickým požadavkem na měnič je schopnost reprodukovat celé akustické pásmo, neboli je třeba vybírat reproduktor širokopásmový. Dalším, ovšem neméně podstatným parametrem jsou rozměry měniče, konkrétně jeho průměr, který musí mít takovou velikost, aby bylo možné jej zabudovat do ozvučnice s maximální šířkou 15 cm. Proč je tomu tak, je popsáno níže v kapitole o návrhu ozvučnice.

Při výběru jsem vyloučil měniče s vysokotónovým difuzorem, stejně tak různé typy koaxiálně konstruovaných měničů.

Jako první bych, spíše pro zajímavost, uvedl měnič CSS FR125SR od firmy Creative Sound Solutions, který svými parametry je vskutku velmi vysoko na pomyslném žebříčku širokopásmových reproduktorů, ne-li na úplném vrcholu. Navíc jeho parametry jsou jako na míru stvořené pro plnění funkce měniče v jednopásmové soustavě pro wavefield syntézu, především rozměry a vyrovnaná kmitočtová charakteristika. Avšak proti jeho užití hovoří především finanční stránka věci, jelikož podle mnou získaných informací je jeho současná cena v přepočtu z dolaru asi 900 Kč bez započtených nákladů na dopravu. Měnič je dostupný pouze ze zahraničí. Katalogový list a bližší popis je k dispozici na stránkách výrobce viz. [11]. Katalogový list je také v příloze 2.



Obr. 5.1: Měnič Creative Sound Solutions FR125SR.[11]

Jako v pořadí druhá varianta, z pohledu vhodnosti, je měnič od japonské firmy FOSTEX, která má ve své nabídce celé portfolio širokopásmových měničů. Konkrétní typ je tedy FE103E, který má opět velmi vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku a ideální rozměry. Proti hovoří tentokrát špatná dostupnost, kdy i přes zastoupení firmy FOSTEX v České republice není samotné měniče možné koupit jinde než v zahraničí. Cenově se pohybují v příznivějších relacích, konkrétně 500 Kč. Katalogový list a informace týkající se tohoto měniče jsou dostupné na [12]. Katalogový list je také v příloze 3.



Obr. 5.2: Měnič FOSTEX FE103E.[12]

Dalším výrobcem uvažovaným při výběru je firma VISATON. Nabídka měničů je v tomto případě vskutku velmi pestrá. Jako pozitivum lze nyní brát relativně dobrou dostupnost a nabídku modelů, a to i u tuzemských prodejců. Cena není také nijak vysoká. Vybral jsem zde širokopásmový Hi-Fi reproduktor FRS 8 v provedení 8 ohm. Z pohledu technické stránky je to kompromisní řešení mezi všemi uvedenými požadavky. Tento měnič jsem zvolil jako vhodný pro realizaci mé práce. Kmitočtová charakteristika je vyrovnaná na celém rozsahu, jako malé negativum je možné vidět rozměry měniče, kde například průměr membrány je přibližně 6 cm. Je patrné, že měnič by mohl být větší. Katalogový list je uveden v příloze 1.



Obr. 5.3: Měníč VISATON FRS 8.[13]

Posledním výrobcem, který byl brán na zřetel je tuzemská firma TVM z Valašského Meziříčí. Má opět širokou nabídku měničů, avšak ve většině spíše levnějšího a méně kvalitního charakteru. V úvahu by připadal měnič ARX-130-20/4. Jeho kmitočtová charakteristika je, v porovnání s dříve uvedenými měniči více zvlněná, dosahuje jistého propadu v oblasti středních kmitočtů a naopak zvýraznění u kmitočtů v oblasti okolo 10 kHz. Jeho volba by byla tedy opět jakýmsi kompromisem. Rozměry měniče jsou ideální. Důvod proč jsem jej nevybral je právě nevyrovnaná charakteristika. Katalogový list a informace o tomto měniči na [14]. Katalogový list je také samostatně obsažen v příloze 4 a příloze 5.

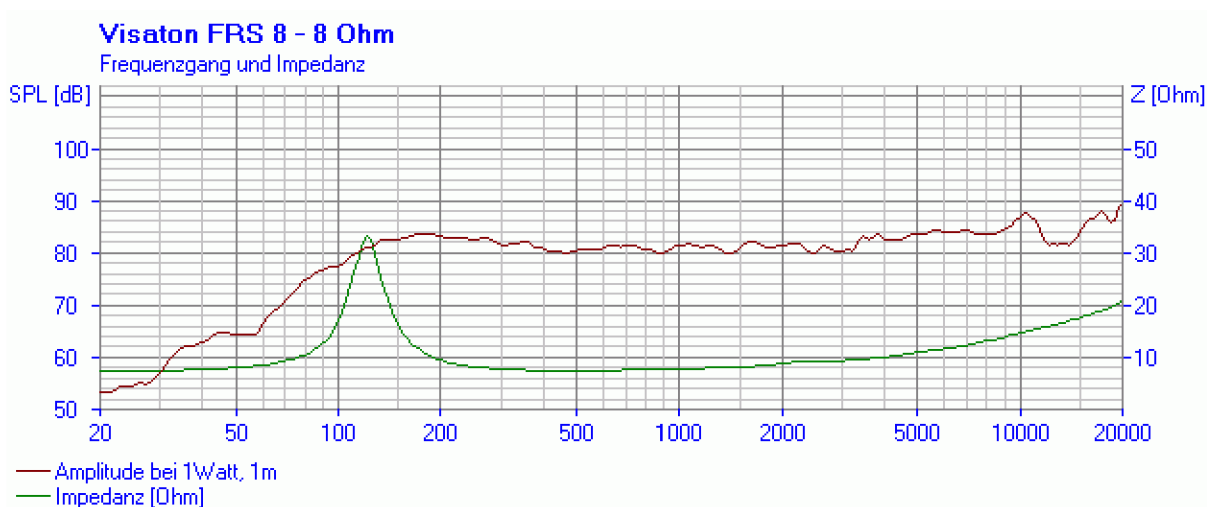


Obr. 5.4: Měníč TVM ARX-130-20/4.[14]

## 5.2 Popis měniče Visaton FRS 8

Jak je nastíněno výše, jedná se o elektrodynamický Hi-Fi reproduktor, který dokáže reprodukovat téměř celé pásmo slyšitelných kmitočtů s přijatelným zkreslením. Dle údajů od výrobce je jeho kmitočtový rozsah 100 - 20000 Hz, kdy na 200 – 20000 Hz je kmitočtová

charakteristika přibližně lineární. Rezonanční kmitočet měniče udávaný výrobcem je 120 Hz. Další parametry důležité pro návrh ozvučnice jsou uvedeny v příloze 1.



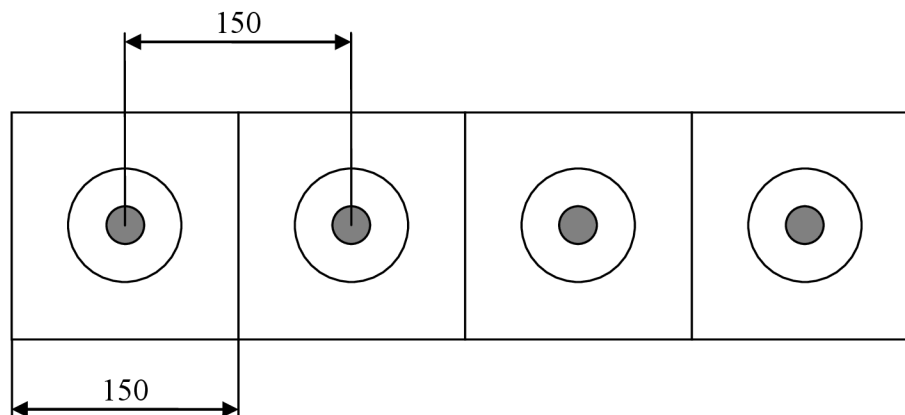
Obr. 5.5: Kmitočtová a modulová amplitudová charakteristika měniče Visaton FRS 8.[15]

Dle popisu výrobce je měnič vhodný do surround efektových reproduktorů a mini hi-fi systémů.

### 5.3 Návrh ozvučnice

Jak je uvedeno v zadání, ozvučnice nesmí svou šířkou přesáhnout 15 cm. Tento rozměr je dán kritériem vyplývajícím z vlastností wavefield syntézy, kdy vzdálenost mezi středy reproduktorů, umístěných vedle sebe, nesmí přesáhnout 15 cm. Pochopitelným předpokladem je umístění měniče uprostřed ozvučnice. Přesněji, alespoň co se horizontální polohy týče. Na obrázku jsou vyznačeny čtyři samostatné ozvučnice osazené měniči a rozměry důležité pro korektní návrh z hlediska wavefield syntézy.

Jako materiál pro výrobu ozvučnice bych patrně volil MDF desky, vzhledem k jeho kvalitním parametrům. MDF desky vynikají výbornou tuhostí v kombinaci s nízkou cenou a hmotností, kterážto je adekvátní k požadavku na vysokou mobilitu. MDF deska vykazuje hustotu 300 - 900 kg/m<sup>3</sup> a její struktura umožňuje vysokou kvalitu zpracování například i frézováním.



Obr. 5.6: Rozměry ozvučnice pro wavefield syntézu.

Zbývající rozměry jsou určeny především v závislosti na simulacích návrhu ozvučnice, dále pak také v rámci jakéhosi estetického cítění a požadavků na mobilitu.

Prvotně jsem uvažoval pouze koncepci s uzavřenou ozvučnicí, avšak následně po ladění parametrů bassreflexové ozvučnice se i tato koncepce zdá být výhodnou.

### 5.3.1 Koncepce uzavřená ozvučnice

Při simulacích jsem vycházel z maximálního rozměru šířky, který je možno použít pro ozvučnici, a zbývající parametry volil tak, aby byla kmitočtová charakteristika co nejpříznivější.

Nakonec vyplynuly následující rozměry: 15x18x18 cm (Š x V x H), což odpovídá přibližnému objemu 3,8 litru při 12 mm tloušťky stěny. Konečná jednoduchá simulace ukázala zvýšení citlivosti okolo kmitočtu 180 Hz, jak je viditelné na obr. 5.7.



Obr. 5.7: Kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice bez vlivu difrakcí.

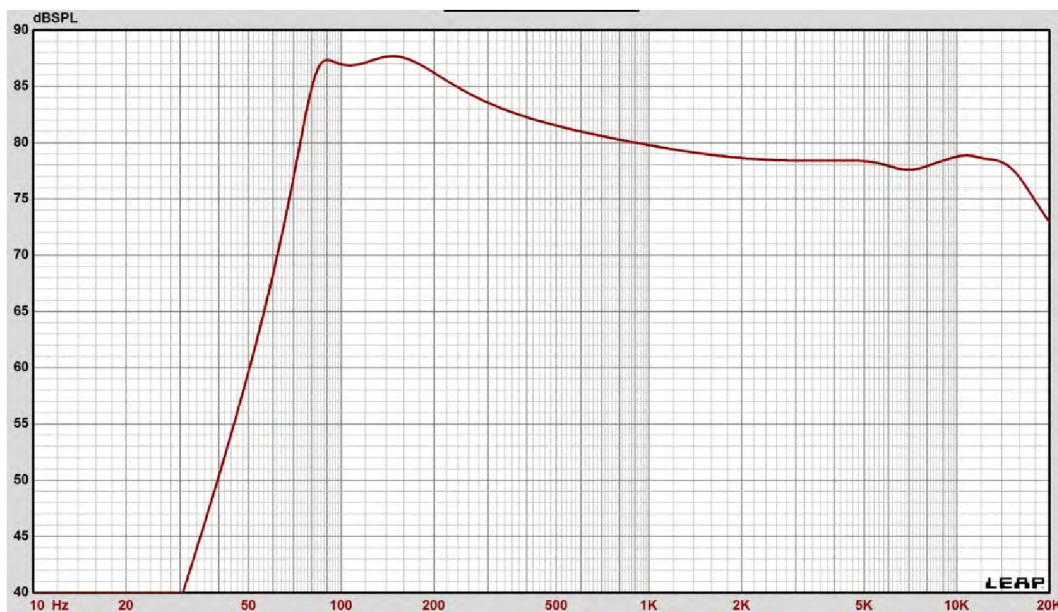
To však jen do doby, kdy jsem používal nastavení pouze jednoduchého výpočtu, jakmile jsem doplnil údaje o uvažování difrakcí, tak se charakteristika podstatně změnila (obr. 5.8).



Obr. 5.8: Kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice s vlivem difrakcí.

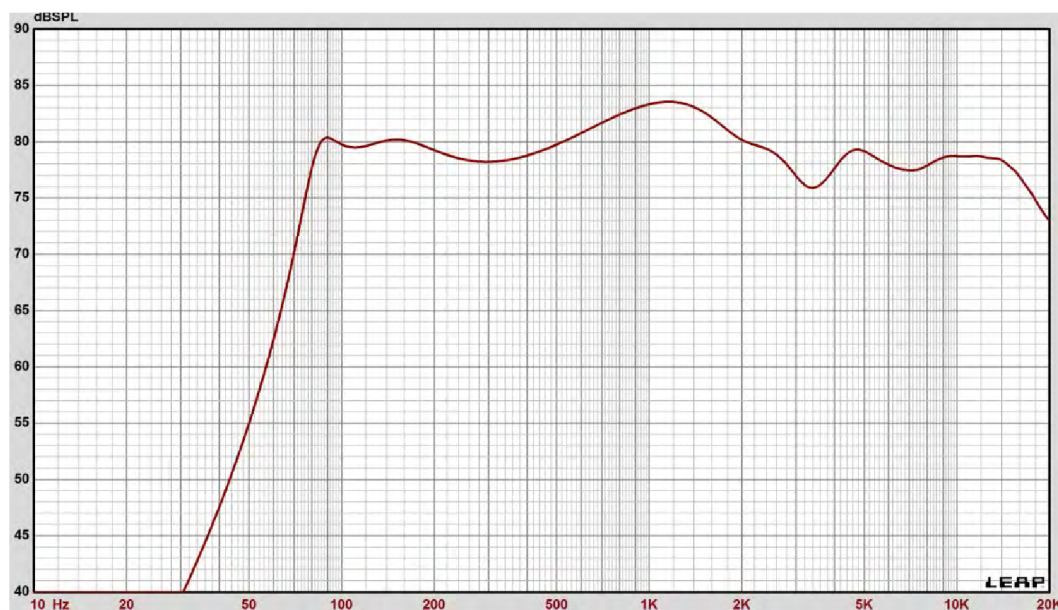
### 5.3.2 Koncepce bassreflexové ozvučnice

Původně tato koncepce nebyla vůbec zamýšlena jako vhodná pro realizaci. Především, kvůli nerovnostem na charakteristice, které jsou způsobené vlastnostmi ozvučnice typu bassreflex. Což pochopitelně potvrdila simulovaná charakteristika (obr. 5.9). V této fázi návrhu je stále ještě uvažován obecný bassreflexový nátrubek, kdy je důležitý jen jeho rezonanční kmitočet, pro účely simulace volený na 80 Hz. Ke konkrétním rozměrům se dospěje až během realizace návrhu, v závislosti na dostupných bassreflexových nátrubicích.



Obr. 5.9: Kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice bez vlivu difrakcí.

Je z ní patrné velké zvýšení na kmitočtu okolo 100 Hz. To se změnilo, jakmile jsem v simulaci opět použil uvažování difrakcí, charakteristika se oproti očekávání spíše vyrovnala, nežli nesla známky ještě mohutnějších nerovností viz. obr. 5.10.



Obr. 5.10: Kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice s vlivem difrakcí.

Oproti charakteristice uzavřené ozvučnice je viditelný posun reprodukovatelných kmitočtů směrem k basové sekci, což je hlavní důvod, proč jsem přistoupil i k návrhu bassreflexové ozvučnice. Rozměry ozvučnice korespondují s předchozí koncepcí.

Uvedené obrázky jsou uvedeny také v příloze spolu s vypočtenými směrovými charakteristikami.

## 5.4 Návrh zesilovače

Při návrhu jsem vycházel z požadavků na celou soustavu. Vzhledem k tomu, že soustava má být aktivní a jednoduše přenosná, tak zesilovač musí mít co možná nejmenší rozměry a měl by mít minimální nároky na chlazení. Nepřítomnost chladiče a minimum součástek je také dobrým ekonomickým důvodem. Takovýto zesilovačů bude v budoucnosti potřeba stejný počet jako reproduktorových soustav.

Dalším požadavkem je, aby zesilovač měl možnost připojení jak symetrického zdroje signálu, tak i nesymetrického zdroje signálu, nejlépe bez jakékoliv nutnosti přepínání či zásahu uživatele na straně vstupů zesilovače. Čili by měl automaticky rozpoznat typ připojeného zdroje signálu.

Jako další, pro praktické využití podstatný požadavek, je možnost přepínat jednoduchou formou zesílení zesilovače tak, aby se dokázal adaptovat na vstupní úroveň signálu rovnu  $-10$  dBu či  $+4$  dBu.

Z postupné cesty návrhu je zřejmý výkon zesilovače, který jsem stanovil na 30 W. Tento požadavek není nijak náročným parametrem a lze jej dosáhnout pomocí většiny běžných monolitických zesilovačů. Vzhledem k výkonové zatížitelnosti měniče (Rated Power = 30 W) je zde uvažováno i s dostatečnou rezervou tak, aby nedošlo k poškození měniče vlivem příliš výkonného zesilovače.

Pro výše popsané funkce se výborně hodí integrovaný zesilovač TPA 3106 od firmy Texas Instruments. Zesilovač existuje v provedení SMD. Zesilovač pracuje ve třídě D. Zesilovače třídy D již nejsou lineárními zesilovači, protože používají techniku pulzně-šířkové modulace. Pro tyto zesilovače se vžilo označení digitální. Největší výhodou této konstrukce je vysoká účinnost, až 80% (zesilovače třídy B mají účinnost menší než 50% a s třídou A je to ještě horší). Vysoká účinnost vyplývá z principu činnosti výkonových tranzistorů zesilovače. Tyto jsou totiž buď plně sepnuty, nebo úplně vypnuty. Z toho vyplývá ale i nevýhoda - větší zkreslení, než mají zesilovače tříd A a AB.[16] Toto zkreslení se však, u nových typů integrovaných zesilovačů ve třídě D daří poměrně dobře potlačit a dosahuje v zásadě několik setin až desetin procenta THD+N (Total Harmonic Distortion plus Noise). Navíc některé typy, dokonce dnes už i výkonových integrovaných zesilovačů ve třídě D, nepotřebují ke své funkci žádné chlazení v podobě hliníkový profilů a žebrování. Tato skutečnost z nich činí ideální kandidáty na použití jak pro účely v této práci, tak jako vhodné zesilovače do přenosných zařízení. Jejich výkon se v provedení SMD bez chladiče může pohybovat až okolo 30 W při zkreslení několika desetin procenta THD+N.

Výkon zesilovače TPA 3106 je výrobcem udáváný na 40 W, ovšem zde již se pohybuje zkreslení THD+N na úrovni 10%. To však ničemu nevádí, jelikož zesilovač v této oblasti nebude pracovat a pokud se od ní dostane, vlivem překročení vstupní úrovně signálu, tak nebude přetěžován, ale pouze začne zkreslovat signál na výstupu. Vstupy je možno použít přímo jako symetrické vstupy analogového signálu. Na výstup je třeba zařadit filtrační článek, který zamezí průniku rušení plynoucího z principu zesilovačů třídy D. Účinnost zesilovače je až 92%. Obvodové řešení a doporučené zapojení je uvedeno v katalogovém listu [17] včetně adekvátních součástek a jejich výpočtů v případě potřeby upravit doporučené schéma zapojení. V katalogovém listu výrobce také uvádí hodnoty součástek výstupního filtru pro jednotlivé jmenovité impedance měničů. Na stránkách výrobce je možné také najít



doporučení pro návrh desky plošného spoje, či přímo stáhnout šablonu plošného spoje pro tento zesilovač. Návrh desky plošného spoje je obsahem přílohy 7.

## 5.5 Návrh zdroje

Zdroj jsem navrhoval opět jako co nejmenší a zároveň s minimálními nároky na chlazení. Zdroj není potřeba konstruovat jako symetrický, jelikož použitý zesilovač TPA 3106 nepotřebuje symetrické napájení, což snižuje složitost konstrukce i finanční stránku věci.

Absolutní maximum napětí na vstupu napájení zesilovače je 30 V. Z doporučených hodnot však plyne, že aplikační maximum je 26 V. Proto volím výstupní napájecí napětí právě oněch 26 V. Výkon zdroje je uvažován pro spolehlivé napájení 4 kompletních aktivních reproduktorových soustav popsaných výše. Avšak to by platilo pouze pro případ trvalého vybuzení všech soustav harmonickým signálem a na plný výkon. Pokud bude tedy uvažován signál reálný hudební, vystačí jeden takovýto zdroj pro napájení i osmi takovýchto reproduktorových soustav. Zdroj je sestaven z více modulů, to znamená, že neobsahuje pouze jeden plošný spoj. Celý zdroj je umístěn do krabice pro napájecí zdroje typ KM 68 (obr. 5.11).



Obr. 5.11: Krabice pro napájecí zdroje typ KM 68.[18]

### 5.5.1 Transformátor

Transformátor je toroidní. Jeho primární napětí je 230 V/50 Hz. Výkon je volen co možná největší běžně dostupný, a to 100 VA, v závislosti na rozměrovém omezení, které jsem stanovil na maximální vnější průměr transformátoru 100 mm. Ve skutečnosti má transformátor průměr 97 mm. Výstupní napětí je střídavých 24 V. Na primárním vinutí je transformátor jištěn pomalou trubičkovou pojistkou o hodnotě 1 A. Sekundární udaný proud je 4,16 A.

### 5.5.2 Usměrňovač

Usměrňovač je integrovaný můstkový, značně předimenzovaný, tak aby nedošlo k jeho poškození různými špičkami napětí v síti, nebo vysokými nabíjecími proudy filtračních kondenzátorů. Výběr takovéto usměrňovače je jednoduchý, k vybrání adekvátního usměrňovače stačí pohled na jeho hodnoty maximálního závěrného napětí a protékajícího proudu. Ty jsou v tomto případě 1000 V a 25 A. Kapacita filtračních kondenzátorů vychází ze

vztahu, který je převzat z [19]. Kde  $C$  je hodnota filtrační kapacity,  $I_m$  je maximální odebíraný proud,  $f$  je kmitočet,  $U_M$  je maximální napětí na výstupu a  $U_X$  je napětí pod které nesmí výstupní napětí klesnout.

$$C = \frac{I_M}{[2 \cdot f \cdot (U_M - U_X)]} \quad (5.1)$$

Použitá hodnota filtrační kapacity nemusí být přesně ta, která byla vypočtena. Vzhledem k tomu, že se jedná o zdroj se stabilizací výstupního napětí elektronickým stabilizátorem, tak zvlnění napětí v určitém rozsahu není problém. Čili kapacita, opět s předimenzováním, vychází na 10 mF. Napětově je vhodné vybírat kondenzátory na 50 V, lépe však na 100 V. Napětí na výstupu usměrňovače bude, po usměrnění a odečtení ztrát na diodách 32,5 V.

### 5.5.3 Stabilizátor

Pro stabilizaci výstupního napětí, je použit spínaný stabilizátor LM 2576 v provedení garantovaného výstupního proudu 3 A. Tento stabilizátor pro svou funkci vyžaduje minimum externích součástek, v základním provedení stačí pro funkci zpravidla pouze tlumivka, Schottkyho dioda a kondenzátor. V případě napájení zvukových zařízení je vhodné použít ještě výstupní filtr. Všechny součástky s potřebnými hodnotami a doporučeným zapojením jsou uvedeny v katalogovém listu [20].

Stabilizátor je zapojen jako regulovatelný, což znamená, že je ponechána možnost nastavit trimrem přesnou hodnotu výstupního napětí, v tomto případě 26 V. Zapojení je uvedeno v [20] a jedná se v podstatě o zavedení zpětné vazby do obvodu stabilizátoru. Zpětná vazba je realizována pomocí odporového děliče na výstupu, kde je snímáno výstupní napětí a následně přivedeno do vstupu integrovaného obvodu. Díky principu funkce stabilizátoru jsou kladeny na jeho chlazení minimální nároky, což dělá zdroj velmi kompaktním.

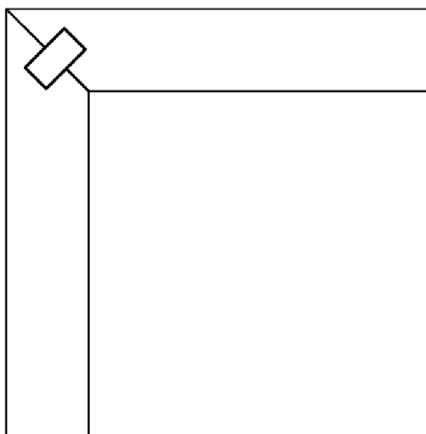
## 6 Realizace konstrukce a výsledky měření soustavy

Celý popis praktické konstrukce, jak je napsán, tak probíhal také stejně chronologicky. Vše co se týká skutečného zařízení je realizováno stejně, jako v teoretickém návrhu a na nepatrné změny a konstrukční doporučení, jejichž nutnost vychází na povrch, až při samotném sestavování, je patřičným způsobem upozorněno.

### 6.1 Realizace ozvučnice

V počáteční fázi realizace celé konstrukce jsem musel sestavit základní kámen celé soustavy, což je v tomto případě ozvučnice. V teorii jsem ji navrhnul jako kvádr z desek MDF o rozměrech 15x18x18 cm (Š x V x H). Tloušťka stěny však teoreticky odpovídala hodnotě 12 mm, což se pro praxi ukázalo sice dostačující, ovšem ne zcela odpovídající mým představám o tuhosti celé ozvučnice. Zvolil jsem tedy desky tloušťky 19 mm. Samozřejmě, že tato změna znamenala zmenšení vnitřního objemu ozvučnice, ovšem při teoretickém návrhu jsem počítal se značnou rezervou a objem jsem stanovil větší, než je skutečně potřeba. Konkrétní objem i při zvětšení tloušťky stěny použitých desek je přibližně 3 litry, což je pro použitý reproduktor stále dostačující.

Jako metodu spojování stěn ozvučnice jsem zvolil systém na pokos, kdy jsou stěny ozvučnice spojeny pod úhlem 45 stupňů a jako pojící element je použito lepidlo a drážka s perem. Tento spoj je oproti spoji natupo pevnější a také vzhledově příjemnější. Vše je však vykoupeno o něco náročnější realizací. Na obr. 6.1 je schematické znázornění spojení dvou desek na pokos s pojistným perem.



Obr. 6.1: Schematické znázornění spojení na pokos s pojistným perem.

Takto jsem zkonstruoval dvě naprosto stejné ozvučnice. V jednom případě to byla již finální verze, v případě druhém bylo nutné ještě vybrat adekvátní bassreflexový nátrubek a nainstalovat jej do ozvučnice.

Nátrubek jsem zvolil od firmy MONACOR, konkrétní typ BR-30HP. Vnitřní průměr nátrubku je 29 mm. Délku nátrubku jsem z původních 123 mm zkrátil na 90 mm, aby jeho rezonanční kmitočet odpovídal mnou požadovaným 80 Hz a zároveň aby jej bylo možné nainstalovat do připravené ozvučnice. Nátrubek jsem patřičně zatmelil do otvoru v ozvučnici.

Otvor pro bassreflexový nátrubek je umístěn netradičně na vrchní straně ozvučnice, vyplývá to ze speciálního použití celé soustavy, kdy budou ozvučnice umístěny bočními stranami těsně vedle sebe a na zadní straně bude zesilovač, čili vrchní strana ozvučnice je jediné použitelné místo pro instalaci bassreflexového nátrubku. Detail nátrubku BR – 30HP je na obr. 6.2.

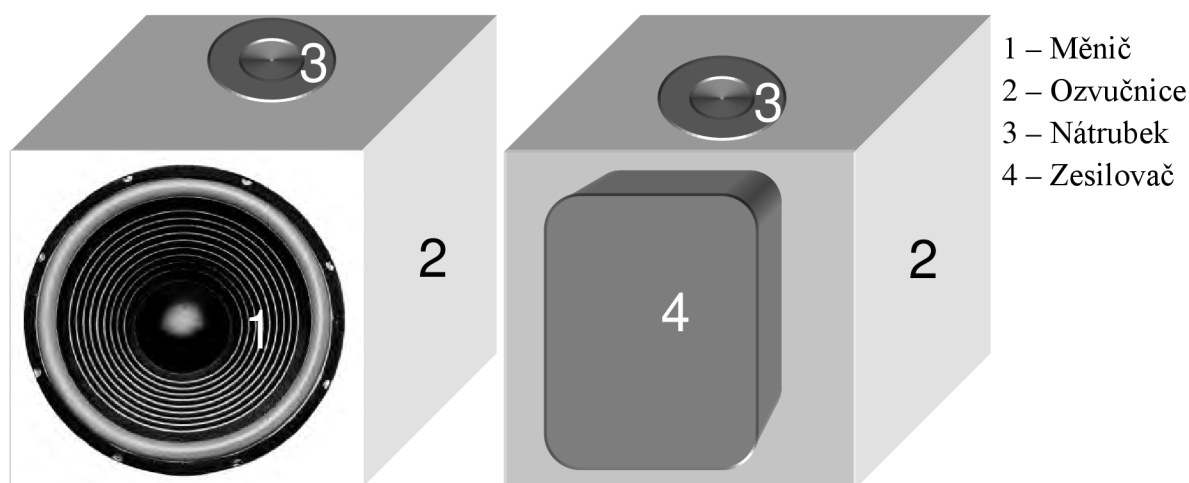


Obr. 6.2: Bassreflexový nátrubek BR – 30HP.[21]

Na celý vnitřní prostor ozvučnice jsem použil tlumící rouno od firmy DEXON, které jsem nalepil v jedné vrstvě na každou stěnu ozvučnice.

Díru pro reproduktor (měnič) jsem na styčných plochách s reproduktorem olepil těsnícím páskem pod reproduktory od firmy MONACOR konkrétní typ MDM-5. Tak je zajištěna naprostá těsnost mezi ozvučnicí a reproduktorem.

Pro přivedení signálu k měniči od zesilovače, který jsem plánovitě umístil na zadní stěnu ozvučnice, jsem použil dvojlinku s dvojitou izolací opatřenou konektory FASTON na straně měniče, na straně zesilovače jsou dráty přímo připájeny k plošnému spoji zesilovače. Tímto řešením jsem docílil jediného dalšího narušení stěny ozvučnice a to pouze o průměru 8 mm. Tuto díru jsem opět okolo procházejícího vodiče důkladně zatmelil, aby nedocházelo k netěsnostem. Na obr. 6.3 je vidět schematicky nastíněná skladba celé mechanické části soustavy, obrázek znázorňuje bassreflexovou ozvučnici. Uzavřená ozvučnice je, co se týká rozložení prvků naprosto stejná.



Obr. 6.3: Schematické zobrazení celé soustavy po sestavení.

## 6.2 Realizace zesilovače

K zesilovači TPA 3106 je u výrobce dostupná předloha pro výrobu plošného spoje. Tato předloha však počítá s vedením drah k součástkám na obou stranách plošného spoje, což vede k potřebě velkého množství prokovů a celý plošný spoj se tím zesložituje.

Navrhnul jsem proto plošný spoj sám, s tím, že jsem využil pouze jednu stranu pro vedení drah k součástkám. Strana druhá je použita pouze pro chlazení zesilovače, který má na spodní straně pouzdra takzvanou PowerPad, což je kovový čtverec s délkou strany 4,6 mm. Tato plocha se připájí k poli prokovů, které jsou pod pouzdrům a ztrátové teplo ze zesilovače se odvádí skrze prokovy na druhou stranu plošného spoje. Druhá strana plošného spoje je vyvedena jako co možná největší plocha souvislé mědi, která má za úkol odvést přebytečné teplo z pouzdra zesilovače. Tímto způsobem je docíleno poměrně elegantního chlazení zesilovače a činí jej zcela kompaktním.

Ploška PowerPad slouží zároveň jako propojení signálové a výkonové země a musí být co nejkratší cestou spojena jedním bodem, přímo se vstupní svorkou napájecí země. Toto propojení musí být zároveň co možná nejbližší vstupní svorky napájecí země. Toto propojení horní a spodní části plošného spoje lze realizovat opět prokovením díry u svorky napájecí země, ovšem osobně jsem upřednostnil drátový propoj, který je mechanicky odolnější. V návrhu plošného spoje je dobře vidět masivní prokov u pájecí plošky GND (napájecí země), který právě zajišťuje propojení horní a spodní části plošného spoje v jednom bodě. Všechna tyto opatření vedou k tomu, že nedojde k uzavření zemních smyček a zesilovač tak nebude produkovat rušivý „brum“. Ve schématu a návrhu plošného spoje figuruje rezistor R13 s hodnotou 0R0, tento rezistor je ve schématu a návrhu plošného spoje pouze z důvodu jednodušší orientace při pohledu na oddělení signálové a výkonové země. Tento rezistor se nesmí zapojovat, neplní v obvodu žádnou funkci. Patříčná poznámka je uvedena i přímo ve schématu.

Oproti předchozím úvahám jsem při konstrukci prototypu vypustil možnost přepínání úrovně vstupního signálu mezi -10 dBu a +4 dBu pomocí odporového děliče a využil jsem integrovanou funkci změny zesílení zesilovače pomocí dvou pinů, které dávají dohromady 4 kombinace binárních hodnot a také tedy 4 různé úrovně zesílení. Na zadní straně krabice zesilovače je dvoupolohový přepínač vhodně zapojený na vstupní piny GAIN0 a GAIN1 tak, aby bylo docíleno požadovaného zesílení. To se dá skokově měnit mezi 26 dB a 36 dB. Při čemž zůstává vstupní odpor zesilovače stejný a to 16 k $\Omega$ .

Zesilovač disponuje i dalšími možnostmi elektronického řízení, jako je možnost jej vypnout, či spíše uvést do pohotovostního režimu, funkce je dostupná na pinu SHUTDOWN. Dále pak funkcí MUTE, která je vyvedena na propojku. A také dokáže sám detekovat chybu systému typu zkrat na výstupu. Tuto funkci je možné použít v kombinaci s funkcí MUTE, kdy dojde po zkratu na výstupu k okamžitému odpojení výstupů. U mého prototypu je tato možnost využita způsobem rozsvícení diody při detekci chyby, tedy zkratu na výstupu. Podrobně jsou veškeré možnosti řízení zmíněny v katalogovém listu obvodu.

Obvod tak jako většina moderních integrovaných výkonových audio zesilovačů je vybaven ochranou proti již zmíněnému zkratu na výstupu a také ochranou proti tepelnému přehřátí.

Vzhledem k možnosti připojení jak symetrického, tak nesymetrického vstupního signálu je zesilovač na výstupu osazen konektorem COMBO od firmy NEUTRIK. Tento konektor obsahuje vstupy XLR a TRS v jednom. Kdy oba dva konektory je možné použít pro symetrický i nesymetrický zdroj signálu, samozřejmě musí být adekvátně zapojeny. Konektor je umístěn do vrchního víka krabice. Způsob, jakým je konektor uchycen do krabice, je takový, že zespodu je podepřen dvěma distančními sloupky, které se opírají o dno krabice a konektor je zajištěn pomocí dvou šroubů, našroubovaných v těchto distančních sloupcích skrze jeho montážní díry.



Obr. 6.4: Konektor COMBO od firmy NEUTRIK.[22]

Jako napájecí konektor je zvolen standardní kruhový konektor pro malá napětí s vnitřním průměrem 5,5 mm a průměrem vnitřního kolíku 2,5 mm. Konektor je v kovovém provedení do panelu. Napájecí konektor je umístěn na boku krabice.

Celý zesilovač je uložen v krabici KM 31 NP, která je dvoudílná a obsahuje také dva úchyty pro připevnění přímo na ozvučnici. Do krabice lze případně vyvrtat otvory pro lepší chlazení, avšak po dobu testování se krabice ani zesilovač samotný neohřál natolik, aby tato operace byla nutností.



Obr. 6.5: Krabice KM 31 NP.[23]

### 6.3 Realizace napájecího zdroje

K praktické realizaci napájecího zdroje nedošlo. Napájecí zdroj byl pouze navržen. Pro změření vlastností soustavy nebylo nutné jej konstruovat. Pro následné použití v již konkrétní aplikaci bude s největší pravděpodobností použit běžně dostupný kompletní síťový spínaný zdroj, jehož cena je víceméně stejná jako výrobní cena navrženého zdroje v této práci. Navíc prodávané síťové spínané zdroje je možno, díky jejich konstrukci, pohodlně umístit do jakéhokoliv racku. Výkonově jsou na tom takovéto spínané zdroje ještě o něco lépe, než zdroj navržený v této práci a zároveň jsou rozměrově menší.

Konkrétní hodnoty síťových spínaných zdrojů jsou například 150 W a 26 V na výstupu s cenou nepřesahující 1300 Kč. Pro zajímavost zdroj s hodnotami 500 W a 26 V na výstupu je možné pořídit za cenu 5300 Kč. Tyto zdroje je možné zakoupit u firmy PS electronic.



Obr. 6.6: Konkrétní spínaný zdroj s výkonem 500 W.[24]

### 6.4 Měření soustavy

Měření sestavené soustavy proběhlo v bezdrazové komoře v laboratoři Studiové a hudební elektroniky na ústavu telekomunikací Vysokého učení technického v Brně. Žádaným výstupem z měření byly modulové kmitočtové a směrové charakteristiky obou zkonstruovaných ozvučnic. Měřena byla kompletní soustava, to znamená reproduktorová skříň s osazeným měničem i zapojeným zesilovačem.

K měření bylo použito přístrojů NTI Minirator MR2, což je generátor signálu, v tomto případě přímo symetrického, a dále pak NTI Acoustilyzer AL1, který slouží k měření akustického tlaku. Další součástí soustavy pro měření byla dálkově řízená točna, která je nutná pro natáčení reproduktorové soustavy, při měření směrových charakteristik. Naměřené charakteristiky jsou obsahem přílohy 19 až 22.

## 7 Závěr

Cílem této práce bylo dosáhnout návrhu aktivní reproduktorové soustavy pro reprodukci zvuku pomocí metody wavefield syntézy. V úvodu je nastíněna potřebná teorie pro pochopení celé cesty řešení a diskusí zdůvodněn právě důvod, proč byla práce realizována uvedenou cestou.

Veškeré uvedené zapojení a konstrukční elektronické řešení jsou detailně popsána a neměl by být problém jakoukoliv část elektronické části soustavy sestavit.

Při návrhu jednotlivých součástí celé soustavy byl brán zřetel na hlavní požadavky plynoucí ze zadání. Těchto požadavků bylo také poměrně úspěšně dosaženo. Oba v textu uvedené koncepty ozvučnice jsou svými rozměry vhodné pro použití dle zadání, šířkou nepřekračují 15 cm a jejich mobilita je vysoká.

Po zkonstruování prototypů bylo provedeno měření každé z ozvučnic. Výsledky měření jsou dostupné v přílohách. Měřením bylo oproti očekávání dokázáno, že ozvučnice typu bassreflex bude pro účely této práce vhodnější, než ozvučnice uzavřená. Při porovnání kmitočtové charakteristiky uzavřené ozvučnice a ozvučnice typu bassreflex je možné, u charakteristiky bassreflexové ozvučnice, pozorovat citelné zvýšení v oblasti nízkých kmitočtů a zároveň vyrovnaní celé charakteristiky a její posun směrem k nižším kmitočtům, oproti právě charakteristice druhé, tedy charakteristice uzavřené ozvučnice. Obě dvě charakteristiky jsou vyrovnané a při reálném poslechu je zvukové podání věrohodné a ani zvýšení charakteristiky na nízkých kmitočtech nepůsobí rušivě. To vše přispívá k vysoké kvalitě reprodukce, což je důležitý parametr, při výběru adekvátní reprosoustavy, ať už pro účely této práce, nebo pro obecnou zvukovou reprodukci.

Zesilovač použitý v této práci je navržen podle doporučeného zapojení výrobce, avšak plošný spoj je vyroben naprosto odlišně oproti doporučení výrobce. Se sestavením a oživením zesilovače nebyl nejmenší problém. Všechny parametry od zesilovače očekávané byly splněny a vzhledem k množství požadavků na zesilovač plynoucích ze zadání je řešení uvedené v této práci velmi elegantní. Tím, že byl vypuštěn útlumový článek na vstupu, není nutné na zesilovači nic nastavovat a oživení je možné provést s minimem přístrojů.

Jak je uvedeno výše, zdroj navržený v této práci konstruován nebyl. Místo toho je uvedeno doporučení použít modulární průmyslový síťový spínaný zdroj, kdy toto řešení se jeví ze všech hledisek jako lepší.

Koncept celé soustavy je uvažován jako aktivní reproduktorová skříň se zesilovačem umístěným přímo jako vnější součást ozvučnice. Zdroj je externí, čili umístěn samostatně, zcela mimo ozvučnici.

Celou soustavu bych beze zásadnějších změn doporučil jako zdroj zvuku vhodný pro wavefield syntézu. Mezi pozdější úpravy by mohlo patřit dodatečné osazení celého pole těchto reprosoustav centrální řídicí jednotkou představovanou vhodným mikrokontrolérem. Mezi její funkce by mohlo patřit ztlumení reprosoustav, převedení zesilovačů do pohotovostního stavu či dálková změna zesílení, případně hlášení směrem k obsluze o zkratu na výstupu. Tímto způsobem by bylo využito všech možností, které zesilovač poskytuje.

Cena jednoho kusu kompletní reprosoustavy v této práci, je asi 1000 Kč. Což není mnoho ve srovnání s tím co všechno nabízí. Když bych pak porovnal reprosoustavu navrženou v této



práci a komerční soustavu Behringer B1030A, tak obě mají přibližně podobné parametry, ale Behringer B1030A je dostupná za cenu 2500 Kč, celá soustava je o poznání větší a její směrová charakteristika nebude patrně tak vyrovnaná, v porovnání se soustavou navrženou v této práci, jelikož Behringer B1030A je soustava dvoupásmová.[25]

# Seznam použité literatury

- [1] SCHIMMEL, Jiří. *Vícekanálové systémy : učební text kurzu BELA*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií , [2009?]. 18 s.
- [2] ADAM, Pavol. *Úvod do metód spracovania zvuku*. Bratislava, 2006. 144 s. Univerzita Komenského, Bratislava. Vedoucí diplomové práce Ľubomír Lúčan, CSc.
- [3] RUND, František. *SIMULACE ZVUKOVÉHO POLE VÍCE ZDROJŮ*. Praha : Katedra radioelektroniky, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze, [200-]. 5 s.
- [4] *Four Audio Sound Technology : Wave Field Synthesis Project at the TU Berlin* [online]. [2008] [cit. 2009-12-13]. English. Dostupný z WWW: <<http://www.four-audio.com/en/references/wave-field-synthesis.html>>.
- [5] *Iosono-sound* [online]. 2009 [cit. 2010-05-13]. *Wave field synthesis*. Dostupné z WWW: <<http://www.iosono-sound.com/technology/wave-field-synthesis/>>.
- [6] KOMRSKA, Jiří. *Huygensův-Fresnelův princip a odvození difrakčních integrálů*. [s.l.] : [s.n.], [2007?]. 14 s. Dostupný z WWW: <<http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/>>.
- [7] TOMAN , K. *Reproduktory a reprosoustavy : 1.díl, 1. vydání*. Orlová : DEXON, 2003. 205 s.
- [8] File:Loudspeaker scheme.jpg. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 16.12. 2007, last modified on 3.12. 2009 [cit. 2010-05-27]. Dostupné z WWW: <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Loudspeaker\\_scheme.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Loudspeaker_scheme.jpg)>.
- [9] SÝKORA, B. *Stavíme reproduktorové soustavy: 1.-48. díl*. A Radio 10/97 - 9/2001.
- [10] NEVOLE, T. *Reproduktorová skříň pro laboratorní měření impedance reproduktoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
- [11] Creative sound solutions. *Creative sound solutions* [online]. [2008] [cit. 2009-11-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.details.php?model=FR125SR>>.creativesound.ca/
- [12] Fostex Company. *Fostex* [online]. [2009] [cit. 2009-11-21]. Dostupný z WWW: <[http://www.fostexinternational.com/docs/speaker\\_comp/FE-Series.shtml](http://www.fostexinternational.com/docs/speaker_comp/FE-Series.shtml)>.
- [13] *Loudspeakers and Accessories* [online]. 28.09.2009 [cit. 2010-05-27]. Visaton. Dostupné z WWW: <<http://www.visaton.com/bilder/fotos/gross/frs8.jpg>>.
- [14] TVM spol s.r.o.. *Acoustics TVM* [online]. c2008 [cit. 2009-11-21]. Dostupný z WWW: <<http://reproduktory.tvm-valmez.cz/sirokopasmovy-reproduktor-arx-130-20-p-94.html>>.
- [15] *Loudspeakers and Accessories* [online]. 28.09.2009 [cit. 2010-05-27]. Visaton. Dostupné z WWW: <[http://www.visaton.com/bilder/frequenz/gross/frs8\\_8\\_fs.gif](http://www.visaton.com/bilder/frequenz/gross/frs8_8_fs.gif)>.
- [16] DUŠEK, Tomáš. *Pandatron - Elektrotechnický magazín* [online]. [2009] [cit. 2009-11-21]. Dostupný z WWW: <[http://pandatron.cz/?632&tridy\\_zesilovacu](http://pandatron.cz/?632&tridy_zesilovacu)>.
- [17] Texas Instruments. *Datasheet TPA 3106D1*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 35 s.
- [18] *GES-ELECTRONICS* [online]. c1991-2010 [cit. 2010-05-27]. GES-ELECTRONICS. Dostupné z WWW: <<http://www.ges.cz/km-68-ges07203816.html>>.
- [19] OLEJÁR, Martin. *Elweb.cz* [online]. [2008] [cit. 2009-11-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=65>>.
- [20] National Semiconductor. *Datasheet LM 2576*. [s.l.] : [s.n.], 1999. 22 s.

- [21] *Monacor* [online]. c2010 [cit. 2010-05-27]. Monacor. Dostupné z WWW: <<http://www.monacor-ost.com/katalog/JPG/400/G/G1/G128610A.jpg>>.
- [22] *Parts-express.com* [online]. c1996-2010 [cit. 2010-05-27]. Parts Express. Dostupné z WWW: <<http://www.parts-express.com/pe/showdetl.cfm?Partnumber=092-045>>.
- [23] *GES-ELECTRONICS* [online]. c1991-2010 [cit. 2010-05-27]. GES-ELECTRONICS. Dostupné z WWW: <<http://www.ges.cz/km-31-np-ges07203771.html>>.
- [24] *PS electronic, s.r.o.* [online]. 24.05.2010 [cit. 2010-05-27]. PS electronic. Dostupné z WWW: <<http://www.pselectronic.cz/k5204-071-zdroj-24v-20a-sp-480-24.html>>.
- [25] *Audiotek* [online]. 2004 [cit. 2010-05-27]. Audiotek. Dostupné z WWW: <<http://www.audiotek.cz/Behringer-B1030A/studiové-monitory/:3:35864>>.
- [26] Brandenburg, K., Brix, S., Sporer, T., "Wave field synthesis: From research to applications". In Proceeding of European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2004. TU Wien, 2004, pp. 1369-1376.

# Seznam použitých zkratek

3D	trojrozměrné zobrazení, v tomto případě prostorový zvuk
a	rozměr ozvučnice rovinná deska
A	jednotka elektrické proudu
Bl (Tm)	silový faktor reproduktoru
C (F)	značka elektrické kapacity
cca	zkratka pro „přibližně“
cm	centimetr
d (m)	vzdálenost dvou elektrod
dBu (-)	jednotka napětí vyjádřeného s referencí 0,775 V RMS, v logaritmické míře
DTS	Digital Theatre System
EBP (Hz)	Efficiency Bandwidth Product
f (Hz)	kmitočet
f <sub>c</sub> (Hz)	mezní kmitočet měniče uzavřeného v ozvučnici
f <sub>m</sub> (Hz)	mezní kmitočet otevřené ozvučnice
f <sub>s</sub> (Hz)	rezonanční kmitočet měniče
Hi-Fi	High fidelity
I <sub>m</sub> (A)	maximální odebíraný proud z usměřovače
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
kg.m <sup>-3</sup>	jednotka hustoty
kHz	kilohertz jednotka kmitočtu
kΩ	kiloohm jednotka elektrického odporu
LEAP-5	simulační program od firmy LinearX Systems Inc.
MDF	Medium-density fibreboard
mF	jednotka elektrické kapacity
mm	jednotka délky
Např.	zkratka pro „například“
Obr.	zkratka pro „obrázek“
Q <sub>ES</sub> (-)	elektrický činitel jakosti reproduktoru
Q <sub>TS</sub> (-)	celkový činitel jakosti reproduktoru
S (m <sup>2</sup> )	plocha elektrod
SDDS	Sony Dynamic Digital Sound
SMD	surface mount technology
SPL (dB)	Sound pressure level
Hz	jednotka kmitočtu
Š x V x H (m)	šířka x výška x hloubka
THD+N (%)	total harmonic distortion plus noise
TS	Thiele – Small (mechanické parametry měničů)
U <sub>m</sub> (V)	maximální napětí na výstupu usměřovače
U <sub>x</sub> (V)	požadované minimální napětí na výstupu usměřovače
V	jednotka elektrického napětí
VA	jednotka elektrického výkonu
V <sub>as</sub> (l)	ekvivalentní objem

$V_b$  (l)      objem ozvučnice  
W                jednotka elektrického výkonu

# Seznam příloh

**Příloha 1:** Katalogový list měniče Visaton FRS 8

**Příloha 2:** Katalogový list měniče Creative sound solutions FR125SR

**Příloha 3:** Katalogový list měniče Fostex FE103E

**Příloha 4:** Katalogový list měniče TVM ARX-130-20/4 (první část)

**Příloha 5:** Katalogový list měniče TVM ARX-130-20/4 (druhá část)

**Příloha 6:** Schéma zapojení pro zesilovač

**Příloha 7:** Horní a spodní strana spojů desky plošného spoje pro zesilovač

**Příloha 8:** Horní a spodní osazovací plán desky plošného spoje pro zesilovač

**Příloha 9:** Schéma zapojení a návrh desky plošného spoje pro modul usměrňovače

**Příloha 10:** Schéma zapojení a návrh desky plošného spoje pro modul stabilizátoru

**Příloha 11:** Amplitudová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice, odsimulována v LEAP-5

**Příloha 12:** Směrová charakteristika uzavřené ozvučnice, odsimulována v LEAP-5

**Příloha 13:** Amplitudová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice s vlivem difrakcí, odsimulována v LEAP-5

**Příloha 14:** Směrová charakteristika uzavřené ozvučnice s vlivem difrakcí, odsimulována v LEAP-5

**Příloha 15:** Amplitudová kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice, odsimulována v LEAP-5

**Příloha 16:** Směrová charakteristika bassreflexové ozvučnice, odsimulována v LEAP-5

**Příloha 17:** Amplitudová kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice s vlivem difrakcí, odsimulována v LEAP-5

**Příloha 18:** Směrová kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice s vlivem difrakcí, odsimulována v LEAP-5

**Příloha 19:** Modulová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice změřená na zkonstruované soustavě

**Příloha 20:** Směrové charakteristiky uzavřené ozvučnice změřené na zkonstruované soustavě

**Příloha 21:** Modulová kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice změřená na zkonstruované soustavě

**Příloha 22:** Směrové charakteristiky bassreflexové ozvučnice změřené na zkonstruované soustavě

**Příloha 23:** Výkres bassreflexové ozvučnice

## FRS 8 8 OHM

Art. No. 2004

**8 cm (3.3") HiFi širokopásmový reproduktor** s ! excelentním ! lineárním průběhem mezi 200 - 20 000 Hz. Vhodný do kvalitních efektových boxů domácího kina, miniaturních boxů a profesionálních použití. Díky malým rozměrům se uplatní také v modelářství nebo různých elektronických zařízeních. Ve speciální ozvučnici můžeme naměřit až neuvěřitelně kvalitních 40Hz !!!

### Technická data:

Standardní příkon 30 W

Hudební příkon 50 W

Jmenovitá impedance 8 Ohm

Kmitočtový rozsah 130 - 20000 Hz (8 dB)

Charakteristická citlivost 82 dB (1 W/1 m)

Maximální výchylka membrány 5 mm

Rezonanční kmitočet 130 Hz

Magnetická indukce 0,8 Tesla

Magnetický tok 200  $\mu$  Weber

Výška pólových nástavců 4 mm

Průměr cívky 2 cm

Výška vinutí (cívky) 0,6 cm

Otvor pro zabudování 7,3 cm

Čistá váha 0,28 kg

D.C. resistance  $R_{dc}$  7,2 Ohm

Mechanický Q činitel  $Q_{ms}$  2,86

Elektrický Q činitel  $Q_{es}$  1,47

Celkový Q činitel  $Q_{ts}$  0,97

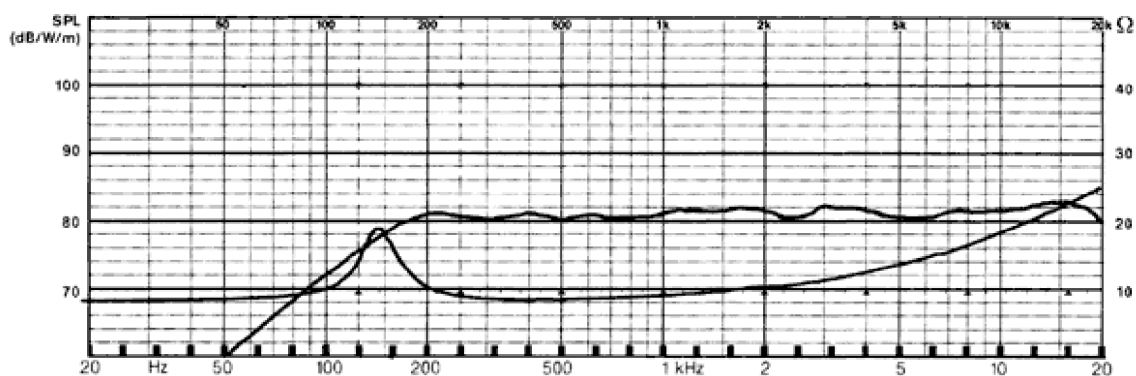
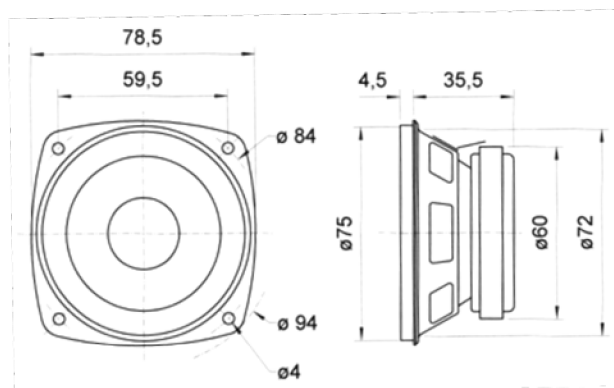
Ekvivalentní objem  $V_{as}$  0,8 l

Pracovní plocha membrány  $S_d$  31 cm<sup>2</sup>

Dynamická hmotnost 2,5 g membrány mmd

Činitel jakosti pohonu  $B_{xl}$  3,2 T · m

Indukčnost cívky 0,85 mH



## CREATIVE SOUND SOLUTIONS FR125SR FULL RANGE



The FR125SR is Creative Sound Solutions RoHS compliant 4.5" (125mm) full range loudspeaker. It is a shielded driver featuring a curvilinear paper cone, rubber surround, & copper phase plug suitable for Hi-Fi & Home Theatre use. The driver is based on the patented\* XBL<sup>2</sup>™ motor topology used under license. In addition to RoHS this new version of the FR125SR has a new more open cast aluminum basket.

The flatter BL, lower distortion, low moving mass, & significant excursion provided by the XBL<sup>2</sup>™ motor, permit this speaker to perform very cleanly with a wide frequency response as well as almost unbelievable bass output.

The FR125SR is the evolution of the world's first full range speaker using XBL<sup>2</sup>™ motor topology for purists who want no crossover in the way of their music

satisfaction.

The FR125SR has superb midrange clarity & extended, low distortion bass. On a standard IEC baffle in a 200 litre enclosure the on-axis response is  $\pm 3$  dB from 75 Hz to 20 kHz. The FR125SR is a superb full range driver priced to provide extraordinary value.



The DIY community has embraced these drivers & a growing number of enclosures have been published – sealed, bass reflex, ML-TL, ML-Voigt, open-baffle, & even horn designs. Visit [www.creativesound.ca](http://www.creativesound.ca) for links to these designs and a number of discussions on the real-world experiences of those that have already adopted these drivers.

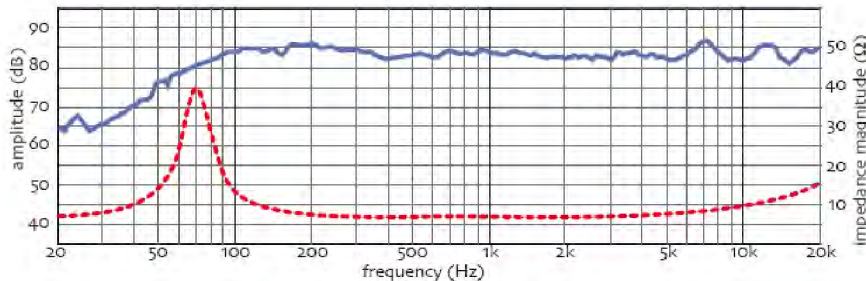
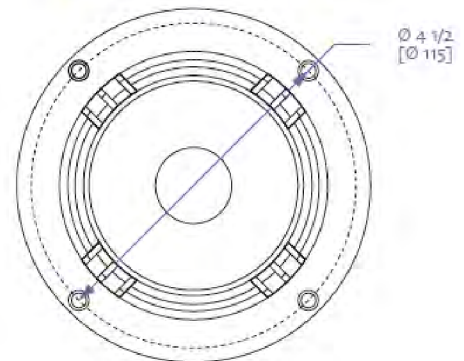
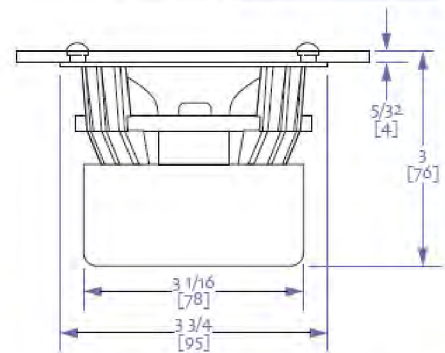
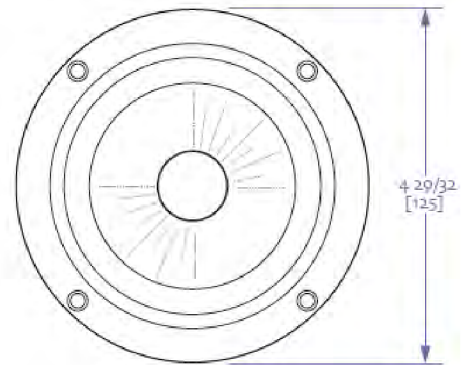
A growing number of small OEM finished speaker suppliers have made this driver the heart of their speaker systems & an international distribution network is developing.

\*US patent #7,039,213



CSS FR125SR Thiele/Small Parameters

$F_s$ (Hz)	70.0	$X_{max}$ (one way)	6mm
$Q_{es}$	0.72	$S_d$ (cm <sup>2</sup> )	57
$Q_{ms}$	3.37	$L_e$	0.35
$Q_{ts}$	0.59	BL NA	4.28
$V_{as}$ (litres)	5.98	$M_{ms}$ (g)	4.4
$R_e$ ( $\Omega$ )	7.0	SPL (dB@1W 1m)	85.5



creative sound solutions

44-31255 Upper Maclure Rd

Abbotsford, BC Canada V2T 5N4

☎ 604-504-3954

[www.creativesound.ca](http://www.creativesound.ca)





FULL RANGE SPEAKER UNIT

# FE103E

## Features

- 'ES cone' paper made of banana plant's fiber
- Newly designed center cap
- Ferrite magnet

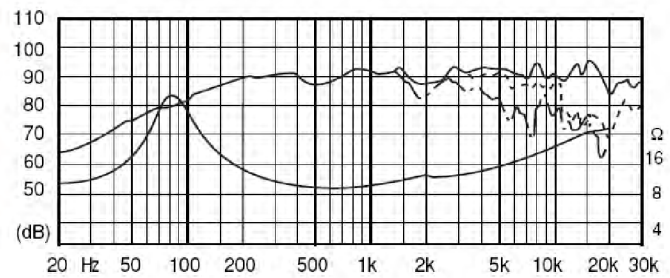


## Specifications & Thiele/Small Parameters

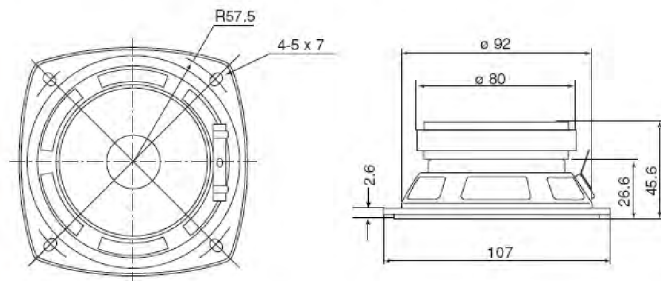
Size	: 100 mm / 4 in
Voice Coil Diameter	: 20 mm / 0.8 in
Cast / Stamped	: Stamped
Impedance	: 8 Ω
Reproduction Frequency Response	:fs - 22 kHz
Sound Pressure Level	: 89 dB/W(m)
Rated Input	: 5 W
Music Power	: 15 W
Magnet Material	: Ferrite
Magnet Weight	
(main)	: 193 g / 0.425 lb
(cancel)	: g / lb
Net Weight	: 630 g / 1.389 lb

a	: 40 mm
D	: 80 mm
Sd	: 0.00503 m <sup>2</sup>
Zn	: 8 Ω
Fs	: 79.5 Hz
Re	: 7.45 Ω
Le	: n/a mH
Qms	: 2.87
Qes	: 0.40
Qts	: 0.36
Mms	: 2.10 g
BL	: 4.42 Telsa/m
Vas	: 6.90 L
Xmax	: 0.35 mm
Eff/η0	: 0.83 %
Cms	: 0.00194 mm/N
EBP	: 199

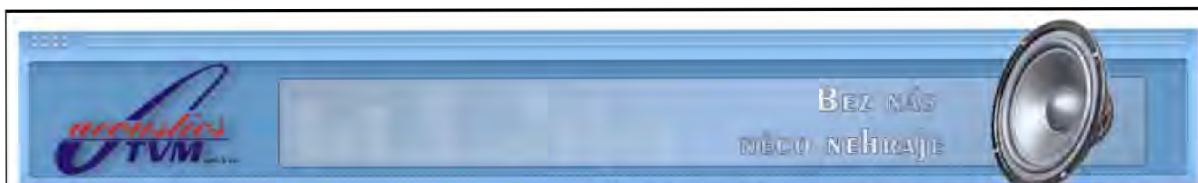
## Frequency Response / Impedance



## Dimensions & Mounting Information



Overall Diameter	: 107 mm / 4.2 in
Baffle Hole Diameter	: 92 mm / 3.6 in
Depth	: 45.6 mm / 1.8 in



## Širokopásmový reproduktor ARX-130-20/4

Přímovyzařující elektrodynamický reproduktor s krycí kopulkou k vyzařování dolního i středního, případně celého pásma slyšitelných kmitočtů pro aplikaci ve výrobcích spotřební elektroniky, automobilech a v reproduktorových soustavách pro nízkovýkonové decentralizované ozvučování.

### AKUSTICKÁ DATA

Jmenovitý šumový příkon <sup>1)</sup>	25	W
Krátkodobý maximální příkon <sup>2)</sup>	75	W
Jmenovitá impedance	4	Ohm
Rezonanční kmitočet $F_s$	105.000	Hz
Jmenovitý kmitočtový rozsah	75 - 15000	Hz
Charakteristická citlivost <sup>3)</sup>	89	dB

### MECHANICKÁ DATA

Materiál kmitací cívky	hliník	
Průměr kmitací cívky	18.4	mm
Výška vinutí kmitací cívky	5.2	mm
Průměr jádra	18	mm
Výška vzduchové mezery	4	mm
Vnější průměr magnetu	82	mm
Vnitřní průměr magnetu	33	mm
Výška magnetu	17	mm
Vnější průměr kompenzačního magnetu	-	mm
Vnitřní průměr kompenzačního magnetu	-	mm
Výška kompenzačního magnetu	-	mm
Hmotnost	0.85	kg

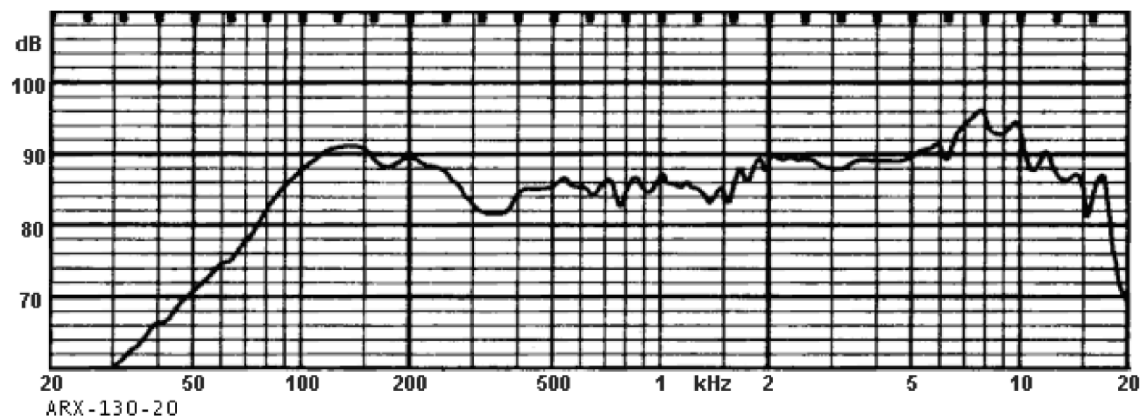
1) DIN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 5 dm<sup>3</sup>.

2) ČSN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 5 dm<sup>3</sup>.

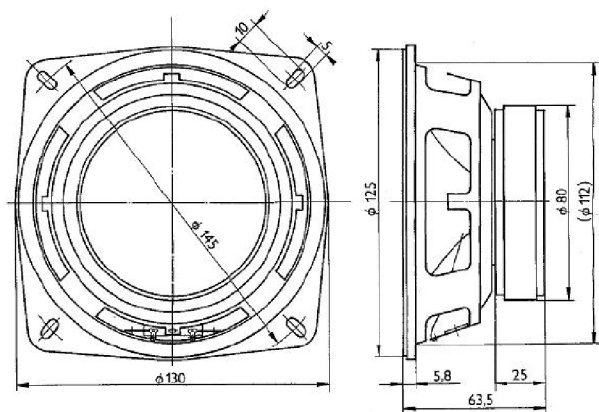
3) ČSN IEC 268-5, standardní ozvučnice, 1W, 1 m, 200 - 10000 Hz

Příloha 5: Katalogový list měniče TVM ARX-130-20/4 (druhá část)

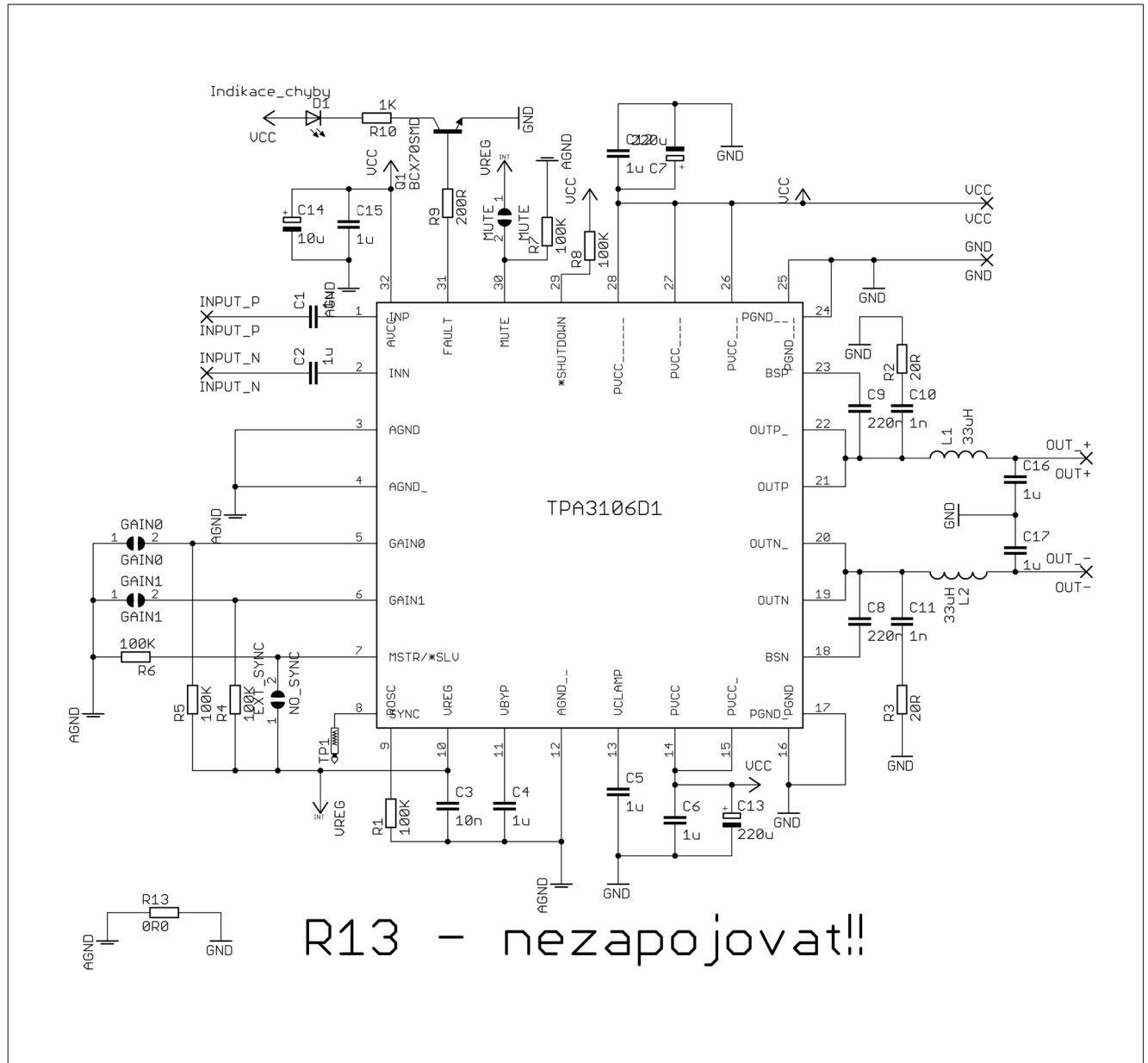
Kmitočtová charakteristika



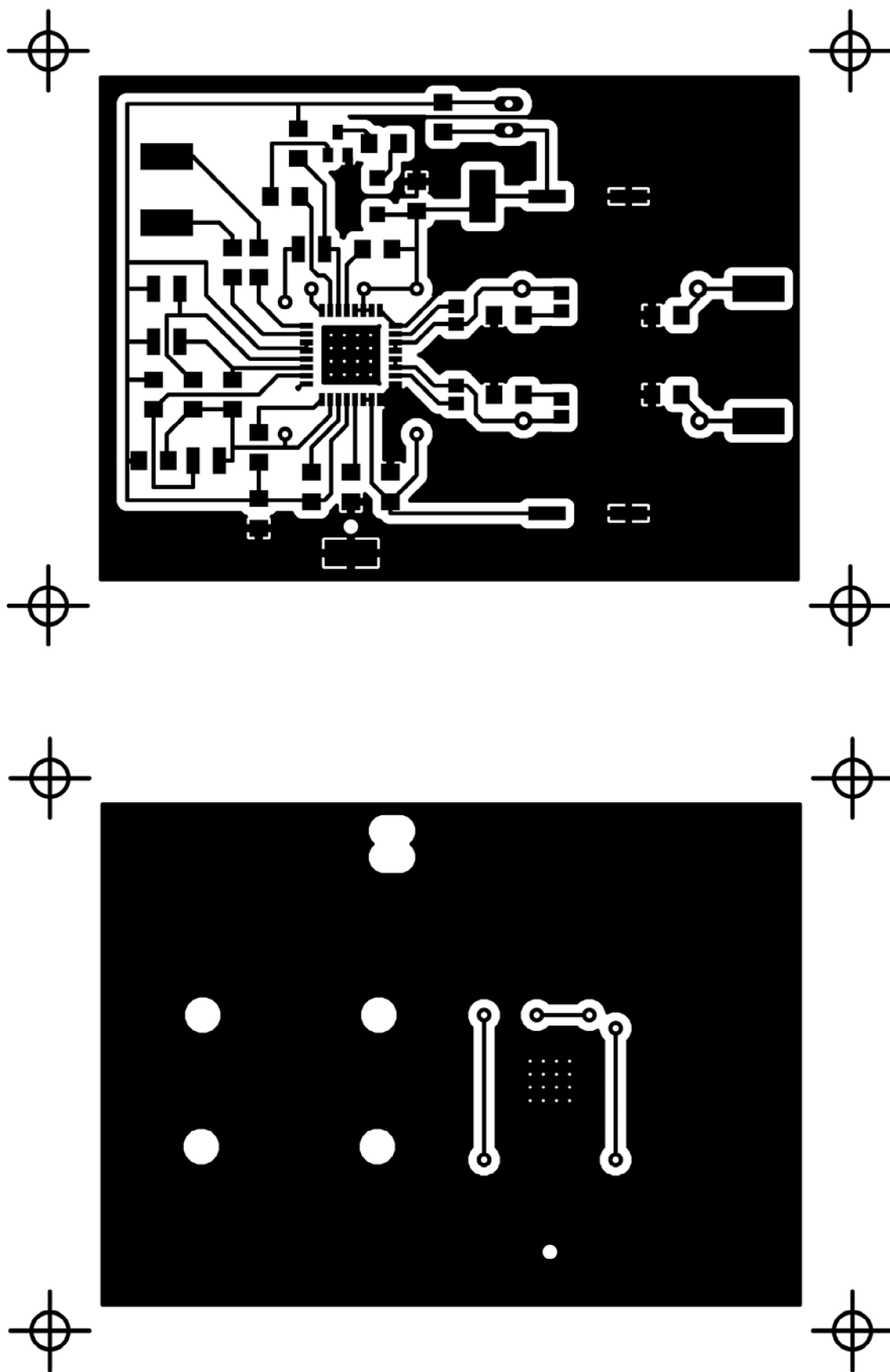
Výkres



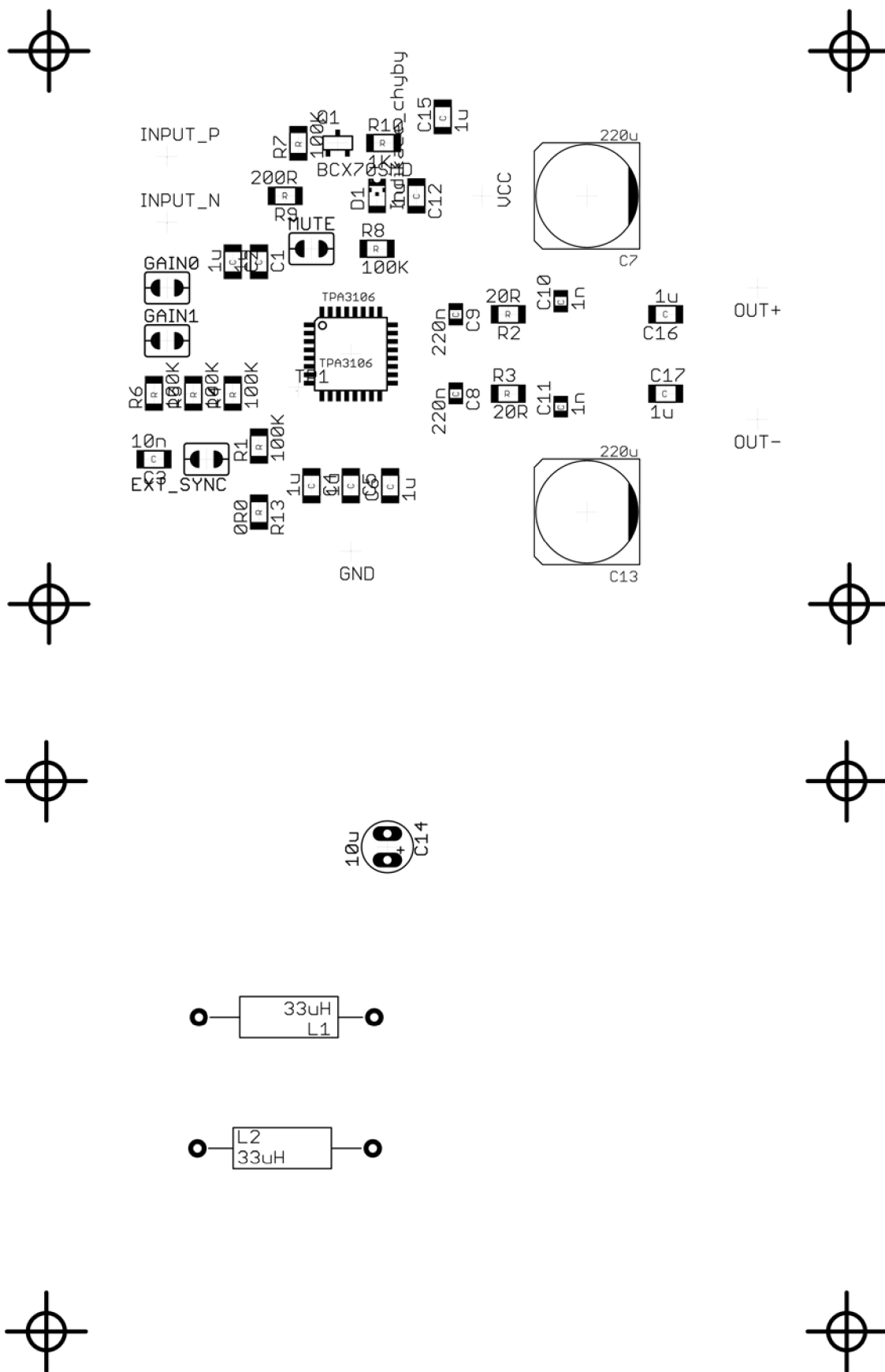
Příloha 6: Schéma zapojení pro zesilovač



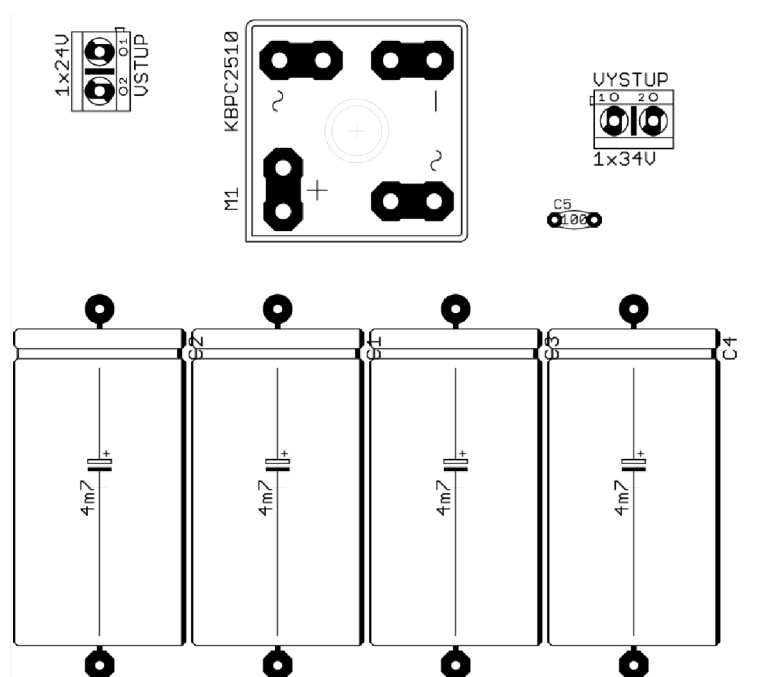
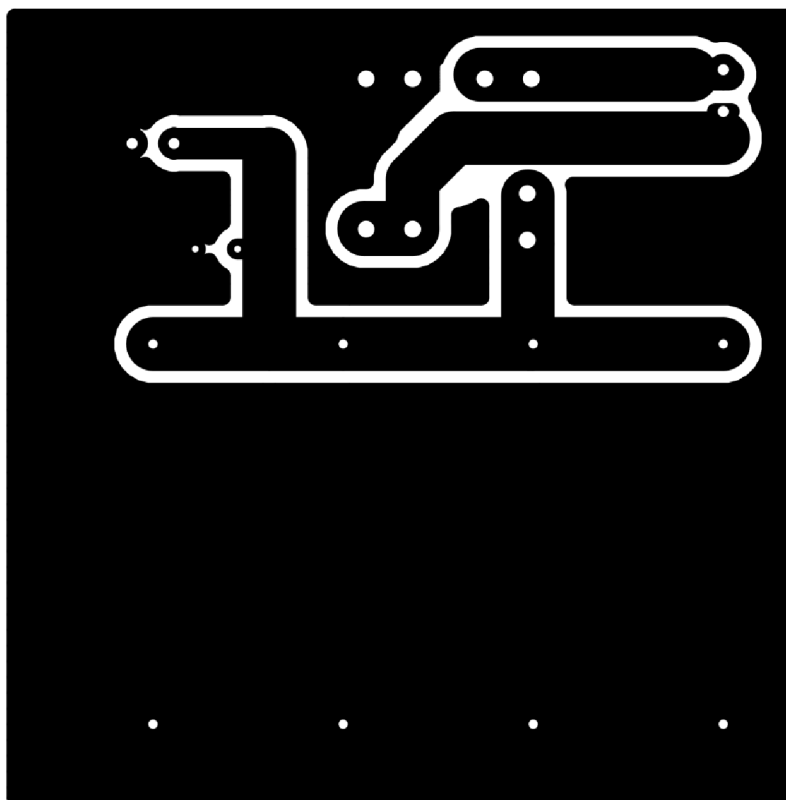
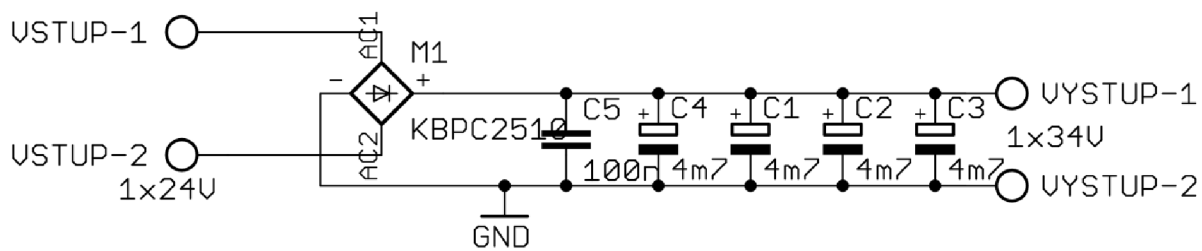
Příloha 7: Horní a spodní strana spojů desky plošného spoje pro zesilovač



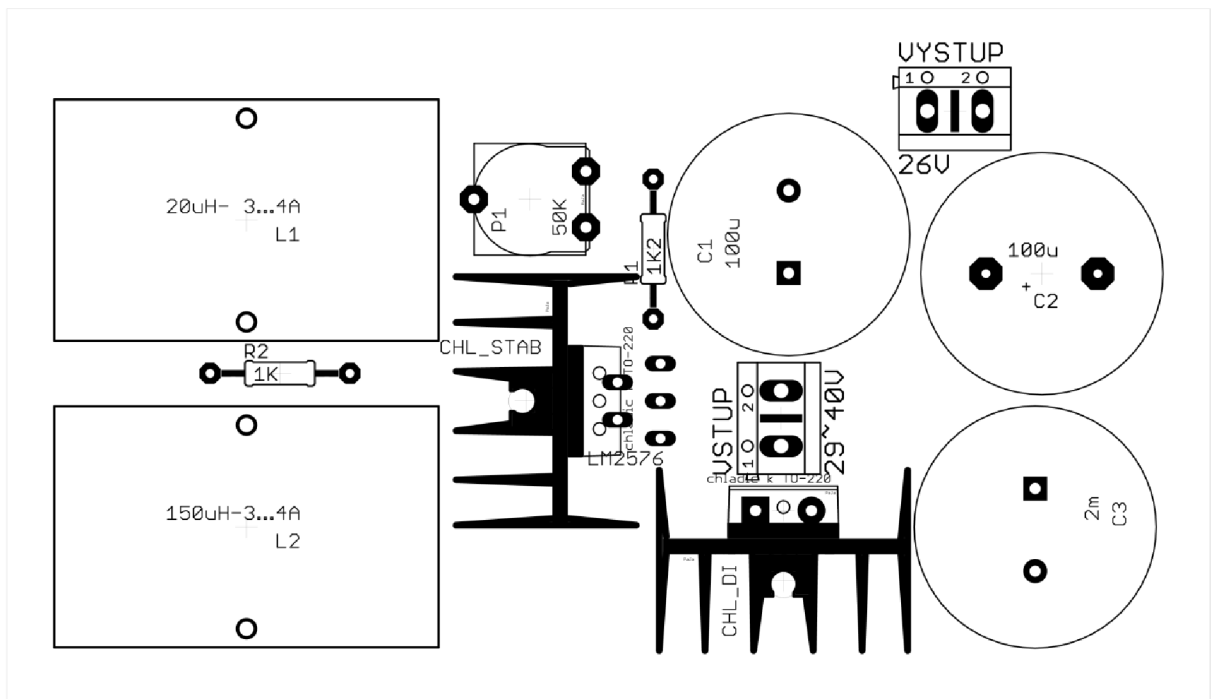
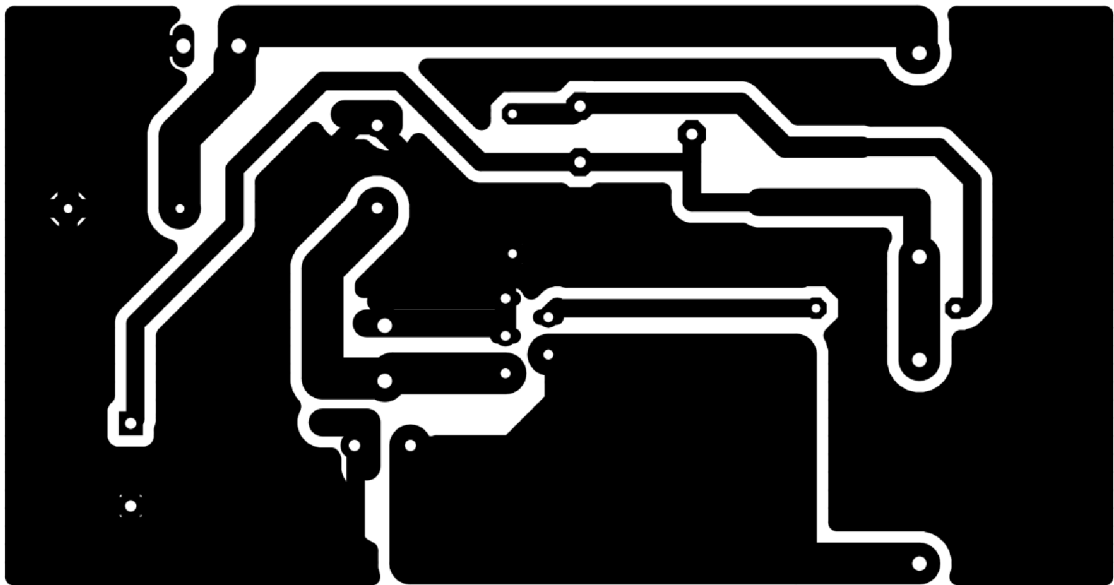
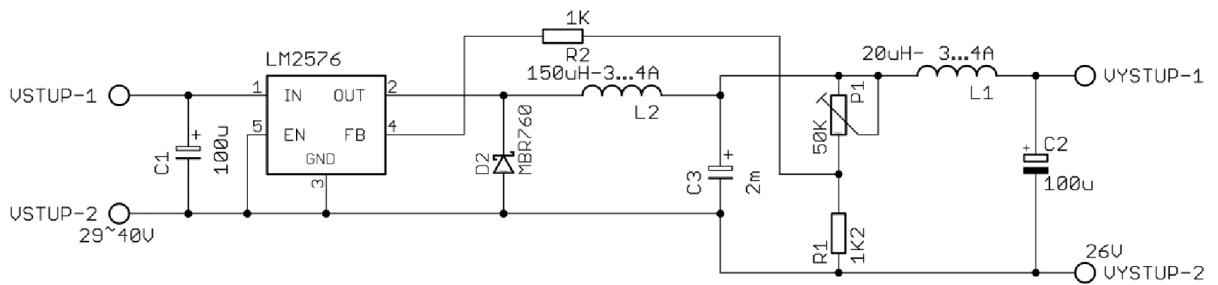
Příloha 8: Horní a spodní osazovací plán desky plošného spoje pro zesilovač



Příloha 9: Schéma zapojení, návrh desky plošného spoje a osazovací plán pro modul usměrňovače napájecího zdroje



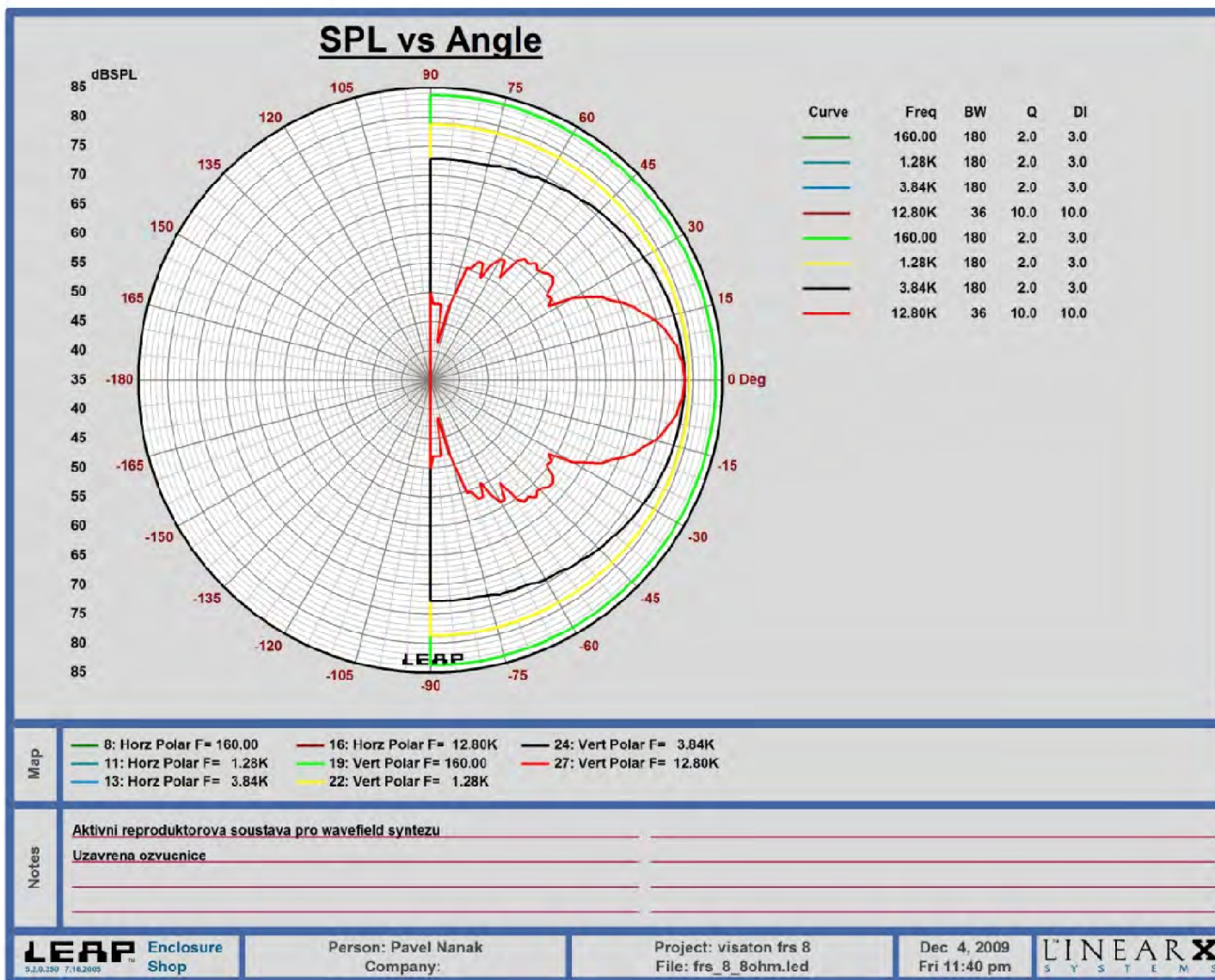
Příloha 10: Schéma zapojení, návrh desky plošného spoje a osazovací plán pro modul stabilizátoru napájecího zdroje







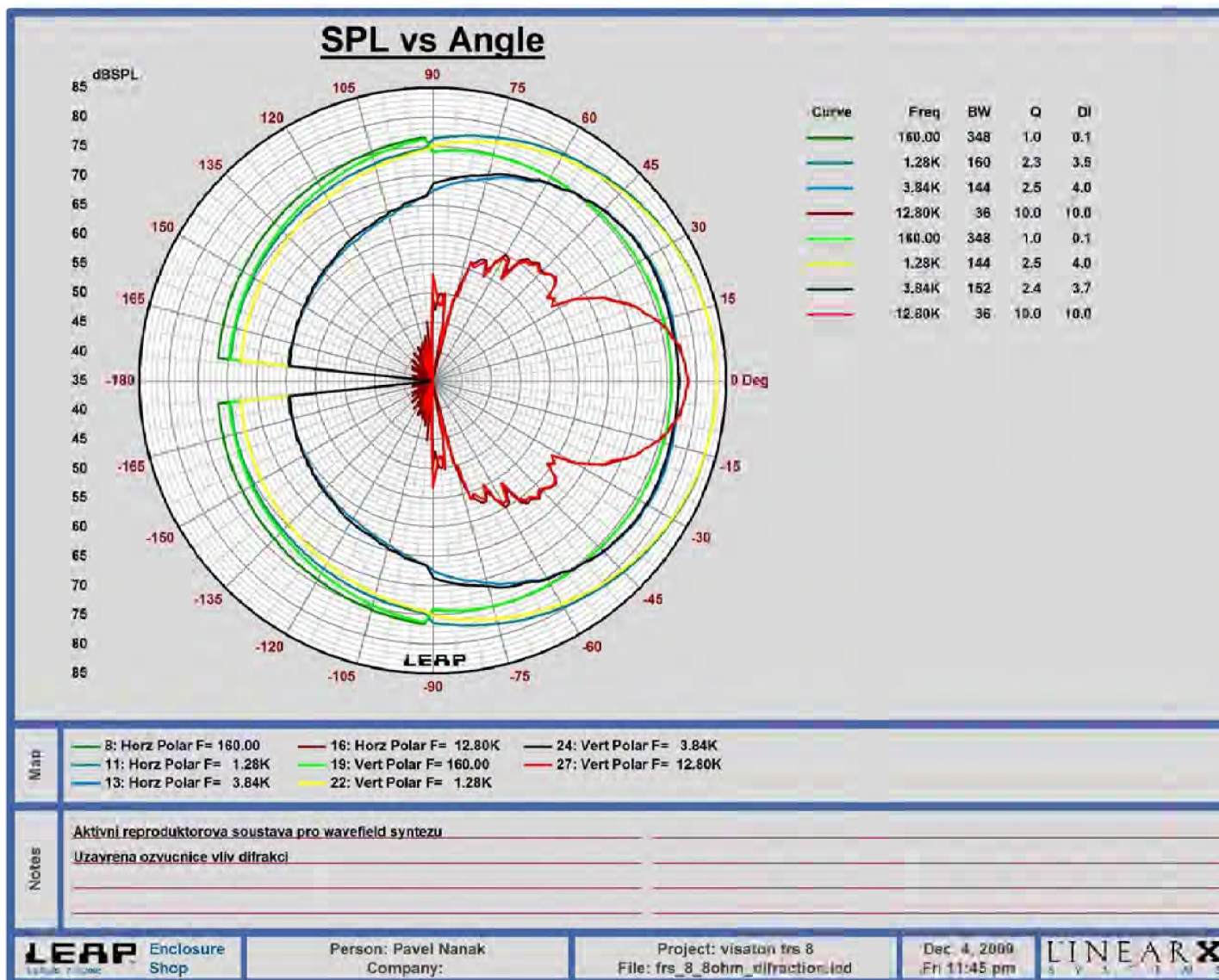
Příloha 11: Modulová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice, odsimulována v LEAP-5



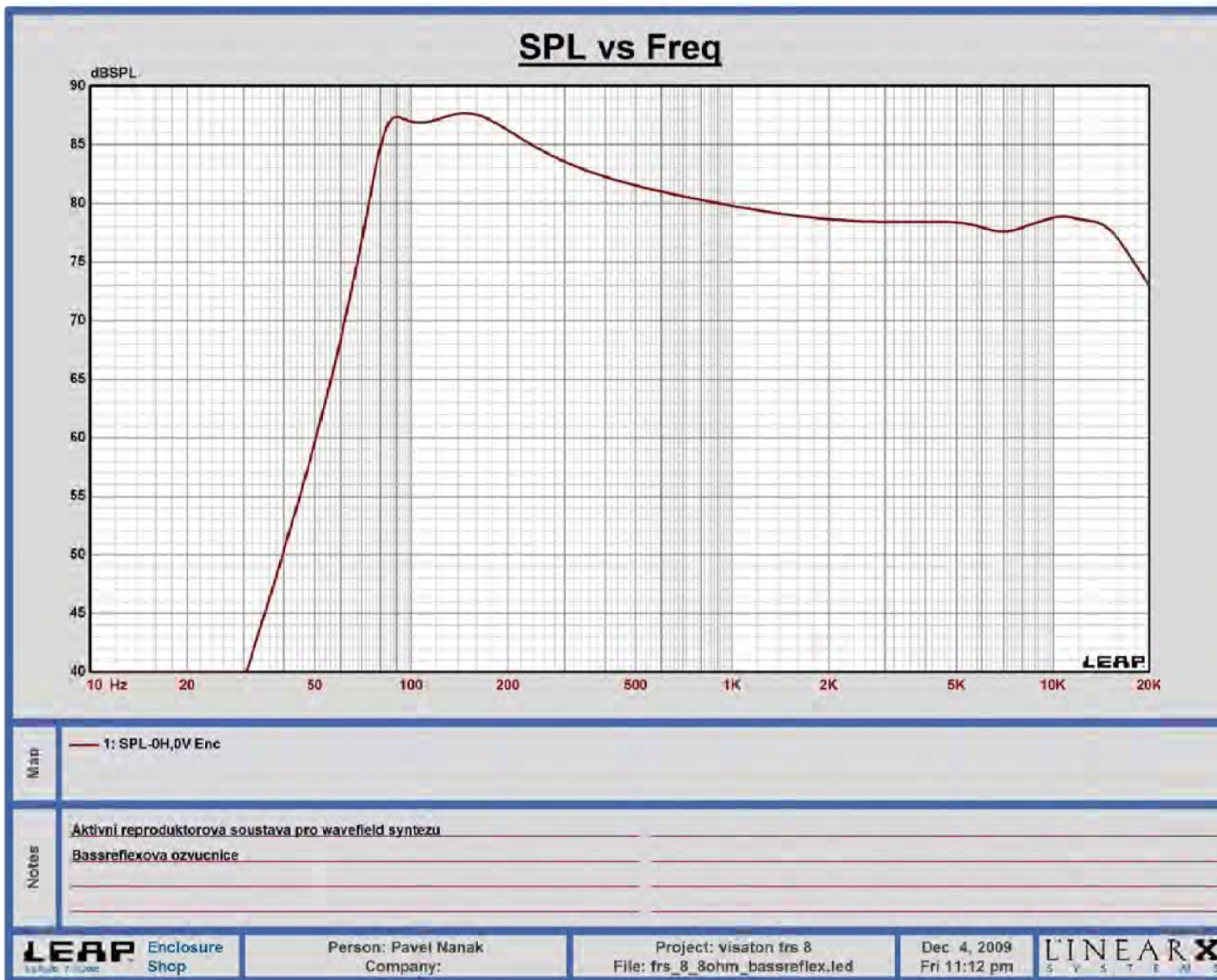
Příloha 12: Směrová charakteristika uzavřené ozvucnice, odsimulována v LEAP-5



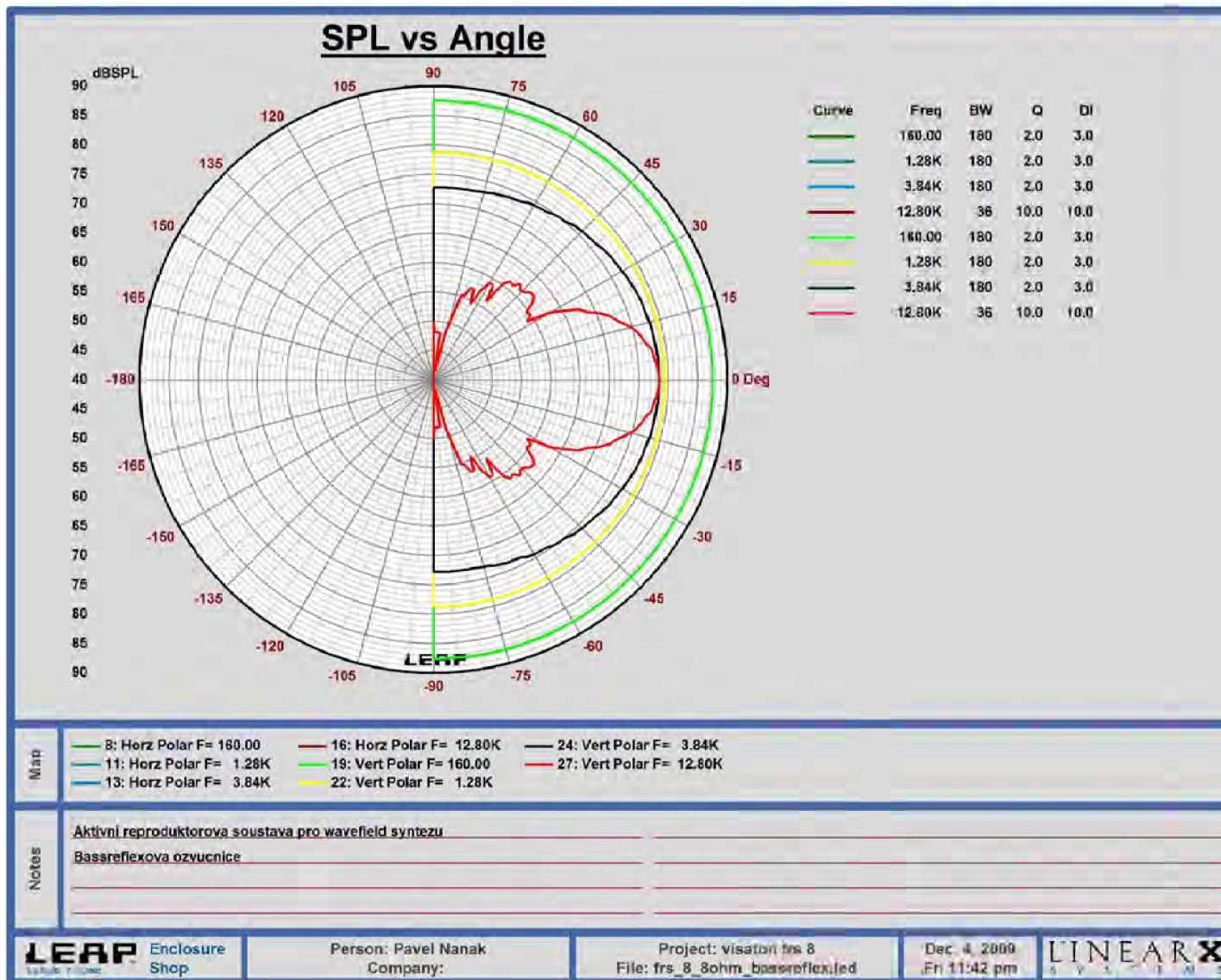
Příloha 13: Modulová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice s vlivem difrakcí, odsimulována



Příloha 14: Směrová charakteristika uzavřené ozvučnice s vlivem difrakcí, odsimulována v LEAP-5



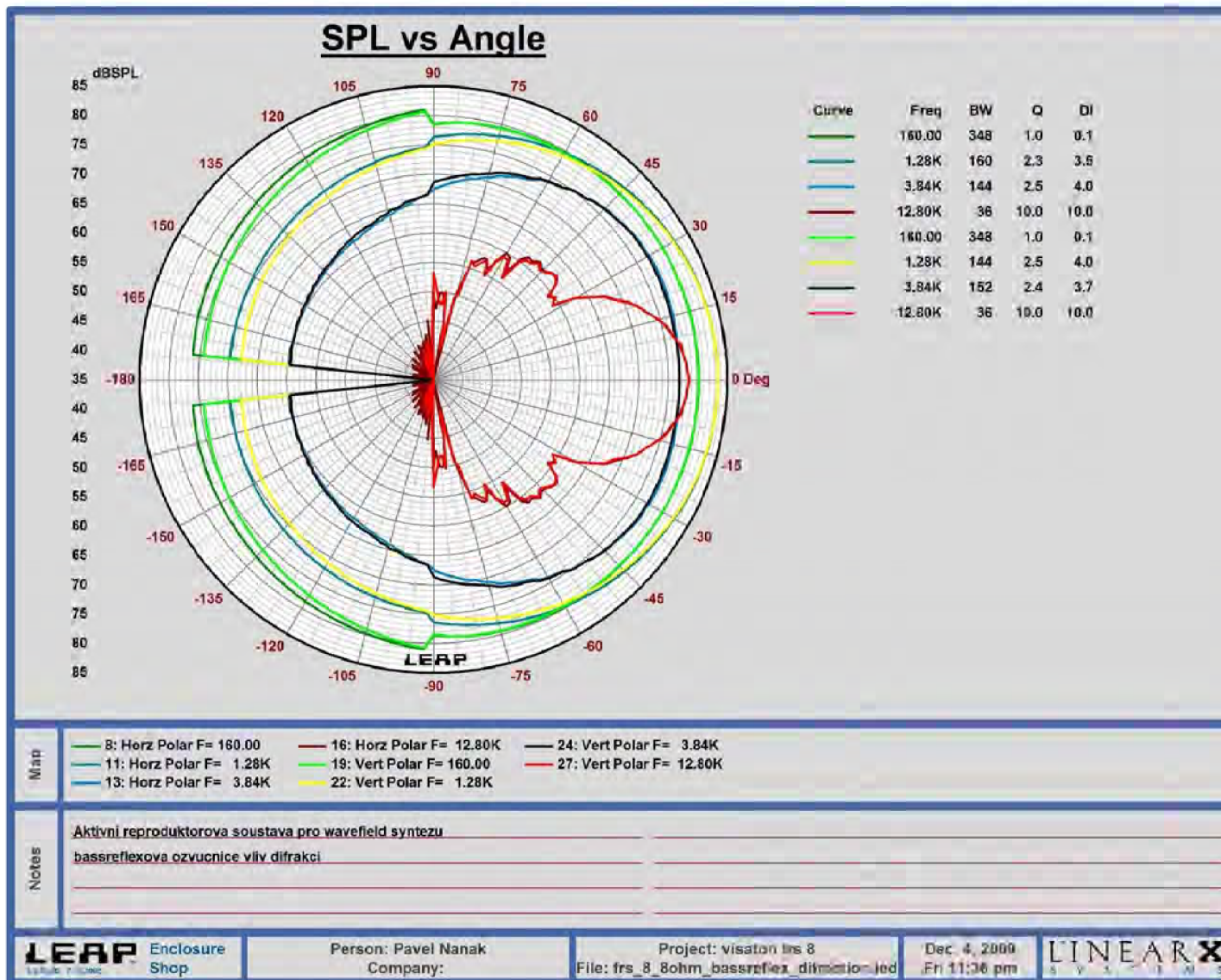
Příloha 15: Modulová kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice, odsimulována v LEAP-5



Příloha 16: Směrová charakteristika bassreflexové ozvučnice, odsimulována v LEAP-5



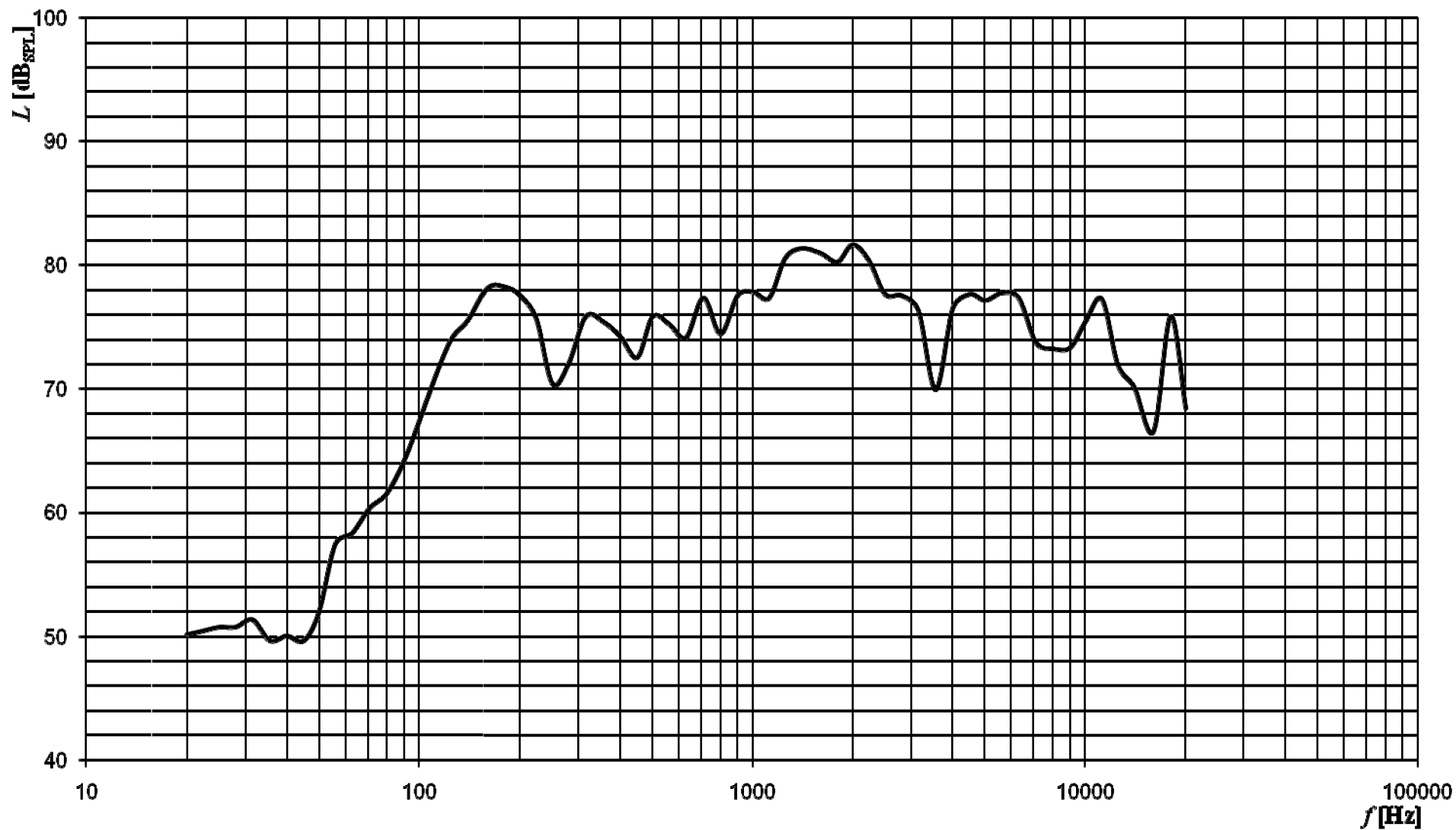
Příloha 17: Modulová kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice s vlivem difrakcí, odsimulována v LEAP-5



Příloha 18: Směrová charakteristika bassreflexové ozvučnice s vlivem difrakcí, odsimulována v LEAP-5

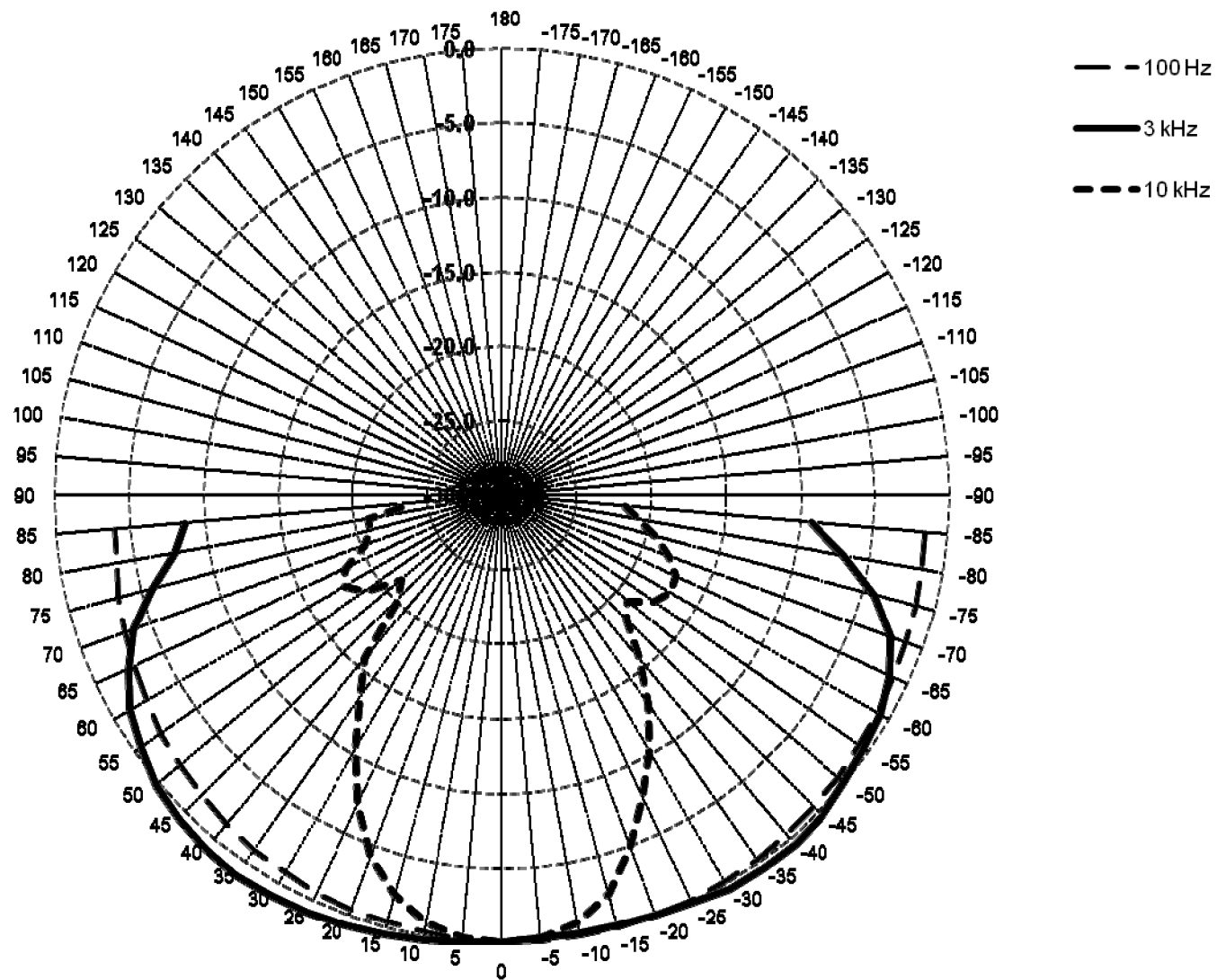


## Modulová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice



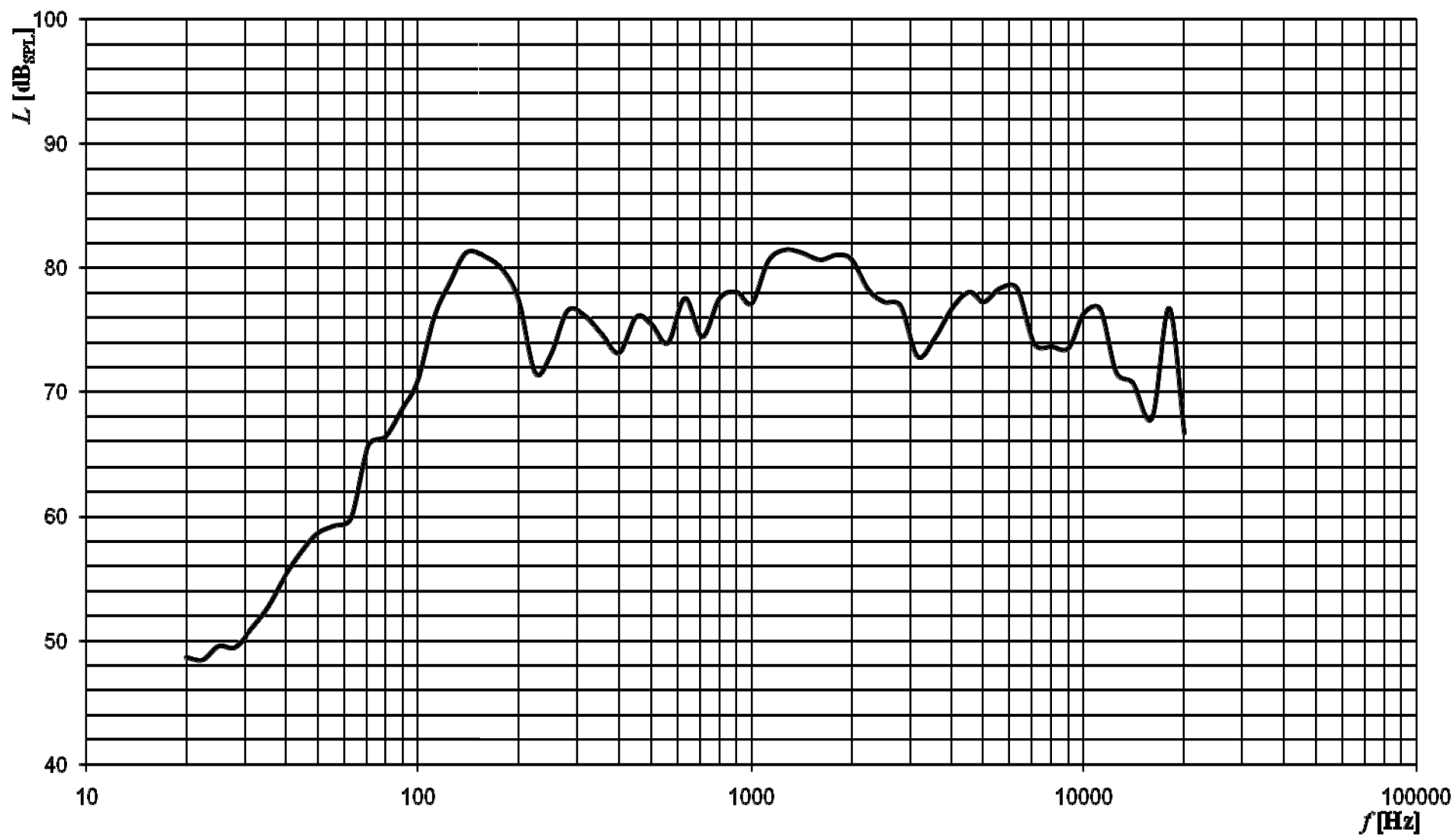
Příloha 19: Modulová kmitočtová charakteristika uzavřené ozvučnice změřená na zkonstruované soustavě

## Směrové charakteristiky uzavřené ozvučnice



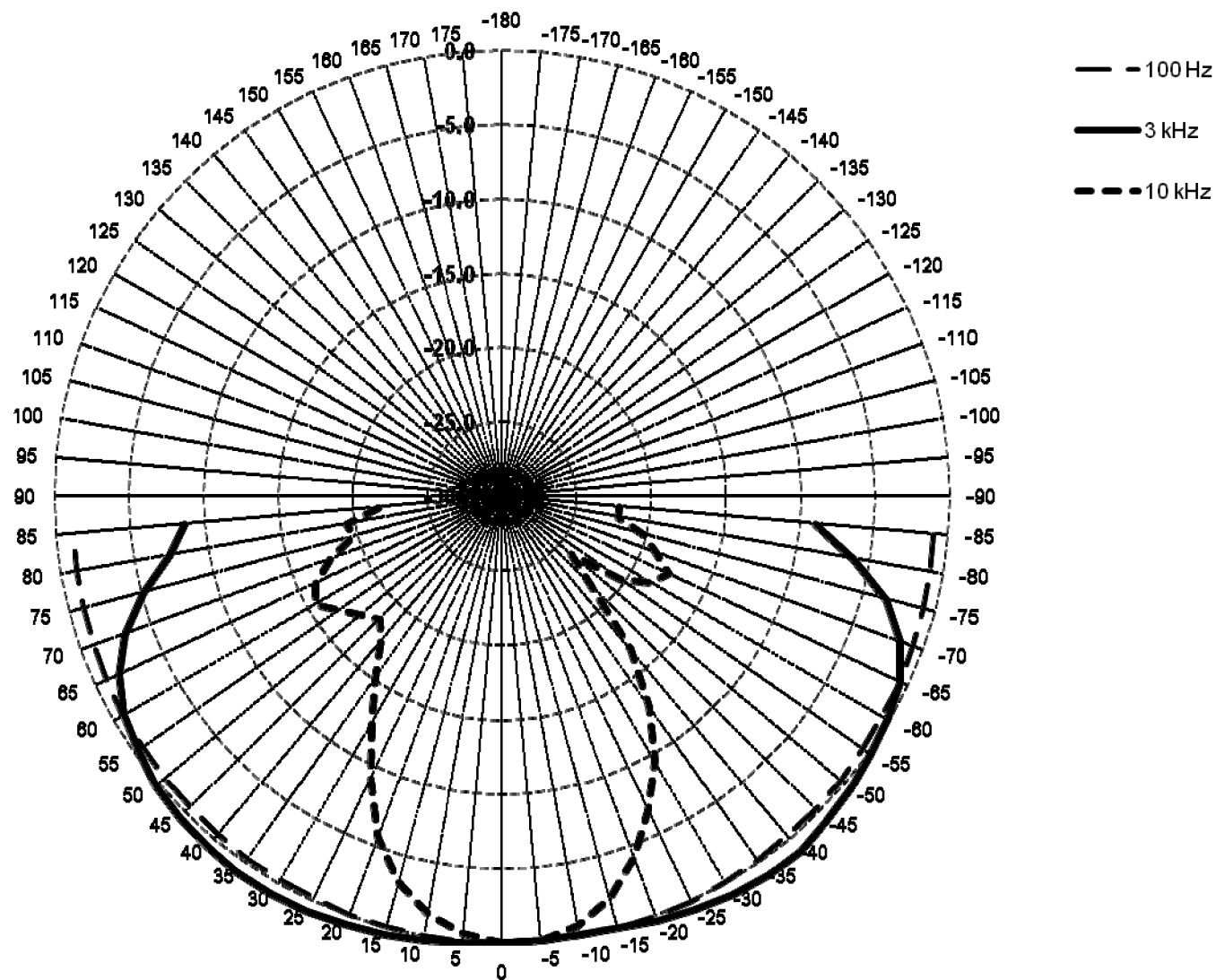
Příloha 20: Směrové charakteristiky uzavřené ozvučnice změřené na zkonstruované soustavě

## Modulová kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice

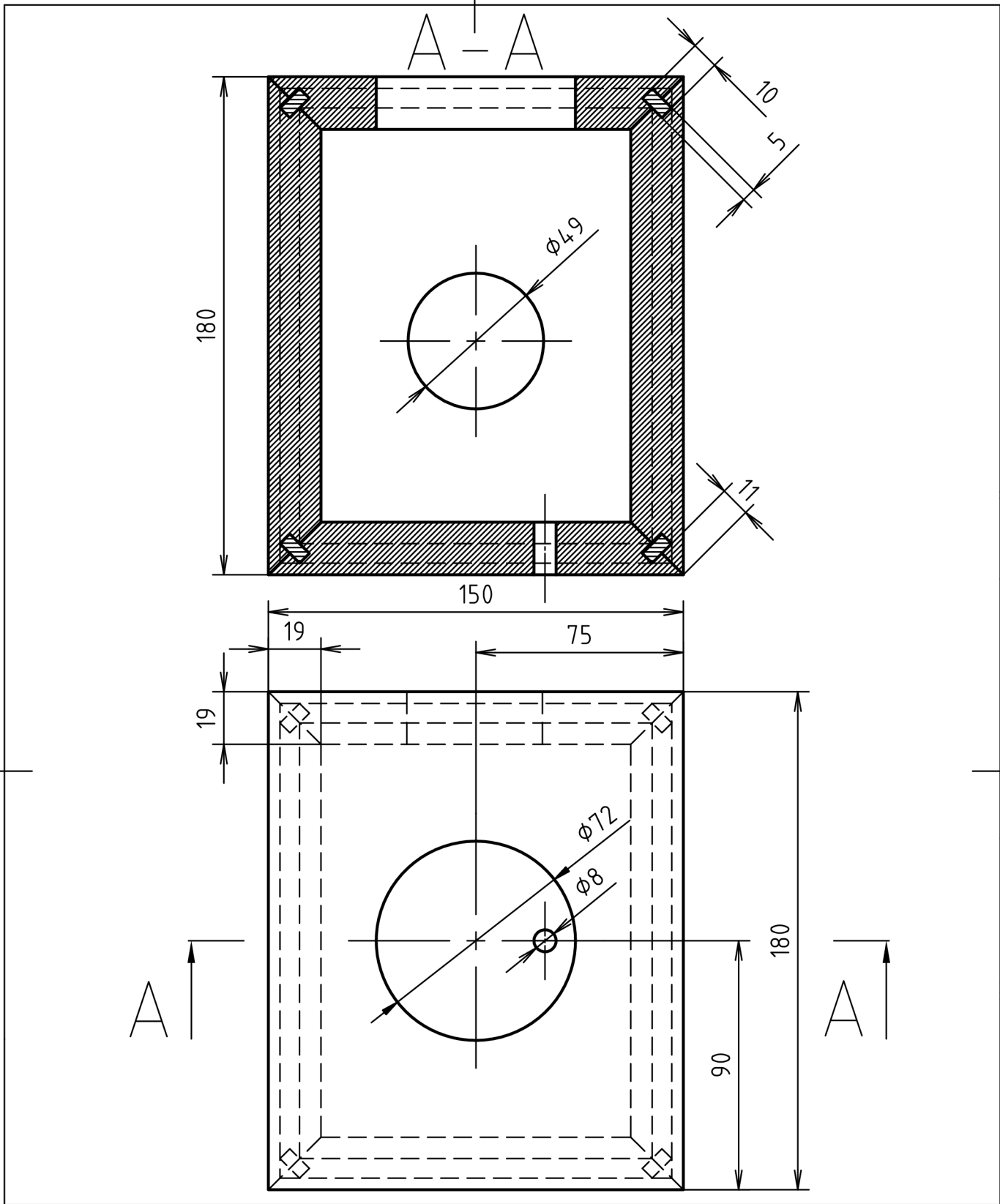


Příloha 21: Modulová kmitočtová charakteristika bassreflexové ozvučnice změřená na zkonstruované soustavě

## Směrové charakteristiky bassreflexové ozvučnice



Příloha 22: Směrové charakteristiky bassreflexové ozvučnice změřené na zkonstruované soustavě



Příloha 23: Výkres bassreflexové ozvučnice

Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost
				1:2	Tolerování
					Promítání
Materiál MDF	Polotovary DESKA MDF	Hmotnost	kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
VUT FEKT UTKO	Druh dokumentu	VYKRES		Název	
	Kreslil	NANAK		OZVUCNICE_BASSREFLEX	
	Schválil			Číslo dokumentu	
	Datum vydání	27.5.2010		106663_NANAK_VUT	