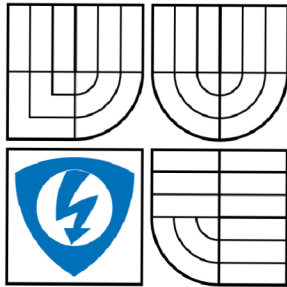


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA S VARIABILNÍ KMITOČTOVOU VÝHYBKOU

LOUDSPEAKER BOX WITH VARIABLE CROSSOVER FREQUENCY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

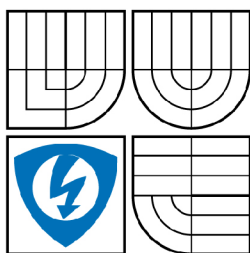
MARTIN TOMÁŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Martin Tomášek

**ID:** 72789

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

### Reproduktorová soustava s variabilní kmitočtovou výhybkou

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte dvoupásmovou reproduktorovou soustavu středních rozměrů v uspořádání D'Appolito. Zvolte vhodné reproduktory, proveďte výpočet objemu reproduktorové skříně, rozmístění reproduktorů na ozvučnici a navrhněte konstrukci skříně včetně opatření pro tlumení akustických vln uvnitř skříně. Navrhněte pro tuto soustavu výkonovou (pasivní) kmitočtovou výhybku a desku plošných spojů pro její zapojení. Soustavu realizujte a v bezodrazové komoře změřte její parametry, zejména kmitočtovou a směrovou charakteristiku. Výsledky měření porovnejte se simulacemi v návrhovém programu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [ 1 ] BENSON, K., B. Audio Engineering Handbook. McGraw-Hill, 1988. 1040 p. ISBN 0-07-004777-4
- [ 2 ] SÝKORA, B. "Stavíme reproduktorové soustavy", 1. - 48. díl. A Radio 10/97 - 9/2001.
- [ 3 ] TOMAN, K. Reproduktory a reprosoustavy, 1 díl. 2003.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 2.6.2009

**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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá reproduktorovou soustavou středních rozměrů v uspořádání D'Appolito. Cílem této práce je návrh a vlastní realizace této reproduktorové soustavy, což zahrnuje výběr vhodných reproduktorů a jejich rozmístění na navržené ozvučnici včetně návrhu variabilní výkonové (pasivní) výhybky. Text je rozdělen do několika kapitol, ve kterých jsou popisovány jednotlivé části návrhu.

V první polovině je popsána stručně teorie základních principů funkce reproduktoru a konstrukce reproduktorových soustav, zejména dvoupásmových, a specifických vlastností reproduktorových soustav v uspořádání D'Appolito. Dále jsou popsány funkce reproduktorových výhybek používaných v reproduktorových soustavách a předpoklady pro jejich konstrukci. V druhé polovině je již popsána vlastní konstrukce ozvučnice a reproduktorové výhybky. V závěru jsou graficky znázorněny naměřené údaje kmitočtové charakteristiky a několik směrových charakteristik pro různé dělicí kmitočty.

**Klíčová slova:** D'Appolito, reproduktorová soustava, reproduktorová výhybka, směrová charakteristika, kmitočtová charakteristika, ozvučnice

## Abstract

This bachelor's thesis deals with middle-sized loudspeaker system in D'Appolito configuration. The aim of this thesis is to design and to realize the loudspeaker system, which includes selection of suitable loudspeakers and their position in designed baffle including design of variable crossover frequency. The text is divided into a few sections, where are the points of this project described.

In the first half there are briefly described basic principles of loudspeakers and design loudspeaker systems, especially 2-way loudspeakers, and specific properties of D'Appolito configuration. Then there are described principles of frequency crossovers used in loudspeaker systems and what is expected for their construction. In the second half, there is described realization of baffle itself and variable frequency crossover. Because this thesis concurs to semestral thesis, there is also a chapter about simulation. In the end there are diagrammatized the measured data of frequency and dispersion characteristics and a few dispersion characteristics for different crossing frequencies.

**Keywords:** D'Appolito, loudspeaker system, frequency crossover, frequency characteristic, dispersion characteristic, baffle

TOMÁŠEK, M. *Reproduktorová soustava s variabilní kmitočtovou výhybkou*. Brno:  
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.  
59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.



## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA S VARIABILNÍ KMITOČTOVOU VÝHYBKOU“ 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 .....

.....

(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 .....

.....  
(podpis autora)

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>ELEKTROAKUSTICKÉ MĚNIČE</b>	<b>11</b>
	2.1 CHARAKTERISTICKÁ CITLIVOST A PŘÍKON REPRODUKTORU .....	11
	2.2 IMPEDANCE .....	12
<b>3</b>	<b>OZVUČNICE REPRODUKTORU</b>	<b>13</b>
	3.1 PRAKTICKÝ VÝPOČET OZVUČNICE .....	15
	3.2 KONSTRUKCE REPRODUKTOROVÝCH SKŘÍŇÍ .....	17
	3.2.1 <i>Tlumení stojatých vln</i> .....	18
	3.3 UMÍSTĚNÍ REPRODUKTORŮ V OZVUČNICI .....	18
<b>4</b>	<b>REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY</b>	<b>19</b>
	4.1 FUNKCE REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY .....	19
	4.2 STANOVENÍ DĚLICÍCH KMITOČTŮ .....	21
	4.3 STANOVENÍ APROXIMACÍ FILTRŮ .....	21
	4.4 VÝPOČET HODNOT SOUČÁSTEK PRO REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY .....	23
	4.5 KOMPENZACE INDUKČNOSTI A REZONANCE .....	25
	4.6 VYROVNÁNÍ CITLIVOSTI REPRODUKTORŮ .....	26
	4.7 PÓLOVÁNÍ REPRODUKTORŮ .....	27
	4.8 VOLBA PARAMETRŮ SOUČÁSTEK PRO REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY .....	28
<b>5</b>	<b>SIMULACE</b>	<b>28</b>
	5.1 PARAMETRY REPRODUKTORŮ NUTNÉ PRO SIMULACI .....	29
	5.2 SIMULACE NAVRŽENÉ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY .....	30
<b>6</b>	<b>VLASTNÍ NÁVRH REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY</b>	<b>31</b>
	6.1 VÝBĚR REPRODUKTORŮ .....	31
	6.2 NÁVRH OZVUČNICE .....	32
	6.2.1 <i>Výpočet rozměrů ozvučnice a její konstrukce</i> .....	32
	6.2.2 <i>Rozmístění reproduktorů</i> .....	33
	6.3 NÁVRH REPRODUKTOROVÉ VÝHYBKY .....	34
	6.3.1 <i>Výpočet parametrů reproduktorové výhybky</i> .....	36
<b>7</b>	<b>MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>46</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>47</b>
	<b>PŘÍLOHY</b>	<b>49</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1.1: Reproduktorová soustava Odin MK3 norské firmy Seas v uspořádání D'Appolito.....	10
Obr. 3.1: Vznik akustického zkratu (otevřená skříňová ozvučnice).....	14
Obr. 3.2: Analogické schéma vestavění reproduktoru do ozvučnice. ....	15
Obr. 3.3: Spojování stěn na tupo, na pokos, na zámek a na zámek se zkosením, ukázka utěsnění koutů pomocí silikonu, viz [1].....	17
Obr. 3.4: Reproduktorová soustava v uspořádání D'Appolito. ....	19
Obr. 4.1: Znázornění výkonové reproduktorové výhybky v řetězci distribuce signálu od zdroje signálu k posluchači. ....	20
Obr. 4.2: Porovnání přenosu amplitud jednotlivých aproximací při dělicím kmitočtu 3 kHz. ....	23
Obr. 4.3: Zapojení jednotlivých filtrů používaných v reproduktorových výhybkách.....	24
Obr. 4.4: Znázornění zapojení schémat pro různé druhy kompenzace reproduktoru.....	25
Obr. 4.5: Kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy při nepřepřelovaném vysokotónovém reproduktoru s použitím výhybky 12 dB/oktávu. ....	27
Obr. 5.1: Ukázka čtení hodnot z grafu v programu Graph Reader 2.3.....	29
Obr. 5.2: Modulová kmitočtová charakteristika - simulace. ....	30
Obr. 6.1 Schéma navržené výhybky s případnými korekcemi. ....	35
Obr. 6.2: Přenos filtrů pro dolní a horní propust při použití reproduktoru.....	37
Obr. 7.1: Naměřené impedanční charakteristiky včetně fáze.....	39
Obr. 7.2: Kmitočtová charakteristika navržené reproduktorové soustavy.....	40
Obr. 7.3: Detail modulové kmitočtové charakteristiky vysokotónového reproduktoru. ....	40
Obr. 7.4: Vertikální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 2800 Hz.....	41
Obr. 7.5: Horizontální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 2800 Hz.....	41
Obr. 7.6: Vertikální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 2000 Hz.....	42
Obr. 7.7: Horizontální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 2000 Hz.....	42
Obr. 7.8: Vertikální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 4000 Hz.....	43
Obr. 7.9: Horizontální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 4000 Hz.....	43
Obr. 7.10: Vertikální směrová charakteristika pro různé dělicí kmitočty. ....	44
Obr. 7.11: Horizontální směrová charakteristika pro různé dělicí kmitočty. ....	44
Obr. 7.12: Vertikální směrová charakteristika pro 2800 Hz při různých dělicích kmitočtech.....	45
Obr. 7.13: Horizontální směrová char. pro 2800 Hz při různých dělicích kmitočtech. ....	45

## Seznam tabulek

Tab. 3.1: Aproximace pro výpočet ozvučnice.....	16
---	----

# 1 Úvod

V úvodu by bylo vhodné objasnit název D'Appolito. Tento název pro reproduktorovou soustavu pochází od konstruktéra jménem Dr. Joseph D'Appolito, který v roce 1983 představil toto atypické uspořádání reproduktorů v reproduktorové soustavě, zobrazené na obr. 1.1. Je mezinárodně uznávaným odborníkem v oblasti akustiky, konstrukce reproduktorových soustav a výhybek, působil v řadě organizací po celém světě jako konzultant a mimo jiné je také autorem řady knih zabývajících se touto tematikou a článků, které dokazují jeho hluboké porozumění designu reproduktorových soustav a výhybek. Více informací lze nalézt v [4].

Tato dvoupásmová reproduktorová soustava je na první pohled specifická svým rozmístěním reproduktorů na přední straně ozvučnice. Je tvořena dvěma basovými případně středobasovými reproduktory, které jsou symetricky uspořádány kolem výškového reproduktoru, přičemž výškový reproduktor je nejčastěji umístěn ve vertikální ose hlubokotónových měničů, ale můžeme se setkat i s konstrukcemi, kdy je umístěn mimo osu. Aby však byla dodržena správná funkčnost této konstrukce, musí být dodrženy určité konstrukční předpoklady. Taková reproduktorová soustava pak má při dodržení těchto předpokladů vertikálně symetrickou směrovou charakteristiku. Volbou strmosti použité výhybky se pak mění pouze její zvlnění, které je však pro vertikální směr většinou nízké. Díky této vlastnosti se uspořádání D'Appolito používá v běžných sloupových nebo regálových soustavách. Na obr. 1.1 je zobrazena reproduktorová soustava v uspořádání D'Appolito. Více informací lze nalézt na stránkách firmy Seas [5].



**Obr. 1.1: Reproduktorová soustava Odin MK3 norské firmy Seas v uspořádání D'Appolito.**

## 2 Elektroakustické měniče

Obecnou podstatou elektroakustického měniče je přeměna elektrického signálu v akustický signál nebo opačně. K této přeměně dochází prostřednictvím mechanických prvků. Účinnost této přeměny je však poměrně malá, takže se většina elektrické energie mění na teplo. Dalo by se říci, že reproduktory jsou v podstatě topná tělesa, jejichž vedlejším produktem činnosti je zvuk. Jestliže se mění elektrický signál na akustický signál, pak hovoříme o vysílači, kterým může být reproduktor nebo sluchátko. Reproduktor tedy mění elektrický signál na mechanický pohyb a využívá některého z principů přeměny elektrické energie v mechanickou. Reproduktory pak využívají princip elektromagnetický, elektrostatický, piezoelektrický, magnetostrikční či elektrodynamický, který se využívá nejčastěji.

Mezi hlavní části elektrodynamického měniče patří magnet, pólové nástavce a cívka. Proud procházející cívkou vytváří magnetické pole, které se sčítá nebo odečítá s magnetickým polem tvořeným trvalým magnetem, a vzniká tak proměnná síla, která působí na cívku.

### 2.1 Charakteristická citlivost a příkon reproduktoru

Charakteristická citlivost a příkon reproduktoru jsou jedny ze základních a prvotních požadovaných parametrů při konstrukci reproduktorových soustav. U reproduktorů se účinnost produkce zvuku udává jako veličina charakteristická citlivost. Vyjadřuje jaký akustický tlak vytvoří reproduktor ve vzdálenosti 1 m při zdánlivém příkonu 1 VA (příkon je zdánlivý, protože reproduktor není jednoduchá zátěž odporového charakteru). Nejčastěji se tyto hodnoty pohybují mezi 84 a 94 dB u reproduktorů pro spotřební elektroniku.

Reproduktor, jehož charakteristická citlivost je 90 dB, vytvoří ve vzdálenosti 1 m od membrány akustický tlak 110 dB, na což je potřeba elektrický výkon 100 W. Po velkou většinu provozní doby využíváme asi 1 % výkonové možnosti reproduktoru, zbylých 99% výkonu je však potřeba pro věrnou reprodukci při krátkodobých špičkách. Má-li reproduktorová soustava citlivost menší než např. zmíněných 90 dB, je pro stejný akustický tlak potřeba vyšší elektrický příkon.

Jmenovitý příkon reproduktoru (případně reproduktorové soustavy) je dalším ze základních údajů. Udává se podle doporučení IEC 268 pro speciální testovací program, který má v dlouhodobém průměru obdobný charakter jako hudební signál. Tento příkon reproduktoru se stanoví podle vzorce (2.1)

$$P = \frac{U^2}{Z}, \quad (2.1)$$

kde  $U$  je efektivní hodnota napětí (dlouhodobě průměrovaná) a  $Z$  je jmenovitá impedance reproduktoru. Jmenovitý příkon je pak určen jako to, co reproduktor vydrží po dobu alespoň sto

hodin, aniž by došlo ke změně vlastností. Zatížitelnost měniče je míněna jako velikost, kterou je možné přivést na vstup soustavy osazené daným měničem a vybavené patřičnou výhybkou, aniž by se reproduktor poškodil za předpokladu, že signál přivedený na vstup reproduktorové soustavy má charakter přirozeného signálu.

Příkon reproduktoru je někdy také udáván jako tzv. sinusový nebo RMS sinusový. Vyjadřuje maximální velikost příkonu, kterou lze měnič přeměňovat na teplo bez poškození po prakticky neomezenou dobu. U basových reproduktorů se jedná o desítky wattů, zatímco u vysokotónových reproduktorů do 10 wattů. Tento údaj však slouží především pro potřeby zkušebních pracovišť ke stanovení nejtvrděších podmínek, při kterých je pak možno měřit krajní hodnoty např. zkreslení a kmitočtové charakteristiky.

Zejména u basových reproduktorů jsou omezení dána mechanickou konstrukcí měniče. Kmitací systém reproduktoru je uváděn do pohybu silami, které mohou v určitých případech jít až na hranici pevnosti použitých materiálů či jejich únavě. Mohou se však poškodit také nadměrnou výchylkou membrány měniče. Jeho maximální výchylku  $y$  můžeme pomocí [1] vypočítat při jistém známém akustickém výkonu  $P$  a ploše membrány  $S$  z rovnice (2.2) pro akustický výkon reproduktoru

$$y = \frac{\sqrt{P}}{(S \cdot f^2 \cdot \sqrt{k})}, \quad (2.2)$$

kde konstanta  $k$  vyjadřuje různé fyzikální veličiny, vztahující se k prostředí, ve kterém se zvuk šíří. Z uvedené rovnice pak vyplývá, že při konstantní ploše membrány a konstantnímu výkonu je výchylka nepřímo úměrná druhé mocnině kmitočtu, což má za následek prudké zvětšování výchylky směrem k nižším kmitočtům. Proto se basové reproduktory meších rozměrů musí konstruovat tak, aby měly větší maximální výchylku nebo menší maximální výkon. V technických parametrech reproduktorů se uvádí zpravidla velikost maximální výchylky jako maximální rozkmit (špička – špička).

## 2.2 Impedance

Velmi důležitým parametrem u reproduktorů je impedance. Pro reproduktory a reproduktorové soustavy se běžně uvádí jmenovitá impedance v ohmech (např. 4, 6, 8). Ve skutečnosti je však impedance reproduktoru závislá na kmitočtu a přesné zobrazení nám podává až závislost komplexní (modulové a fázové) impedance na kmitočtu. Tato závislost má pro jeden dynamický reproduktor charakteristický průběh s jedním maximem a jedním minimem a pozvolným nárůstem směrem k vyšším kmitočtům. Maximum odpovídá rezonančnímu kmitočtu reproduktoru, což zpravidla omezuje oblast použitelnosti směrem k nižším kmitočtům. Tento kmitočet je určen mechanickými vlastnostmi reproduktoru, závisí na hmotnosti a poddajnosti kmitacího systému. U hlubokotónových reproduktorů může posloužit tato hodnota jako ukazatel



jakosti. Čím nižší je tento kmitočet, tím je reproduktor kvalitnější. Minimum, které se nachází ihned za rezonančním kmitočtem směrem k vyšším kmitočtům udává jmenovitou impedanci reproduktoru. Dále se velikost impedance směrem k vyšším kmitočtům stále zvětšuje vlivem indukčnosti kmitací cívky, která je však méně strmá než by odpovídalo prosté indukčnosti, jejíž impedance (induktance) je kmitočtu přímo úměrná. Směrem k nižším kmitočtům od rezonančního kmitočtu se impedance zmenšuje a přibližuje se stejnosměrnému odporu kmitací cívky reproduktoru.

### 3 Ozvučnice reproduktoru

Ozvučnice plní funkci reproduktorové skříně má vliv na chování celé reproduktorové soustavy a výslednou kmitočtovou charakteristiku. Základní a dalo by se říct nejdůležitější funkcí ozvučnice je zamezení jevu zvaného akustický zkrat, viz obr. 3.1 dle [2], pro jehož vysvětlení je potřeba vysvětlit funkci reproduktoru.

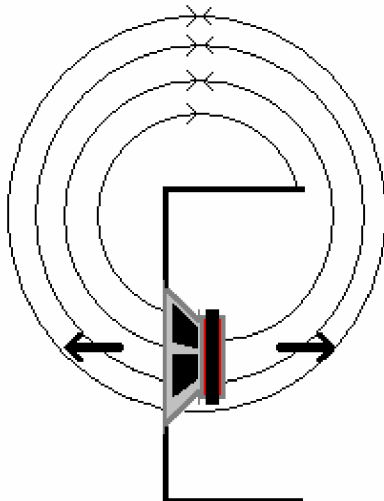
U elektrodynamického reproduktoru je membrána pružně zavěšena na pevném koši, na kterém je upevněn také magnetický obvod. S membránou je pevně spojena kmitací cívka. Působí-li na cívku síla, přenáší se dále na membránu a ta se vychyluje ven z koše, ale i dovnitř. Jestliže se jedná o pohyb, kdy se membrána vychyluje ven, a tím pádem dál od koše, vzduch před membránou se stlačuje a v blízkosti zadní plochy se zředňuje, vzniká tedy zvuková vlna na obou stranách avšak tlakové změny v blízkosti přední a zadní strany membrány mají opačná znaménka. Jeden reproduktor se tak chová jako dvojice zářičů, které jsou od sebe minimálně vzdáleny a pracují v protifázi. Setkají-li se tyto vlny, vzájemně se ruší. Tento jev nastává především na nízkých kmitočtech, protože vlnová délka vyzařovaných signálů je podstatně větší než rozměry membrány. Vlny se tak šíří jako kulové do obou polorovin v okolním prostoru reproduktoru a vzájemně se odečítají. Proto je potřeba použitím ozvučnice zabránit šíření vln vyzářených zadní stranou membrány.

Nejčastěji se používá pro konstrukci reproduktorových soustav ozvučnice zcela uzavřená, která musí mít dostatečně pevné, neprůzvučné stěny a musí být dokonale utěsněna, aby zůstala veškerá energie zadní vlny uvnitř ozvučnice a přeměnila se poté na teplo. Tato konstrukce je tedy poměrně účinná k potlačení akustického zkratu. Vložení reproduktoru do ozvučnice ovšem dochází k ovlivnění chování reproduktoru.

Vycházíme-li z elektroakustické analogie dle [3], můžeme systém reproduktoru s použitím nejjednoduššího náhradního schématu vyjádřit jako rezonanční obvod znázorněný na obr. 3.2 zahrnující stejnosměrný odpor kmitací cívky  $R_s$ , ekvivalent mechanického tlumení kmitacího systému  $R_m$ , ekvivalent tuhosti závěsu membrány  $L_m$  a ekvivalent hmotnosti kmitacího systému  $C_m$ .

Pokud vestavíme reproduktor do uzavřené ozvučnice o určitých rozměrech, bude docházet v ozvučnici ke stlačení vzduchu při pohybu membrány dovnitř a rozpínání při pohybu ven, což se bude jevit jako by měl reproduktor poněkud tužší závěs. V náhradním schématu tuto

skutečnost vyjádříme pomocí přidané indukčnosti  $L_b$ , připojené paralelně k indukčnosti  $L_m$  představující tuhost neboli poddajnost závěsu.



**Obr. 3.1: Vznik akustického zkratu (otevřená skříňová ozvučnice).**

Prakticky se toto vestavění do ozvučnice projeví zvýšením rezonančního kmitočtu celkové reproduktorové soustavy než u reproduktoru, který se nachází volně v prostoru. Výsledný rezonanční kmitočet soustavy reproduktoru a ozvučnice je podle [1] dán vztahem (3.1)

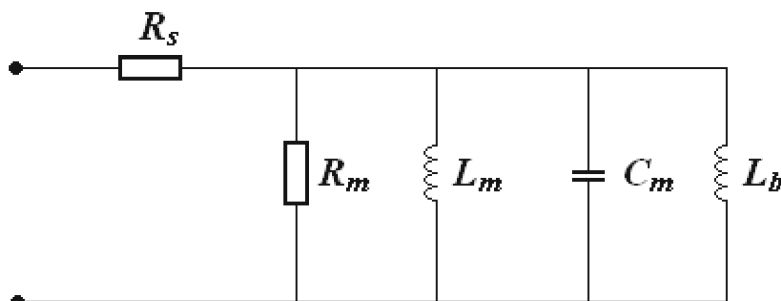
$$f_r = f_r \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{L_m}{L_b}\right)}, \quad (3.1)$$

kde  $f_r$  je rezonanční kmitočet samotného reproduktoru. V praxi se však běžně nesetkáme s parametry v podobě ekvivalentních veličin, proto bylo zavedena veličina ekvivalentní objem reproduktoru  $V_{as}$ . Nahrazuje veškerou poddajnost kmitacího systému tuhostí fiktivního vzduchového polštáře uzavřeného v jistém objemu za reproduktorem. Změna rezonančního kmitočtu je pak vyjádřena pomocí [1] upraveným vzorcem (3.2)

$$f_{rb} = f_r \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{V_{as}}{V_b}\right)}. \quad (3.2)$$

Je-li navíc ozvučnice uvnitř vylumena z důvodu potlačení stojatého vlnění, které nastává pro kmitočty o vlnové délce menší než vnitřní rozměry ozvučnice, je nutno počítat také s tímto zmenšením vnitřního objemu ozvučnice. Dalším parametrem, který se mění vestavěním reproduktoru do ozvučnice, je činitel jakosti reproduktoru, který se vždy zvětší. V okolí mezního kmitočtu dojde k navýšení amplitudy reprodukováných signálů, ale také ke snížení charakteristické citlivosti o 6 dB vlivem vyzařování reproduktoru také „za sebe“. Vestavění

reproduktoru do ozvučnice má také pro basový reproduktor ochranou funkci. Pod určitým kmitočtem se zmenšuje maximální výchylka a reproduktor tak snese v tomto pásmu větší výkon.



Obr. 3.2: Analogické schéma vestavění reproduktoru do ozvučnice.

### 3.1 Praktický výpočet ozvučnice

Výpočet rozměrů ozvučnice reproduktoru je obvykle dán potřebným objemem pro hlubokotónový reproduktor. Pokud uvažujeme 2-pásmovou reproduktorovou soustavu, vysokotónový reproduktor má obvykle malé rozměry a nemá přílišný vliv svým vyzařováním dovnitř ozvučnice. Umístíme-li do ozvučnice 2 reproduktory stejného typu, zvětší se teoreticky citlivost o 3 dB avšak reproduktory musí být od sebe vzdáleny maximálně 1/10 vlnové délky odpovídající maximálnímu reprodukovánému kmitočtu, což lze v praxi poněkud těžce docílit. Uvažujeme-li však umístit tyto 2 shodné reproduktory do ozvučnice (jak je typické právě pro konstrukci D'Appolito) je potřeba při výpočtu ozvučnice brát v úvahu dvojnásobný ekvivalentní objem reproduktoru  $V_{as}$ . S přihlédnutím k předešlým zásadám můžeme podle [1] k výpočtu objemu ozvučnice použít vzorec (3.3)

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1}, \quad (3.3)$$

kde  $Q_{tc}$  je činitel jakosti celé uzavřené soustavy,  $Q_{ts}$  celkový činitel jakosti reproduktoru a  $V_{as}$  ekvivalentní objem reproduktoru. Celkový činitel jakosti je obvykle dán výrobcem a vyjadřuje v podstatě množství ztrát v případě, že reproduktor hraje při rezonanci. Čím nižší je hodnota  $Q_{ts}$ , tím je zapotřebí menší objem ozvučnice. U reproduktorů se za nízkou hodnotu  $Q_{ts}$  považuje 0,3 a méně, za vysokou 0,5 a více.

V rovnici se však také nachází další parametr a tím je činitel jakosti soustavy. Pomocí tohoto parametru můžeme definovat průběh kmitočtové charakteristiky na dolním okraji vyzařovaného pásma. U uzavřené ozvučnice je průběh v této oblasti klesající se strmostí

12 dB/oktávu, ozvučnice se tedy jeví jako horní propust druhého řádu. S použitím přibližných aproximací tak lze navrhnout zad-li má být kmitočtová charakteristika na dolním okraji plochá nebo s převýšením. Mezi nejčastěji používané patří aproximace uvedené v tabulce 3.1. Pro názornost jsou uvedeny také méně používané aproximace s velkým převýšením.

**Tab. 3.1: Aproximace pro výpočet ozvučnice**

$Q_{tc}$	Název aproximace pro filtry 2.řádu	Převýšení [dB]
0,500	<i>Linkwitz - Riley</i>	0
0,570	<i>Bessel</i>	0
0,707	<i>Butterworth</i>	0
0,800		0,210
0,900		0,690
1,000	<i>Čebyšev - zvlnění 1 dB</i>	1,250
1,129	<i>Čebyšev - zvlnění 2 dB</i>	2,000
1,500		4,030
1,800		5,450

Z uvedené tabulky tedy vyplývají hodnoty převýšení avšak není určeno na kterém kmitočtu. Ten je důležitý z hlediska návrhu ozvučnice, pro jaký účel má být použita. Chceme-li dosáhnout co nejvyrovnanější charakteristiky, volíme aproximace typu Butterworth nebo Bessel. Podle zaměření můžeme určitý kmitočet v této oblasti posílit. Například dle [1] pro středně hlasité systémy jsou důležité kmitočty kolem 80 Hz, kde je vhodné aby byl malý zdvih. Chceme-li vypočítat tento kmitočet, vyjdeme podle [1] z rovnice (3.4)

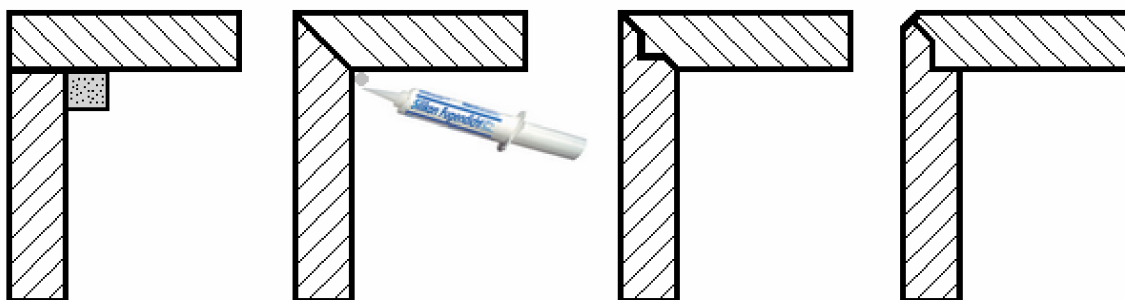
$$f_{\text{peak}} = f_r \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot Q_{tc}^2}}} . \quad (3.4)$$

Pro úplné vykreslení kmitočtové charakteristiky v této oblasti je však potřeba zjistit dolní mezní kmitočet, který odpovídá poklesu kmitočtové charakteristiky o 3 dB od referenční úrovně. Tuto hodnotu vypočítáme dle (3.5).

$$f_{\text{mez}} = f_r \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}} . \quad (3.5)$$

## 3.2 Konstrukce reproduktorových skříní

Pro konstrukci reproduktorové skříně je nejvhodnější materiál, který je pokud možno co nejtužší, nejtěžší a má velké vnitřní tlumení, přičemž výsledná skříň musí být dostatečně pevná a těsná. To lze v praxi přibližně uskutečnit, ale je potřeba vždy volit kompromis mezi např. tuhostí a váhou. Při nedostatečné tloušťce by stěny vnitřními zvukovými vlnami rezonovaly, což by spotřebovalo část vyzařovací energie reproduktoru a došlo k poklesu účinnosti na nízkých kmitočtech.



**Obr. 3.3: Spojování stěn na tupo, na pokos, na zámek a na zámek se zkosením, ukázka utěsnění koutů pomocí silikonu, viz [1].**

Existují materiály, které jsou velmi pevné a také těžké (např. beton, kámen) tudíž by se jevily jako ideální, avšak zcela nevhodné na přenášení. Proto se nejčastěji volí jako materiál k výrobě ozvučnic dřevo. Mezi kvalitní materiály patří tzv. M.D.F. deska (Medium density fibre board) neboli středně hustá deska z vlákniny, která je těžká, má dobré vnitřní tlumení a snadno se opracovává, proto je vhodná pro domácí HiFi soustavy. Nejběžnějším materiálem ke stavbě reproduktorových skříní se používá D.T.D. dřevovláknitá deska. Jelikož se jedná o lisovanou desku z malých kousků dřevoodpadu, má tato deska horší tuhost než M.D.F., ale zase je levnější. Jako další materiály mohou být použity různé překližky (např. z topolu, břízy), které jsou odolné a středně těžké a hodí se tak pro profesionální použití.

Jak už bylo řečeno, při návrhu ozvučnice je důležité zvolit vnitřní objem podle parametrů daného reproduktoru. Volba příslušných rozměrů kupodivu nemá zásadní vliv na ozvučnici při dodržení vnitřního objemu, ale za vhodné se dle [1] doporučuje dodržet míry v poměru stran ( $\text{\textit{s}} \times \text{\textit{v}} \times \text{\textit{h}}$ ) 0,62 : 1,62 : 1 nebo 0,8 : 1,25 : 1. Pro sloupové reproduktorové soustavy je však tyto poměry obtížné dodržet.

Při spojování jednotlivých stěn je třeba dbát přesnosti, aby k sobě stěny přesně přiléhaly, neboť hlubokotónový reproduktor vytváří uvnitř ozvučnice velký tlak a při netěsnostech by docházelo k profukování a tím ke zkreslení. Proto je vhodné utěsnění všech rohů a koutů silikonem, případně použít navíc hranolky k vyztužení. Při konstrukci větších ozvučnic je také

vhodné vyztužení ozvučnice mezi přední a zadní stěnou. Spojení stěn se dle [1] nejčastěji provádí jedním ze čtyř způsobů uvedených na obr. 3.3, které se liší náročností provedení, ale také výslednou těsností a vzhledem. Mezi poměrně běžný způsob patří tzv. „na pokos“.

### 3.2.1 Tlumení stojatých vln

Stěny uvnitř ozvučnice musí být vhodně zatlumeny, aby se omezil vznik stojatých vln. Při pohybu vnitřní strany membrány měniče dojde k vyzáření zvukové vlny, která se odrazí od zadní stěny ozvučnice a narazí zpět na membránu. Je-li tedy zadní stěna vytlumená, je energie odražené vlny menší. Odražené vlny způsobují interference na kmitočtech o vlnové délce srovnatelné s rozměry reproduktorové skříně. Tyto interference se projeví na kmitočtové charakteristice výkyvy vyzářeného výkonu.

Pro tlumení stojatého vlnění je vhodné použít tlumicí rouno s velkou pohltivostí, bavlněnou nebo krejčovskou vatu. Tyto materiály se pevně připevňují ke stěnám (především na zadní, horní a dolní a pravou a levou). Je-li uvnitř ozvučnice v polovině nejdelšího rozměru výztuha, je vhodné ji omotat také tlumicím materiálem, protože je zde největší amplituda stojatého vlnění. Vrstvu materiálu musíme však volit přiměřeně, jelikož se mění vnitřní objem a tím poddajnost.

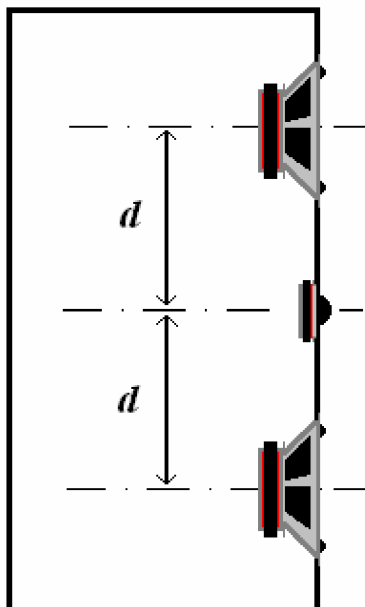
## 3.3 Umístění reproduktorů v ozvučnici

Rozmístění reproduktorů v ozvučnici hraje poměrně důležitou roli. Rozteč os reproduktorů má velký vliv na směrovou charakteristiku. V důsledku fázových posuvů v oblasti styku zvukových vln vznikají interferenční kmity, kterým lze těžce zabránit. Proto je vhodné umístit reproduktory co nejblíže k sobě, chceme-li i zvýšit citlivost použitím více stejných měničů. Musíme však dbát na to, aby vzdálenost mezi otvory pro reproduktory nebyla menší než 40 mm a nebyla tak porušena tuhost přední stěny. Citlivost reproduktorů je závislá na kmitočtu a vzdálenosti os reproduktorů jsou na určitých kmitočtech shodné s vlnovými délkami vyzařovaných kmitočtů. V těchto případech dochází ke směrovému vyzařování.

Zapuštění měničů v přední desce ozvučnice se provádí z důvodu, aby vyzařovací body obou reproduktorů ležely ve stejné rovině. Hlubokotónový reproduktor má vyzařovací osu mírně posunutou směrem k úrovni koše, zatímco vysokotónový reproduktor má vyzařovací osu přibližně v rovině přední desky. Stejnou rovinu lze docílit například zkosením přední stěny. Ta má však také vliv na odraz zvukové vlny a difrakci. Narazí-li vyzářená zvuková vlny na roh ozvučnice, stává se novým sekundárním zdrojem vyzařování, což se projeví rozdílnou fází signálu a zvlněním kmitočtové charakteristiky. Proto je vhodné rohy ozvučnice zaoblit nebo zkosit, což se uplatní již na polovině vlnové délky odpovídající jednotkám kHz pro centimetrové zaoblení.

Pro konstrukci reproduktorové soustavy v uspořádání D'Appolito zobrazené dle [1] na obr. 3.4 je typické rozmístění os středobasových měničů od os výškového reproduktoru na vzdálenost nejlépe jednonásobku (případně  $k$ -násobku) vlnové délky odpovídající dělicímu kmitočtu  $f_d$ , kde vzdálenost  $d$  vypočítáme dle [1] pomocí vzorce (3.6)

$$d = k \frac{340}{f_d}. \quad (3.6)$$



Obr. 3.4: Reproduktorová soustava v uspořádání D'Appolito.

## 4 Reproduktorové výhybky

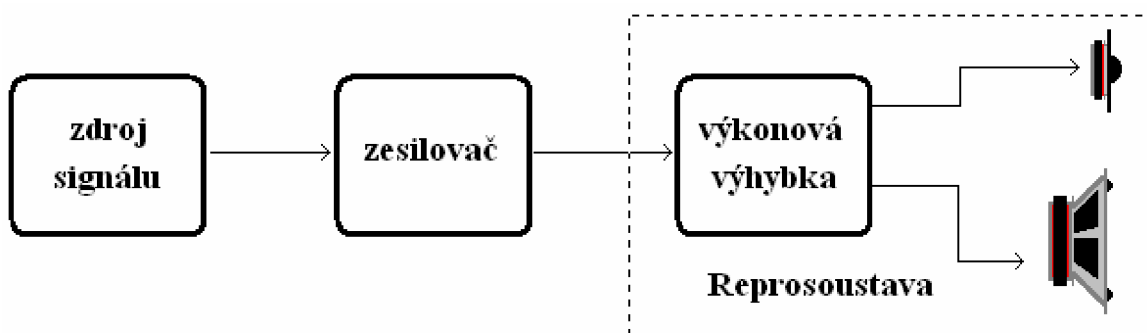
V této kapitole je popsána problematika reproduktorových výhybek, jejich základní funkce, principy návrhu a volba parametrů součástek tvořící tyto obvody. V závěru kapitoly jsou také popsány kompenzační obvody použité v reproduktorových výhybkách.

### 4.1 Funkce reproduktorové výhybky

Jelikož neexistuje reproduktor, který by dokázal vyzářit široké spektrum (v oblasti slyšitelných kmitočtů) s dostatečným akustickým tlakem a minimálním zkreslením, jsou reproduktorové soustavy tvořeny speciálními reproduktory vyzářující jen určitou část spektra. Následně je třeba rozdělit elektrickou energii výkonového zesilovače obsahující celé akustické spektrum kmitočtů do jednotlivých reproduktorů tak, aby každý dostal takovou část, kterou

dokáže efektivně vyzářit z hlediska účinnosti a minimálního lineárního i nelineárního zkreslení. Proto do řetězce mezi zesilovačem a reproduktorem musíme umístit vhodnou kombinaci elektronických součástek, které se postarají o to, aby do hlubokotónového reproduktoru přicházeli jen nízké kmitočty a do vysokotónového jen vysoké. U výhybek se používají kondenzátory, tlumivky a případně rezistory. Kondenzátory propouští vysoké kmitočty a zadržují nízké kmitočty, tlumivky dělají přesný opak, tedy slouží pro omezení vysokofrekvenčních složek přivedeného signálu. Z těchto základních součástek pak lze vhodnou kombinací odvodit většinu používaných elektrických výhybek.

Vyhybky můžeme rozdělit podle toho, jakou konstrukci používají a kde se v řetězci zapojují, tedy před nebo za výkonový zesilovač. Mohou být aktivní nebo pasivní, kde aktivní ovlivňují signál před vstupem do zesilovače, jsou tedy nevýkonové. U reproduktorových soustav pro domácí využití se nejčastěji používají výhybky výkonové viz obr. 4.1.



**Obr. 4.1: Znázornění výkonové reproduktorové výhybky v řetězci distribuce signálu od zdroje signálu k posluchači.**

V případě, kdy bychom použili na hlubokotónový a vysokotónový reproduktor ideálně uspořádaný v prostoru, s citlivostí a impedancí nezávislou na kmitočtu, výhybku 1.řádu, tedy se strmostí 6 dB/oktávu, choval by se tento systém jako ideální dvoupásmová reproduktorová soustava. Takovou reproduktorovou soustavu však nelze v praxi realizovat kvůli citlivosti a impedanci reproduktoru závislé na kmitočtu. Vstupní veličinou výhybky je tedy přiváděné napětí a na straně reproduktorů je výsledný akustický tlak v referenčním bodě (měřicím či poslechovém) dán součtem akustických tlaků jednotlivých reproduktorů. Reprodukovaný signál rozdělený na vstupu výhybky musí být následně sloučen tak, aby byl co nejméně přiváděnému signálu.

Pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu se používají filtry typu horní a dolní propust, viz [1]. Kmitočtový filtr typu dolní propust od určitého kmitočtu propouští nízké a potlačuje vysoké kmitočty. Filtr typu horní propust plní funkci opačnou. Kromě funkce optimálního rozdělení vstupního signálu má výhybka také funkci ochrannou, zejména pro vysokotónový reproduktor, který kdyby byl zatěžován nízkými kmitočty, docházelo by ke zkreslení, a tak plní výhybka ochrannou funkci proti výkonovému přetížení.



Návrh výhybky je tedy velmi důležitou částí při konstrukci reproduktorové soustavy. Při vhodně navržené výhybce lze využít kvality zvoleného reproduktoru nebo potlačit některé slabiny pomocí pomocných kompenzačních obvodů, které jsou součástí výhybky a uvedeny na obr. 4.4.

Z hlediska vstupní impedance musí představovat výhybka bezpečnou zátěž pro zesilovač, jelikož se může stát, že na dělicích kmitočtech klesne hodnota impedance pod jmenovitou hodnotu. Při konstrukci je také nutno uvažovat zatížitelnost výhybky, kde jako prvotní odhad může být efektivní hodnota příkonu basového reproduktoru.

## 4.2 Stanovení dělicích kmitočtů

Pro správné určení mezních kmitočtů u jednotlivých reproduktorů vycházíme z vlastností všech reproduktorů nebo celkovou útlumovou charakteristiku navrhované výhybky určují elektrické parametry, ale také elektroakustické vlastnosti reproduktorů. Pro volbu dělicích kmitočtů je vhodné vycházet z přirozených elektroakustických vlastností reproduktorů daných jejich konstrukcí. Pro každý typ reproduktoru je charakteristický různý úbytek akustického tlaku na obou koncích přenosového pásma, na kterém se podepisuje také vliv ozvučnice.

Hlubokotónové reproduktory mají obvykle nevyrovnanou kmitočtovou charakteristiku od určitých vyšších kmitočtů, často i s převýšením a vlivem tvaru a rozměru membrány dochází ke směřování, což je oblast, kde by již měl být zvolen dělicí kmitočet vysokotónového reproduktoru. Pro dvoupásmové reproduktorové soustavy jsou voleny dělicí kmitočty přibližně od 2 do 5 kHz, kdy u jednotlivých větví není podmínkou stanovení stejného mezního kmitočtu. Bude-li však mezní kmitočet dolní propusti vyšší než horní, na impedanční charakteristice se objeví v blízkosti dělicího kmitočtu pokles, v opačném případě nárůst. Tato skutečnost vypovídá o souvislosti vstupní impedance výhybky a nejednotnosti mezních kmitočtů. Dělicí kmitočet  $f_d$  je tedy definována spíše akusticky, avšak za výsledný kmitočet můžeme považovat geometrický průměr mezních kmitočtů jednotlivých typů filtrů. Toto téma je podrobně popsáno v [3].

## 4.3 Stanovení aproximací filtrů

Strmost jednotlivých filtrů je třeba určovat obezřetně, neboť při přílišné strmosti se do reprodukce vnáší zkreslení především v oblasti dělicích kmitočtů. Stanovení vhodného typu filtru znamená zvolit optimální aproximaci, případně činitele jakosti. Činitel jakosti  $Q$  určuje vlastnosti výsledné výhybky. Spolu se strmostí se vliv těchto parametrů projeví na výsledné kmitočtové a fázové charakteristice. Z hlediska návrhu jsou podstatné 2 typy činitele jakosti s hodnotami  $Q = 0,5$  a  $Q = 0,707$ . První hodnota náleží pro aproximaci filtru typu Linkwitz – Riley, který splňuje podmínku konstantní amplitudy. Druhá hodnota odpovídá aproximaci filtru Butterworth, která splňuje podmínku konstantního příkonu i amplitudy.

Podmínku konstantní amplitudy můžeme pomocí [1] vyjádřit vzorcem (4.1) jako

$$|L(j\omega) + H(j\omega)| = \text{konst.}, \quad (4.1)$$

kde  $L(j\omega)$  je přenosová funkce dolní propusti a  $H(j\omega)$  je přenosová funkce horní propusti u dvoupásmové výhybky. Podobně můžeme pomocí [1] vyjádřit vzorcem (4.2) podmínku konstantního příkonu

$$|L(j\omega)|^2 + |H(j\omega)|^2 = \text{konst.}, \quad (4.2)$$

neboli stav, kdy by reproduktorová soustava odebírala konstantní příkon při kmitočtově nezávislé impedanci.

Volbou strmosti výhybky se rozumí strmost přechodu z propustného do nepropustného pásma a určuje řád filtru. Nejčastěji se používá výhybky se strmostí 12 dB/oktávu, které obvykle představují kompromis z hlediska oddělení jednotlivých pásem, kmitočtové a fázové charakteristiky, směrové charakteristiky v oblasti dělicího kmitočtu a v neposlední řadě také výrobních nákladů, jelikož s rostoucí strmostí roste množství použitých součástek k výrobě výhybky a následnému zvýšení ceny výrobku. U vysokotónových reproduktorů se často volí výhybka se strmostí 18 dB/oktávu vzhledem k účinnějšímu potlačení signálu pod dělicím kmitočtem, tím pádem menšímu zatížení reproduktoru i nižšímu zkreslení. Velké strmosti však představují také značné fázové posuvy, které negativně ovlivňují přenosové vlastnosti soustavy. Výhybky se strmostí 6 dB/oktávu lze použít jen u kvalitních reproduktorů. Pro názornost můžeme pro tyto aproximace vyjádřit podle [1] průběh amplitudových charakteristik filtru druhého řádu se strmostí 12 dB/oktávu pomocí následujících vzorců.

### 1. Linkwitz-Rilley

$$L(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega^4 + 2\omega^2 + 1)}}, \quad (4.3)$$

$$H(\omega) = \frac{-\omega^2}{\sqrt{(\omega^4 + 2\omega^2 + 1)}}, \quad (4.4)$$

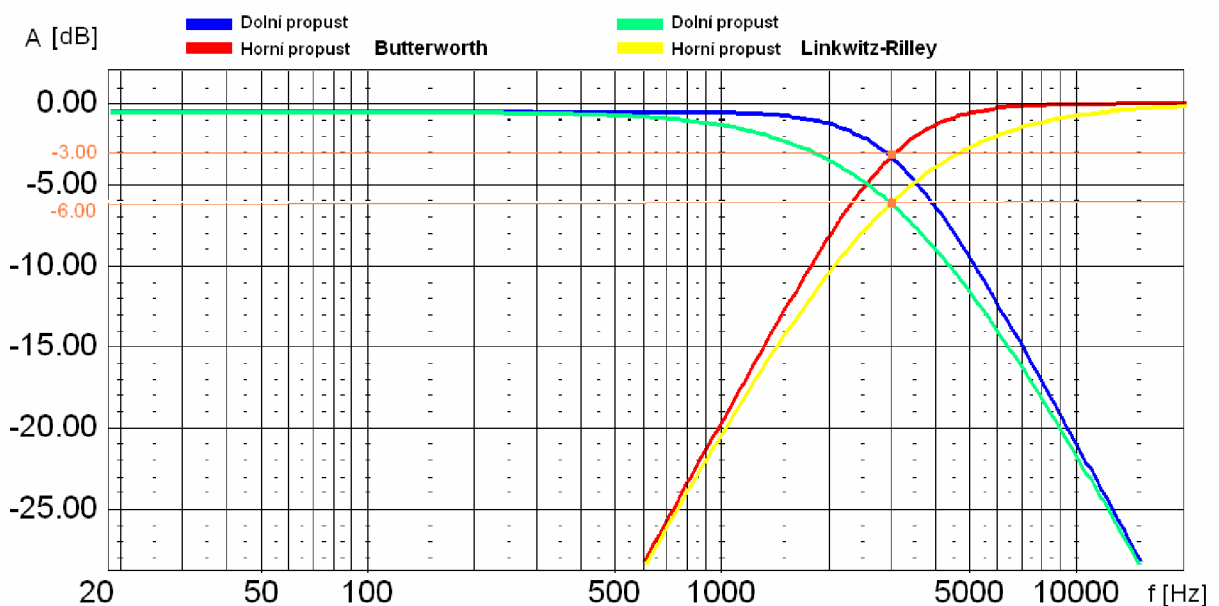
### 2. Butterworth

$$L(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega^4 + 1)}}, \quad (4.5)$$

$$H(\omega) = \frac{-\omega^2}{\sqrt{(\omega^4 + 1)}}. \quad (4.6)$$

kde  $L(\omega)$  vyjadřuje dolní propust a  $H(\omega)$  horní propust odvozenou z přenosových funkcí a symbol  $\omega = 2\pi f$  znamená úhlový kmitočet [rad/s].

Následným porovnáním amplitud přenosů dle [3] na obr. 4.2 zjistíme, že se charakteristiky u typu Butterworth protínají na úrovni -3 dB, zatímco u typu Linkwitz-Riley na úrovni -6 dB. Porovnáním charakteristik součtového tlaku a součtového výkonu bychom pro určitou reproduktorovou soustavu se stanovenou vzdáleností a dělicím kmitočtem zjistili pro tuto výhybku, že výhybky Linkwitz-Riley vykazují konstantní součtový tlak a ztrátu přibližně 3 dB výkonu v okolí dělicího kmitočtu. Výhybky typu Butterworth podávají na ose součtový tlak se značným převýšením, zatímco průběh výkonu v oblasti dělicího kmitočtu vykazuje mírné zvlnění.



Obr. 4.2: Porovnání přenosu amplitud jednotlivých aproximací při dělicím kmitočtu 3 kHz.

#### 4.4 Výpočet hodnot součástek pro reproduktorové výhybky

Pro správnou funkci výhybky je potřeba vybrat takové hodnoty součástek, aby výsledné zapojení mělo funkci navrženého filtru. Ke stanovení hodnot se používají výpočetní metody, které lze uskutečnit prostřednictvím simulačního programu, u kterého lze zahrnout celou řadu ovlivňujících parametrů, jakými jsou např. vliv ozvučnice nebo prostoru včetně polohy reproduktorů a posluchače. Velkou výhodou je také přesnější výpočet. Druhou variantou je výpočet pomocí odvozených vzorců. Ty jsou však založeny na výpočtu s čistě odporovou zátěží filtru, zatímco impedanční charakteristika reproduktoru má komplexní charakter. Jedná se o výpočet poněkud rychlý, avšak je potřeba navrženou výhybku proměřit se zátěží a případně doladit.

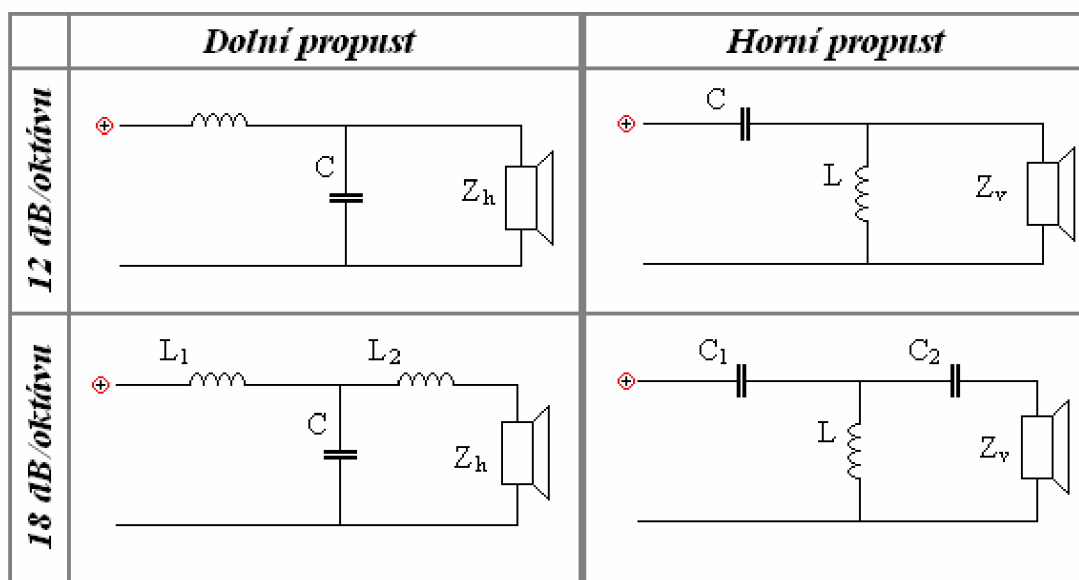
Pro výpočet hodnot součástek u jednotlivých typů filtrů s různými strmostmi, jejichž obvodová schémata jsou uvedena na obr. 4.3, lze použít dle [1] vzorce (4.7 - 4.11), kde výhybky se strmostí 12 dB/oktávu jsou uvedeny pro aproximace typu Butterworth ( $Q=0,707$ ) a výhybky se strmostí 18 dB/oktávu pro aproximace Linkwitz-Riley ( $Q=0,5$ ). Pro horní propust platí tytéž vzorce, avšak místo impedance hlubokotónového reproduktoru dosadíme jmenovitou impedanci vysokotónového reproduktoru  $Z_v$ .

1. Pro dolní propust se strmostí 12 dB/oktávu platí

$$L = \frac{Z_h}{\pi \cdot f_d \cdot \sqrt{2}}, \quad (4.7)$$

$$C = \frac{\sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot f_d \cdot Z_h}, \quad (4.8)$$

kde  $L$  je indukčnost tlumivky [H],  $C$  je kapacita kondenzátoru [F],  $f_d$  dělicí kmitočet [Hz] a  $Z_h$  je impedance hlubokotónového reproduktoru [ $\Omega$ ], která je pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu stanovena jako průměr mezních kmitočtů horní a dolní propusti.



**Obr. 4.3: Zapojení jednotlivých filtrů používaných v reproduktorových výhybkách pro různé strmosti.**

2. Pro dolní propust se strmostí 18 dB/oktávu platí

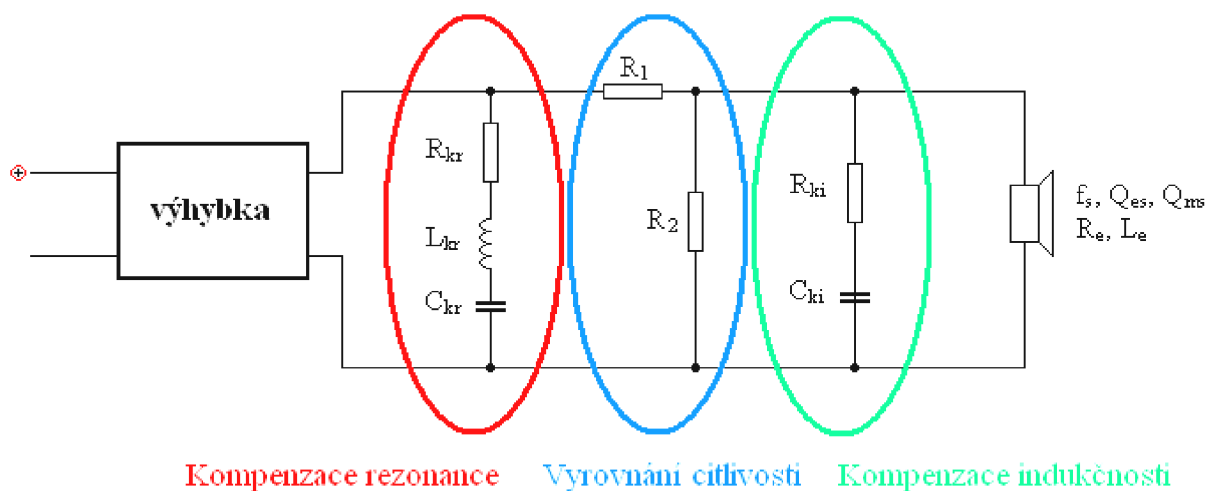
$$C = \frac{2}{3 \cdot \pi \cdot f_d \cdot Z_h}, \quad (4.9)$$

$$L_2 = \frac{Z_h}{4 \cdot \pi \cdot f_d}, \quad (4.10)$$

$$L_1 = 3 \cdot L_2. \quad (4.11)$$

## 4.5 Kompenzace indukčnosti a rezonance

Jak již bylo řečeno, reproduktor má impedanci závislou na kmitočtu zejména kvůli indukčnosti kmitací cívky, a tak lze uvedené vzorce použít pro výpočet v případě, kdy uvažujeme ideální reproduktor, tedy takový, který má čistě odporový charakter. Výsledné průběhy se tak mohou lišit, a proto je někdy vhodné především u hlubokotónových reproduktorů impedanci vykompenzovat. To se provádí pomocí sériového RC členu, který je připojen na výstupu výhybky před reproduktorem. Tento kompenzační člen o určité impedanci se sečte s impedancí reproduktoru, čímž tato paralelní kombinace představuje téměř činnou zátěž. Cílem je tedy minimalizovat imaginární část impedance.



**Obr. 4.4:** Znázornění zapojení schémat pro různé druhy kompenzace reproduktoru.

Tuto kompenzaci lze provést také u vysokotónových reproduktorů, často však je nutné snížit charakteristickou citlivost pomocí odporového děliče, který do určité míry tuto funkci plní také. Kompenzační člen vypočteme pomocí [1] ze vztahů (4.12) a (4.13).

$$R_{ki} = k \cdot R_e, \quad (4.12)$$

$$C_{ki} = \frac{L_e}{(k \cdot R_e)^2}, \quad (4.13)$$

kde  $R_{ki}$  a  $C_{ki}$  jsou hodnoty členu kompenzace impedance,  $R_e$  a  $L_e$  je stejnosměrný odpor kmitací cívky a její indukčnost,  $k$  je konstanta, která se volí  $k = 1$ ;  $k = 1,25$ ;  $k = 1,5$ .

Pokud se blíží dělicí kmitočet výhybky rezonančnímu kmitočtu vysokotónového reproduktoru, je třeba provést tzv. kompenzaci rezonance, která se provádí pomocí sériového obvodu RLC, který představuje filtr typu notch a tato kombinace je připojena paralelně k reproduktorům. Kompenzační člen vypočítáme podle [1] ze vztahu (4.14)

$$R_{kr} = R_e + \frac{Q_{es} \cdot R_e}{Q_{ms}}, \quad L_{kr} = \frac{0,1592 \cdot Q_{es} \cdot R_e}{f_s}, \quad C_{kr} = \frac{0,1592}{R_e \cdot Q_{es} \cdot f_s}, \quad (4.14)$$

kde  $R_{kr}$ ,  $L_{kr}$  a  $C_{kr}$  jsou hodnoty členu kompenzace rezonance,  $R_e$ ,  $L_e$  je stejnosměrný odpor kmitací cívky a její indukčnost,  $f_s$  rezonanční kmitočet reproduktoru a  $Q_{es}$  a  $Q_{ms}$  činitele jakosti reproduktoru.

## 4.6 Vyrovnání citlivosti reproduktorů

Při konstrukci reproduktorových soustav se často setkáme s problémem, kdy při výběru reproduktorů musíme použít měniče s různou charakteristickou citlivostí. Při nedodržení stejné citlivosti by jeden z reproduktorů vyzařoval hlasitěji vůči ostatním. Proto je nutné provést tuto kompenzaci pomocí odporového děliče zařazeného před reproduktorem, nejčastěji vysokotónovým.

Útlum  $A$  [dB] určíme v místě dělicího kmitočtu jako rozdíl modulových kmitočtových charakteristik obou reproduktorů. Zapojením útlumového členu však dochází k navýšení činitele jakosti, a tím pádem většímu zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky, což není vhodné provádět u hlubokotónových reproduktorů. Výpočet útlumového členu vypočítáme podle [1] ze vzorců (4.15), (4.16) a (4.17).

$$R_2 = 10^{\frac{A}{20}} \cdot \frac{R_e}{1 - 10^{\frac{A}{20}}}, \quad R_1 = R_e - \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_e}}, \quad (4.15)$$

pomocí kterých získáme hodnoty rezistorů  $R_1$ , a  $R_2$ . Následně se vypočtené hodnoty zaokrouhlí a vyberou příslušné hodnoty podle normalizované řady hodnot E24.

Skutečný útlum s těmito hodnotami je pak dán vzorcem (4.16)

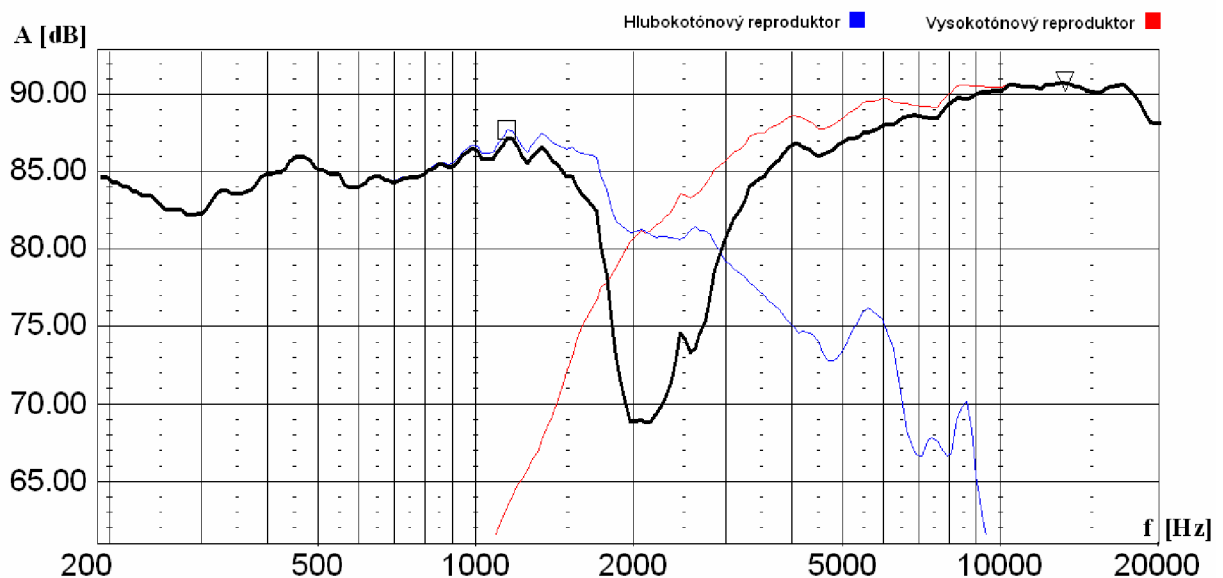
$$A = 20 \cdot \log \frac{\frac{R_2 \cdot R_e}{R_2 + R_e}}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_e}{R_2 + R_e}}. \quad (4.16)$$

Pro celou tuto kombinaci pak lze vypočítat zátěž  $R_z$  pro výhybku dle vzorce (4.17), pokud neuvažujeme kmitočtovou závislost, podle vzorce

$$R_z = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_e}{R_2 + R_e}. \quad (4.17)$$

## 4.7 Pólování reproduktorů

Někdy je zapotřebí při připojení reproduktorů na výstup výhybky změna polarity, zejména u vysokotónových reproduktorů s výhybkami druhého řádu. K tomuto jevu dochází kvůli tomu, že reproduktory vyzařující sousední kmitočtové pásmo mají opačnou fázi, která je způsobena vlastnostmi fázové kmitočtové charakteristiky. To se projevuje jako propad na kmitočtové charakteristice, viz obr. 4.5. U dvoupásmových reproduktorových soustav se obvykle přepólují vysokotónové reproduktory pro výhybky se strmostmi 12 a 18 dB/oktávu.



**Obr. 4.5: Kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy při nepřepólovaném vysokotónovém reproduktoru s použitím výhybky 12 dB/oktávu.**

## 4.8 Volba parametrů součástek pro reproduktorové výhybky

Při konstrukci výhybek vycházíme z vypočtených hodnot a podle nich vybíráme parametry součástek. Ty se však často liší od dostupných normalizovaných řad (E6 nebo E12), a proto musíme hodnoty přizpůsobit zaokrouhlením. Na kvalitu výhybek má samozřejmě vliv i tolerance hodnot součástek. U rezistorů lze akceptovat 20% tolerance, u cívek a kondenzátorů alespoň 5%.

U cívek je důležitým parametrem indukčnost, ale také stejnosměrný odpor vinutí, který by neměl přesahovat desetinu nominální impedance reproduktoru (v oblasti dělicího kmitočtu). Proto volíme cívku s malým odporem neboli s dostatečným průřezem drátu. Optimálním průřezem pro 8 ohmové soustavy je průměr 1 mm. Víme-li, že bude cívka určena pro horní propust, postačí průměr 0.8 mm. Vhodné je použití kvalitních cívek na vzduchovém jádře, kostra, na které je drát navinut by měl být z materiálu odolávající teplotě. Při osazování plošného spoje by se měly cívky střídat ve vertikální a horizontální poloze, aby se předešlo vzájemnému ovlivnění.

Při výběru kondenzátorů je vhodné volit kondenzátory s plastovým dielektrikem, které mají nízké ztráty a jsou teplotně i časově stabilní, nebo pro malé výkony i kondenzátory bipolární. Pro výhybky používané v reproduktorových soustavách určených pro běžný poslech postačují kondenzátory na 35 V.

Rezistory je vhodné výkonově předimenzovat, neboť se velmi zahřívají. Je vhodné vybírat keramické, které snesou vyšší teploty. Na desce plošného spoje se doporučuje umístit rezistory tak, aby byly dostatečně chlazené.

## 5 Simulace

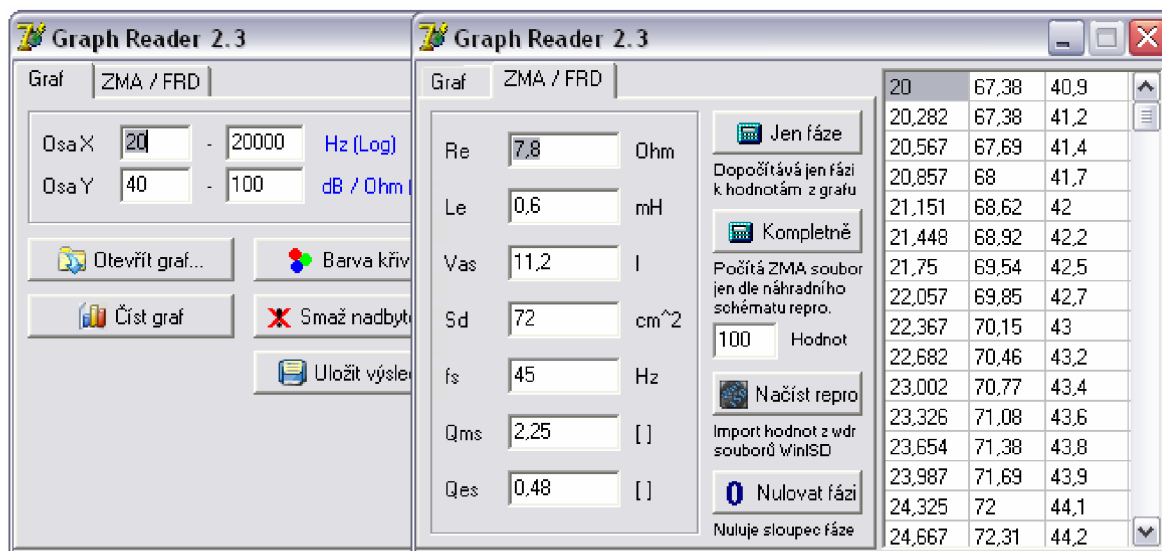
Jelikož tato bakalářská práce navazuje na předchozí semestrální práci, ve které měla být provedena pouze simulace navržené reproduktorové soustavy, je v této kapitole stručně popsán simulační program LspCAD (Loudspeaker Computer Aided Design) od švédské firmy IJData, který je určen pro kompletní návrh reproduktorových soustav a reproduktorových výhybek. Program umožňuje navrhovat a optimalizovat reproduktorové ozvučnice, dále pasivní a aktivní analogové, ale také digitální filtry pro různé konfigurace. Momentálně je tento program k dispozici ve verzích 5 a 6, kde verze 6 se liší možnostmi návrhu libovolné konfigurace pomocí základních elektroakustických a elektrických prvků, které je možno mezi sebou vzájemně kombinovat. Ve verzi 5 je možnost pouhého vložení součástek do již předem připraveného schéma. Vkládat se tak mohou rezistory, kondenzátory, cívky pro simulaci analogových výhybek, u ozvučnic můžeme vytvářet zjednodušená náhradní schémata nebo využít připravené funkční bloky. Při simulaci se předpokládá práce s reálně změřenými reproduktory. Výstupními daty jsou komplexní přenosové charakteristiky počítané v reálném čase. Využít lze také optimalizační postupy či toleranční analýza. Informace o tomto programu lze získat na stránkách firmy viz [6].



## 5.1 Parametry reproduktorů nutné pro simulaci

Pro práci v simulačním programu LspCAD je potřeba pracovat s naměřenými hodnotami kmitočtové a impedanční charakteristiky včetně fázových charakteristik. Jelikož před vlastním návrhem ještě nebyly k dispozici reproduktory, bylo nutné získat tyto hodnoty k simulaci. Výrobce běžně neposkytuje ve svých materiálech naměřené hodnoty, ale pouze charakteristiky zobrazené v grafech, ze kterých lze tyto hodnoty vyčíst. K tomuto účelu byl využit jednoduchý program Graph Reader 2.3, který slouží k odečítání hodnot z grafu, jehož okno je zobrazeno na obr. 5.1.

Abychom mohli odečíst hodnoty z grafu, musíme nejprve připravit graf pro čtení programem. To provedeme v libovolném grafickém programu tak, že skutečný průběh grafu zvýrazníme libovolnou barvou, nejlépe červenou. Následně je potřeba vyříznout z grafu oblast hodnot, zaznamenat hranice oblasti jak na vertikální, tak horizontální ose a uložit jako obrázek. Nyní již jen stačí v programu načíst soubor, zadat mezní hodnoty výseku a načíst graf. Program prochází sloupce pixelů a při výskytu zvolené barvy se zapíše do tabulky okamžitá hodnota. Takto jsou získány hodnoty pro kmitočtové a impedanční charakteristiky, které se uloží ve formátech \*.FRD a \*.ZMA. Po zadání T-S parametrů lze dopočítat fázi dle náhradního schématu. Takto připravené hodnoty lze importovat do simulačního prostředí LspCAD.

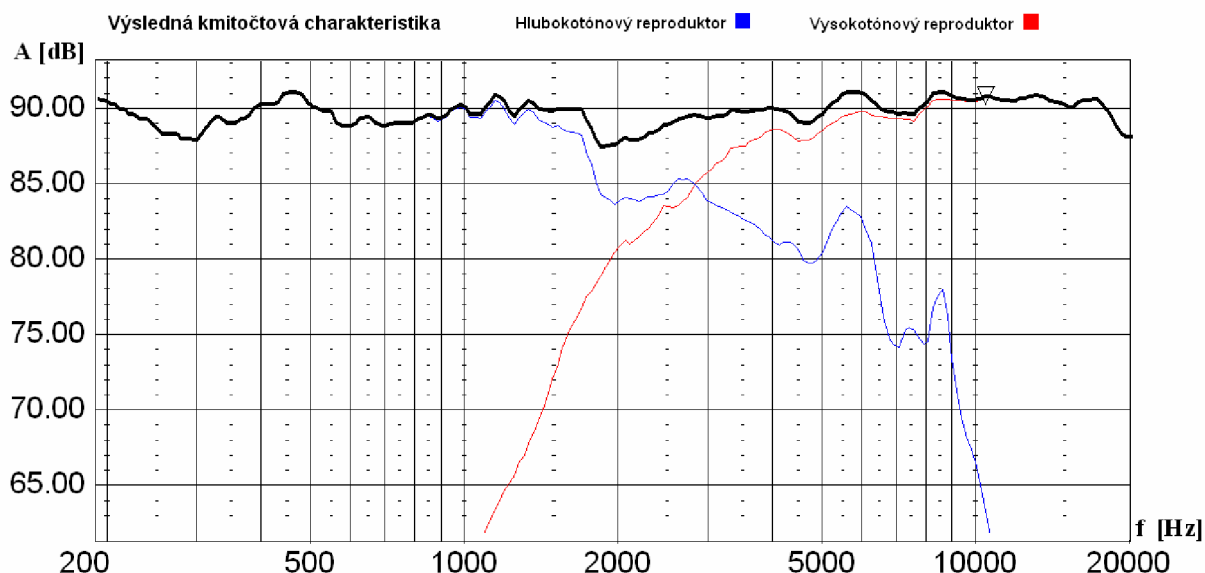


Obr. 5.1: Ukázka čtení hodnot z grafu v programu Graph Reader 2.3.

Tento postup se však podílí největší mírou na vzniku nepřesností při simulacích, neboť již hodnoty poskytnuté výrobcem mohou být v grafu přibližné a následné čtení v programu Graph Reader 2.3 velmi závisí na přesnosti zvýraznění křivky. Proto je nutné brát hodnoty pouze jako orientační a pro finální návrh bude vhodné měniče skutečně proměřit.

## 5.2 Simulace navržené reproduktorové soustavy

Simulace v programu LspCAD začíná vytvořením nového projektu, u kterého můžeme zvolit, zda-li chceme simulovat výpočet ozvučnice nebo výhybky. Nejprve byla zvolena simulace ozvučnice, z nabídky byla vybrána možnost uzavřené ozvučnice. Jakmile se nám vytvoří nový projekt, je potřeba importovat do programu data získaná z programu Graph Reader 2.3. V příslušném okně načteme hodnoty kmitočtové a impedanční charakteristiky a můžeme zvolit počet reproduktorů a jejich zapojení. V tomto případě byly zvoleny 2, paralelně. V dalším okně je potřeba zadat T-S parametry hlubokotónových reproduktorů. Následně je zvoleno okno pro výpočet objemu ozvučnice, kde máme na výběr z několika aproximací. Pro tuto ozvučnici byla vybrána možnost aproximace typu Butterworth s činitelem jakosti  $Q_{tc}=0,707$ . Po načtení dat se okamžitě vykreslí zvolené grafy. Můžeme tak zobrazit modulovou kmitočtovou charakteristiku včetně fázové charakteristiky, impedanční průběh, skupinové zpoždění, impulsní charakteristiku nebo výchylku reproduktoru. Můžeme také zadat velikost prostoru, ve kterém má simulace probíhat a následně zobrazit kmitočtovou charakteristiku. Tato možnost byla prozatím vynechána při simulaci.



Obr. 5.2: Modulová kmitočtová charakteristika - simulace.

Při simulaci výhybky postupujeme obdobně. Nejprve musíme importovat příslušná data pro hlubokotónový a vysokotónový reproduktor, tentokrát však není potřeba zadávat T-S parametry. V příslušném okně zvolíme počet pásem výhybky, její strmost a dělicí kmitočty a umístění reproduktorů ve třech osách, přičemž jako referenční bod [0,0,0] se zvolí vysokotónový reproduktor. Program automaticky vypočítá hodnoty součástek ke zvolené výhybce. V okně simulace výhybky si také můžeme nechat vypočítat jednotlivé kompenzace reproduktorů. Jednotlivé průběhy můžeme sledovat na zobrazovaných grafech, které se dynamicky mění při změně parametrů.

Při simulaci výhybky můžeme nechat vykreslit obvodové schéma výhybky, celkovou kmitočtovou charakteristiku nebo pro jednotlivé větve, impedanční a fázové průběhy a závislost citlivosti reproduktoru na úhlu od osy vyzařování jak pro vertikální, tak horizontální směr. Tato simulace byla provedena v rámci semestrální práce, kdy nebyly k dispozici skutečné reproduktory, proto byly simulace pouze orientační z dostupných charakteristik poskytnutých výrobcem reproduktorů. Pro srovnání je na obr. 5.2 uveden pouze graf modulové kmitočtové charakteristiky vyplývající ze simulačního programu. V následující kapitole jsou již provedena skutečná měření navrhnuté reproduktorové soustavy.

## 6 Vlastní návrh reproduktorové soustavy

V této kapitole je popsán výběr vhodných reproduktorů určených pro reproduktorovou soustavu, její vlastní návrh a konstrukce, rozmístění reproduktorů v ozvučnici a opatření pro tlumení akustických vln uvnitř skříně.

### 6.1 Výběr reproduktorů

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout ozvučnici v uspořádání D'Appolito středních či menších rozměrů. Cílem tedy bylo vybrat dva basové či spíše středobasové reproduktory a jeden vysokotónový. O výběru reproduktorů rozhodovala především velikost středobasových reproduktorů, které mají zásadní vliv na rozměry ozvučnice.

Nezanedbatelným parametrem při výběru byla také cena reproduktorů, proto byly zvoleny reproduktory z nižších řad od české firmy TVM Acoustics a Monacor. Z katalogu výrobců bylo z hlediska velikosti ozvučnice potřeba vybrat basové reproduktory v průměru 10 až 16 cm, které patří mezi nejčastěji vyráběné průměry. Jako optimální velikost byl po konzultaci zvolen průměr 13 cm. Firma TVM ve své nabídce nabízí dva reproduktory v průměru 13 cm, z nichž jeden je stíněný pro použití v blízkosti televizních přijímačů nebo monitorů, což při návrhu této ozvučnice nebylo podmínkou, a tak byl zvolen typ ARN 130-02/8. Jedná se o přímovyzařující elektrodynamický reproduktor pro vyzařování dolního a středního pásma slyšitelných kmitočtů.

Jeho parametry jsou uvedeny v příloze A. Při výběru vysokotónového reproduktoru byly dle požadovaných parametrů a kompromisu mezi cenou a kvalitativními vlastnostmi vybrány 2 vhodné reproduktory od různých firem, které se však svými parametry značně liší. Jako vhodnější byl nakonec vybrán vysokotónový reproduktor s neodýmiovým magnetem typ DT-25N od firmy Monacor. Jeho velkou výhodou jsou poměrně dobré parametry avšak malé rozměry, proto je vhodný do této konstrukce. Jako alternativní reproduktor byl v předchozí semestrální práci zvolen i vysokotónový reproduktor s textilní membránou od firmy TVM, typ ARV-078-00/8, avšak dále je v návrhu použit pouze reproduktor DT-25N. Jeho rozměry a parametry jsou taktéž uvedeny v příloze B.

## 6.2 Návrh ozvučnice

V této podkapitole je popsán vlastní návrh a konstrukce ozvučnice, výpočet rozměrů týkajících se vnitřního objemu, rozmístění jednotlivých reproduktorů na ozvučnici a opatření pro tlumení stojatého vlnění uvnitř ozvučnice.

### 6.2.1 Výpočet rozměrů ozvučnice a její konstrukce

Podle zadání byla zvolena ozvučnice uzavřená. Dle kmitočtové charakteristiky mají hlubokotónové reproduktory sami o sobě mírný nárůst citlivosti v oblasti kolem 100 Hz. Jelikož nebylo záměrem, aby reproduktorová soustava měla zvýrazněný přednes určitých nižších kmitočtů, byla pro konstrukci ozvučnice zvolena aproximace typu Butterworth s činitelem jakosti  $Q_{tc}=0,707$  a plochou kmitočtovou charakteristikou bez převýšení. S použitím vzorce (3.3) a parametrů reproduktoru z přílohy A můžeme vypočítat vnitřní objem ozvučnice. Protože jsou použity dva stejné měniče, uvažujeme při výpočtu jejich dvojnásobný ekvivalentní objem  $V_{as}$

$$V_b = \frac{2 \cdot 11,2}{\left(\frac{0,707}{0,4}\right)^2 - 1} = \frac{22,4}{2,214} = \underline{\underline{0,01055 \text{ m}^3}}.$$

Vnitřní objem ozvučnice tedy vychází přibližně na  $10,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ . Po zabudování měničů do ozvučnice bude rezonanční kmitočet uzavřené reproduktorové soustavy náležet kmitočtu daném rovnicí (3.2)

$$f_{rb} = 57 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{2 \cdot 11,2}{10,6}\right)} = \underline{\underline{102,3 \approx 102 \text{ Hz}}}.$$

Reproduktorová skříň je zhotovena z M.D.F. desky, která zaručuje velkou tuhost, a protože je poměrně těžká, tak také dobrou stabilitu. Desky byly zvoleny o tloušťce 20 mm, což je pro danou reproduktorovou soustavu optimální z hlediska celkové pevnosti a tuhosti ozvučnice bez nutnosti pomocných výztuh uvnitř ozvučnice. Desky bočních a podstavných stěn jsou slepeny a zpevněny pomocí kolíkování v rozích. Čelní stěna je připevněna „na tupo“ pomocí vrutů, vruty na čelní stěně jsou ponechány přístupné pro případné změny tlumení uvnitř ozvučnice. Deska zadní stěny je vsunuta mezi boční, horní a dolní desku a uchycena také pomocí kolíků. Veškeré ostatní spoje jsou také lepeny a z vnitřní strany jsou vzniklé kouty utěsněny silikonem z důvodu těsnosti.

Jelikož měla být navržena reproduktorová soustava s variabilní kmitočtovou výhybkou, bylo potřeba vytvořit prostor v zadní části reproduktorové soustavy tak, aby byl snadný přístup k součástkám umístěným na výhybce a bylo možné je měnit. Tento prostor je vytvořen tak, že horní, dolní a boční stěny reproduktorové soustavy jsou delší o výšku potřebnou k vytvoření prostoru pro výhybku, než skutečné rozměry pro ozvučnici. Z vnějšího pohledu se tedy reproduktorová skříň jeví jako hlubší, skutečný objem je však menší. Tato konstrukce má také výhodu v tom, že vnitřní objem reproduktorové soustavy není nijak zmenšen a je tak vytvořen jen čistý objem ozvučnice  $10,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , pro kterou jsou spočítány rozměry pro vytvoření vnitřního objemu následovně (š x v x h) 430 x 170 x 145 mm. K rozměru hloubky je nutné připočítat orientačně 100 mm (záleží na skutečné výšce výhybky) pro vytvoření prostoru pro umístění výhybky. Při použití M.D.F. desky o tloušťce 20 mm a spojením stěn „na pokos“ jsou tedy celkové rozměry 470 x 210 x 285 mm. Reproduktorová výhybka je uchycena k zadní stěně skutečné ozvučnice pomocí vrutů v rozích přes plastové distanční sloupky o výšce 30 mm. V zadní stěně jsou umístěny gumové průchodky pro protažení kabelů..

Reproduktory jsou k ozvučnici připevněny pomocí vrutů odpovídajících rozměrů, které jsou pro tuto konstrukci dostačující. Rohy přední stěny jsou ofrézovány na oblouk (s poloměrem 10 mm) kvůli potlačení difrakcí vlnění na vyšších kmitočtech. Reproduktorová skříň je přebroušena, nalakována plnicím lakem na dřevěné povrchy a následně přelakována černým lesklým lakem. Vnitřní prostor ozvučnice je z důvodu potlačení stojatého vlnění vystlán tlumícím materiálem o výšce zhruba 30 mm na zadní, horní, dolní a bočních stěnách. Bohužel tlumicí materiál nebyl zcela odpovídající výšky, proto byl dodatečně upraven pro potřeby vytlumení vnitřního prostoru.

## 6.2.2 Rozmístění reproduktorů

Při rozmístění reproduktorů v uspořádání D'Appolito musí být vzdálenost  $d$  mezi středy jednotlivých měničů nejlépe jednonásobkem vlnové délky odpovídající dělicímu kmitočtu a je vypočtena pro dělicí kmitočet  $f_d$  podle vzorce (3.6)

$$d = 1 \frac{340}{2800} = \underline{\underline{0,12 \text{ m}}}.$$

Aby byla zachována pevnost přední stěny, ale také dodržena vzdálenost měničů, je mezi reproduktory vzdálenost minimálně 40 mm. Po zamontování reproduktorů, jejichž koše přecházejí přibližně 10 mm z každé strany jsou viditelné vzdálenosti mezi sousedními reproduktory zhruba 20 mm a při dolním a horním okraji 30 mm.

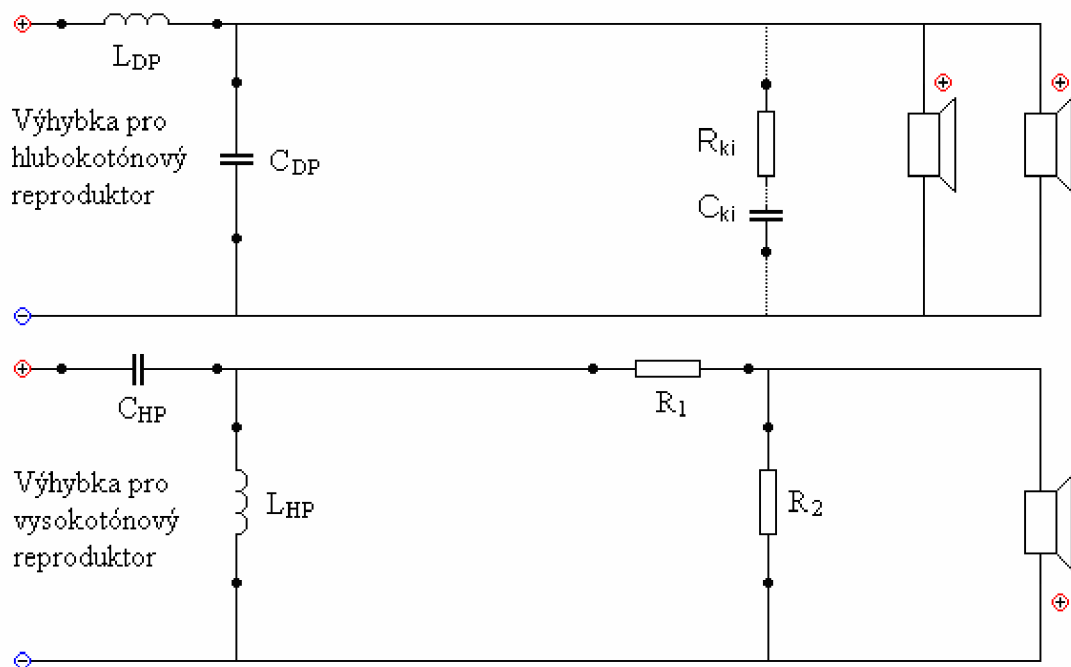
Aby byly reproduktory zapuštěny v přední desce a tvořili rovnou plochu, je potřeba pro každý reproduktor vytvořit zahlobnutí a prostor pro osazení. Pro hlubokotónové reproduktory je nutno vyřezat otvor o průměru 113 mm, kolem kterého je potřeba vyfrézovat z vnější strany téměř čtvercový otvor pro zapuštění o rozměrech 130 x 130 mm, hluboký 5,8 mm. V případě vysokotónového reproduktoru je potřeba montážní průměr 46 mm a otvor pro osazení průměru 66 mm hluboký 3,3 mm. Otvory pro uchycení reproduktorů jsou naznačeny v technické dokumentaci v přílohách A a B.

### 6.3 Návrh reproduktorové výhybky

Na úvod je nutné podotknout, že konstrukce ozvučnice vychází ze známých hodnot udávaných výrobcem, zatímco pro konstrukci výhybky je vhodné mít skutečné naměřené hodnoty reproduktorů, neboť jejich parametry jsou kmitočtově závislé. Reproduktořová výhybka použitá v této reproduktorové soustavě má být variabilní z hlediska změny dělicího kmitočtu. Proto bylo nutné navrhnout způsob, kterým by bylo možné měnit kondenzátory použité na výhybce. Na místech pro umístění kondenzátorů jsou tak umístěny svorkovnice, do kterých lze připevnit kondenzátory. Vzhledem k použitým měničům byla tedy podle kmitočtových charakteristik zvolena reproduktorová výhybka druhého řádu se strmostí 12 dB/oktávu, pro každou sekci je použitý jeden kondenzátor, tedy jedna upevňovací svorkovnice.

Z hlediska aproximace byl zvolen filtr typu Butterworth splňující podmínku konstantního příkonu a amplitudy a kompromis z hlediska kmitočtové a směrové charakteristiky (zejména v oblasti dělicího kmitočtu). Dělicí kmitočet byl dle [1] zvolen s ohledem na rozmístění měničů a stanoven na 2800 Hz jak pro dolní, tak i horní propust. Jelikož byly použity dva shodné hlubokotónové měniče, je vhodné předpokládat zvýšení citlivosti o 3 dB, i když jejich vzdálenost není přesně rovna 1/10 odpovídající vlnové délky. Proto je třeba uvažovat charakteristickou citlivost hlubokotónových reproduktorů zhruba 88 dB. Reproduktoř Monacor DT-25N má však podstatně větší citlivost, a tak je nutné tuto citlivost vyrovnat, což lze vidět na obr. 6.1.

Jelikož byla použita výhybka druhého řádu a na dělicím kmitočtu vznikl velký propad, bylo potřeba změnit fázi u vysokotónového reproduktoru o  $180^\circ$  neboli změnit polaritu měniče. V návrhu výhybky se počítalo také s možností kompenzace indukčnosti hlubokotónových reproduktorů, tato varianta nakonec využita nebyla. Reproduktry jsou spojeny s výhybkou prostřednictvím dvojlinky  $2 \times 1,0$  mm. Vodiče pro jsou k výhybce připevněny pomocí svorkovnic soustředěných v pravém dolním rohu. Vstup výhybky je z důvodu snadného připojení reproduktorové soustavy k zesilovači spojen s narážecí pérkovou miskou umístěnou na zadní kratší stěně.



**Obr. 6.1** Schéma navržené výhybky s případnými korekcemi.

### 6.3.1 Výpočet parametrů reproduktorové výhybky

Dosažením hodnot do vzorců uvedených v kapitole 4.4 vypočítáme parametry součástek pro jednotlivé větve. Dolní propust pro hlubokotónové měniče je tvořena tlumivkou o indukčnosti  $L_{DP}$  a paralelně přiřazeným kondenzátorem o kapacitě  $C_{DP}$ . Reproduktory o jmenovité impedanci  $8 \Omega$  jsou připojeny paralelně, jejich výsledná impedance je tedy  $4 \Omega$ .

Dosažením hodnot z přílohy A do vzorce (4.7) získáme hodnotu indukčnosti

$$L_{DP} = \frac{4}{\pi \cdot 2800 \cdot \sqrt{2}} = \underline{\underline{0,321 \text{ mH}}},$$

a dosažením do vzorce (4.8) získáme hodnotu kapacity

$$C_{DP} = \frac{\sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot 2800 \cdot 4} = \underline{\underline{10,048 \mu\text{F}}}.$$

Kondenzátor pro dolní propust byl zvolen bipolární z dostupné řady  $10 \mu\text{F}/50\text{V}$ . Tlumivka na vzduchovém jádře byla vybrána z nabídky firmy Monacor a má hodnotu  $0,33 \text{ mH}$ , průměr drátu vinutí je  $1 \text{ mm}$ . Její stejnosměrný odpor vinutí je  $0,3 \Omega$ , což splňuje podmínku  $1/10$  jmenovité impedance reproduktoru.

Horní propust pro vysokotónový měnič je tvořena tlumivkou o indukčnosti  $L_{HP}$  a kondenzátorem o kapacitě  $C_{HP}$ . Dosažením hodnot z přílohy C do vzorce (4.8) získáme hodnotu kapacity

$$C_{HP} = \frac{\sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot 2800 \cdot 8} = \underline{\underline{5,024 \mu\text{F}}},$$

a dosažením do vzorce (4.7) získáme hodnotu kapacity

$$L_{HP} = \frac{8}{\pi \cdot 2800 \cdot \sqrt{2}} = \underline{\underline{0,643 \text{ mH}}}.$$

Pro horní propust proto byla vybrána z dostupné řady tlumivka o indukčnosti  $0,68 \text{ mH}$  a průměru drátu vinutí  $0,85 \text{ mm}$ . Stejnosměrný odpor vinutí je u této cívky  $0,55 \Omega$ . Jelikož není dostupný kondenzátor o kapacitě  $5 \mu\text{F}$ , byl vybrán kondenzátor o hodnotě  $4,7 \mu\text{F}/50\text{V}$ .



Vysokotónový reproduktor Monacor DT-25N má charakteristickou citlivost 95 dB, což je o 7 dB víc než paralelní kombinace hlubokotónových reproduktorů, proto je potřeba před tento reproduktor vložit odporový dělič, který vypočítáme podle vztahu (4.15), viz obr. 6.2.

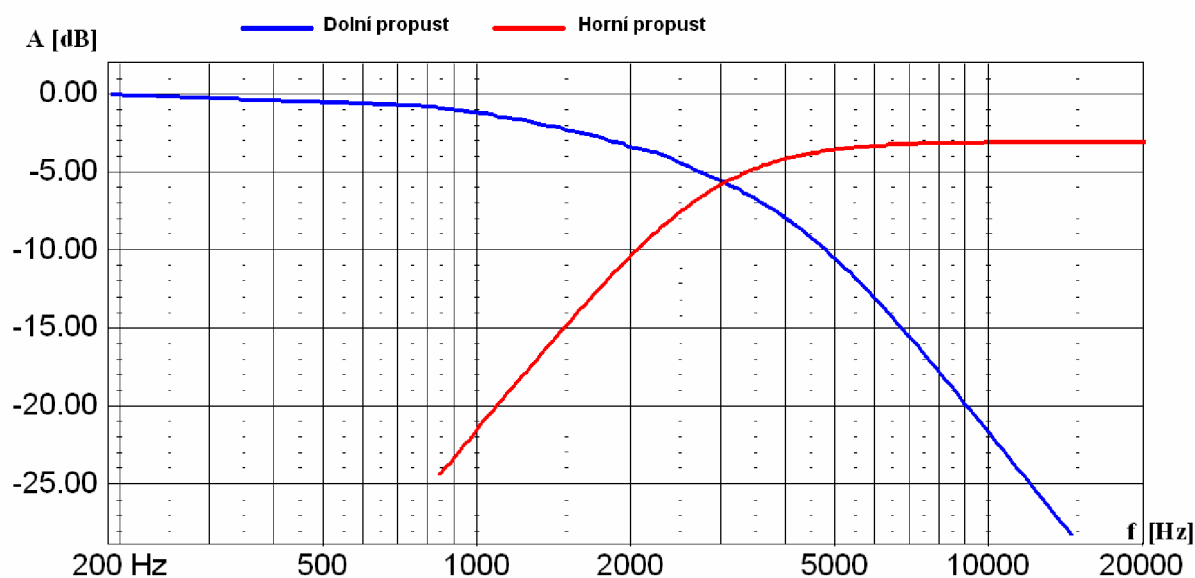
$$R_2 = 10^{\frac{-7}{20}} \cdot \frac{8}{1 - 10^{\frac{-7}{20}}} = \underline{\underline{6,5 \Omega}}, \quad R_1 = 8 - \frac{1}{\frac{1}{6,5} + \frac{1}{8}} = \underline{\underline{4,4 \Omega}}.$$

Použijeme-li keramické rezistory z dostupné řady o hodnotách 4,7  $\Omega$  a 6,8  $\Omega$ , výsledný útlum pak bude dán dle vzorce (4.16)

$$A = 20 \cdot \log \frac{\frac{6,8 \cdot 8}{6,8 + 8}}{4,7 + \frac{6,8 \cdot 8}{6,8 + 8}} = \underline{\underline{-7 \text{ dB}}},$$

a celá kombinace útlumového členu s reproduktorem bude zatěžovat výhybku dle (4.17) odporem (uvažujeme-li čistě odporovou zátěž)

$$R_{\text{zátěž}} = 4,4 + \frac{6,5 \cdot 8}{6,5 + 8} = \underline{\underline{8 \Omega}}.$$



**Obr. 6.2: Přenos filtrů pro dolní a horní propust při použití reproduktoru se znázorněným útlumem horní propusti.**

Po změření modulové kmitočtové charakteristiky však bylo patrné přílišné utlumení vysokotónového reproduktoru, a proto byla citlivost snížena pouze o 3 dB. Výsledné hodnoty rezistorů jsou opět dány vztahem (4.15)

$$R_2 = 10^{\frac{-3}{20}} \cdot \frac{8}{1 - 10^{\frac{-3}{20}}} = \underline{\underline{20 \Omega}}, \quad R_1 = 8 - \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{1}{8}} = \underline{\underline{2,3 \Omega}}.$$

Použijeme-li keramické rezistory z dostupné řady o hodnotách 22  $\Omega$  a 2,2  $\Omega$ , výsledný útlum pak bude dán dle vzorce (4.16)

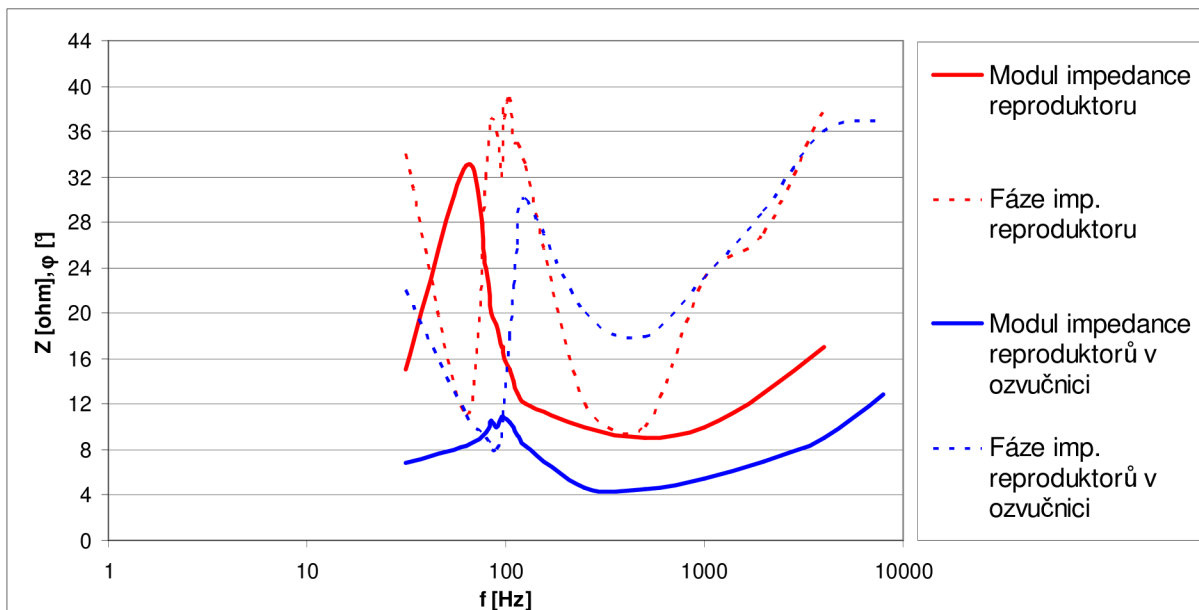
$$A = 20 \cdot \log \frac{\frac{22 \cdot 8}{22 + 8}}{2,2 + \frac{22 \cdot 8}{22 + 8}} = \underline{\underline{-2,8 \text{ dB}}}.$$

## 7 Měření a zpracování výsledků

Po zhotovení reproduktorové soustavy následovalo měření několika charakteristik, z nichž většina probíhala ve školní bezdozvukové komoře. Nejprve byla změřena impedanční charakteristika hlubokotónového měniče umístěném ve volném poli a následně impedanční charakteristika obou hlubokotónových reproduktorů uzavřených v ozvučnici. Na obr. 7.1 jsou patrné rozdíly v průběhu modulu impedance a její fáze a posun rezonančního kmitočtu.

Dále byla změřena modulová kmitočtová charakteristika celé reproduktorové soustavy. Z grafu na obr. 7.2 je patrný mírný pokles v oblasti kolem 6 kHz, což je pravděpodobně způsobeno vlastnostmi vysokotónového reproduktoru, neboť i při měření modulové kmitočtové charakteristiky samostatného vysokotónového reproduktoru byl v této oblasti tento pokles zaznamenán. Tento detail modulové kmitočtové charakteristiky je zobrazen na obr. 7.3.

Jako poslední byla provedena série měření směrových charakteristik, které byly jedním z hlavních úkolů. Měření vždy probíhalo jak pro horizontální, tak i vertikální polohu reproduktorové soustavy. Z těchto grafů je patrné, že směrové charakteristiky jsou vždy symetrické. Jejich zvlnění se liší pouze nastavením jednotlivých mezních kmitočtů výhybky. Nejprve byla změřena směrová charakteristika pro navrhnoutou reproduktorovou soustavu, tedy s dělicím kmitočtem 2800 Hz. Na obr. 7.4 je směrová charakteristika pro vertikální polohu reproduktorové soustavy, na obr. 7.5 pak pro horizontální polohu.

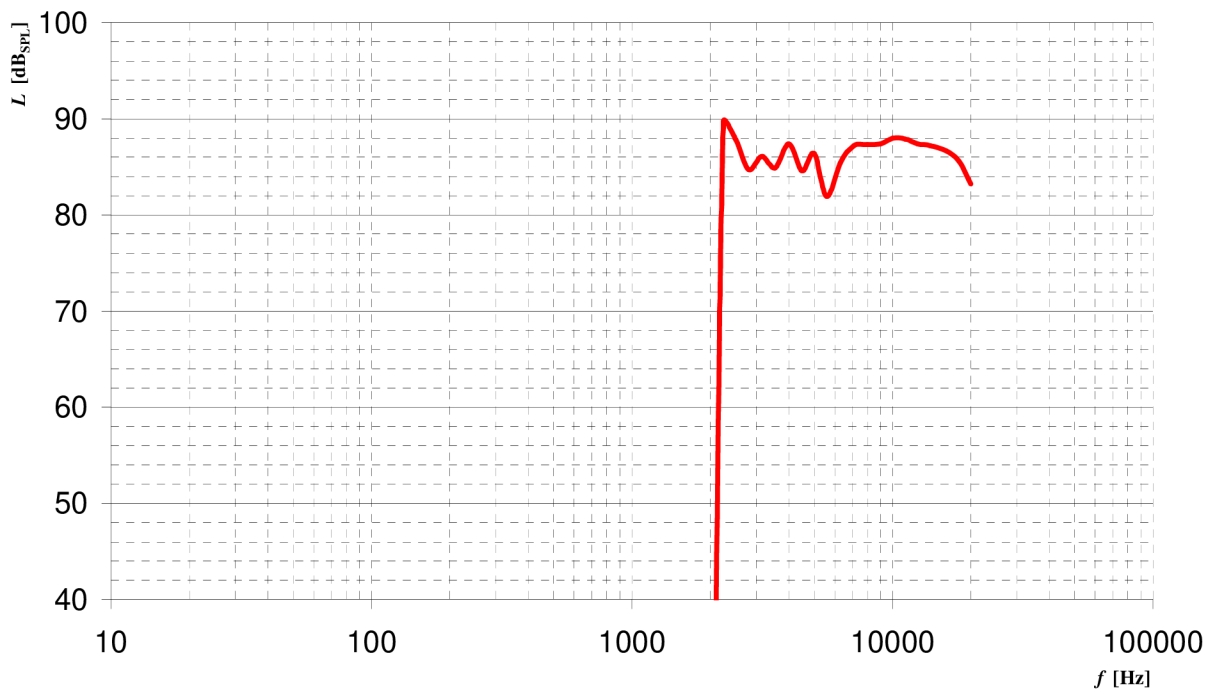


**Obr. 7.1: Naměřené impedanční charakteristiky včetně fáze.**

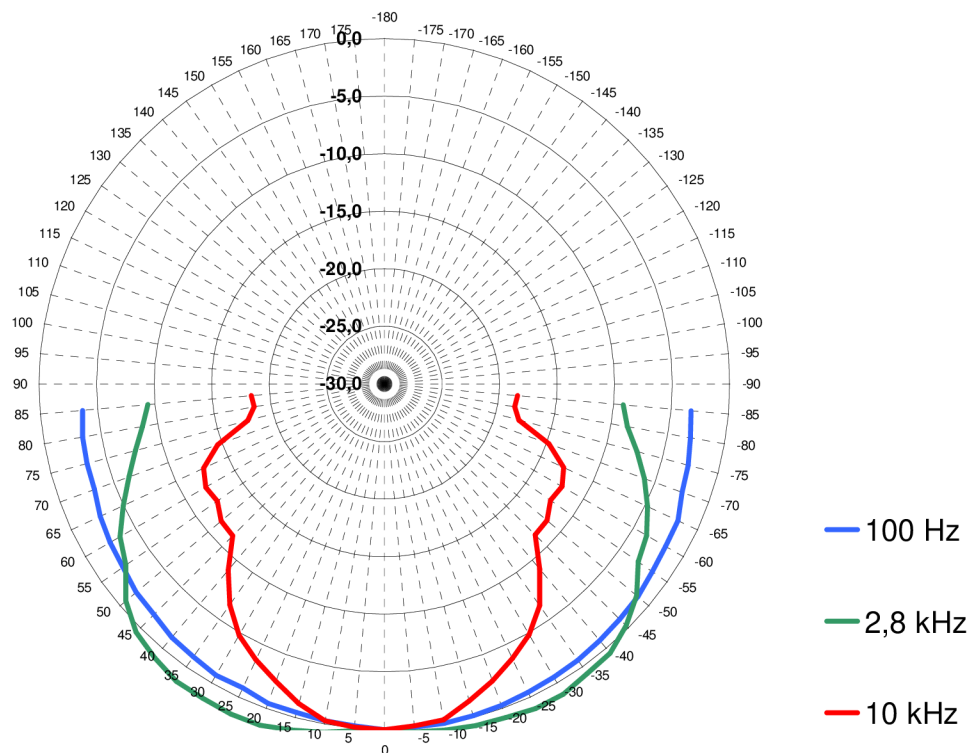
Dále byla provedena stejná měření pro nižší a vyšší dělicí kmitočty než vypočítaný dělicí kmitočet 2800 Hz, tedy pro dělicí kmitočty 2000 Hz a 4000 Hz (mezní kmitočty byly vždy shodné). Toho bylo docíleno změnou kondenzátorů ve svorkovnicích na výhybce. Vertikální a horizontální směrové charakteristiky pro dělicí kmitočty 2000 Hz jsou zobrazeny na obr. 7.6 a 7.7 a pro kmitočet 4000 Hz jsou zobrazeny grafy na obr. 7.8 a 7.9. Při změně dělicího kmitočtu byly také změřeny směrové charakteristiky pro kmitočet 2800 Hz pro srovnání s novým dělicím kmitočtem. Pro názornou ukázkou jsou také zobrazeny skupinové grafy, ve kterých lze porovnat směrové charakteristiky pro různé dělicí kmitočty jak pro vertikální, tak horizontální polohy. Tyto směrové charakteristiky jsou měřeny na zvolených dělicích kmitočtech a jsou zobrazeny na obr. 7.10 a 7.11. V posledních dvou grafech je srovnání směrových charakteristik na stejném kmitočtu 2800 Hz (jako dělicí kmitočet pro navrhovanou reproduktorovou výhybku) avšak pro různé dělicí kmitočty. Grafické znázornění charakteristik pro vertikální polohu je na obr. 7.12 a pro horizontální polohu na obr. 7.13, z čehož jsou patrné rozdíly vyzařování téhož kmitočtu při různých dělicích kmitočtech.



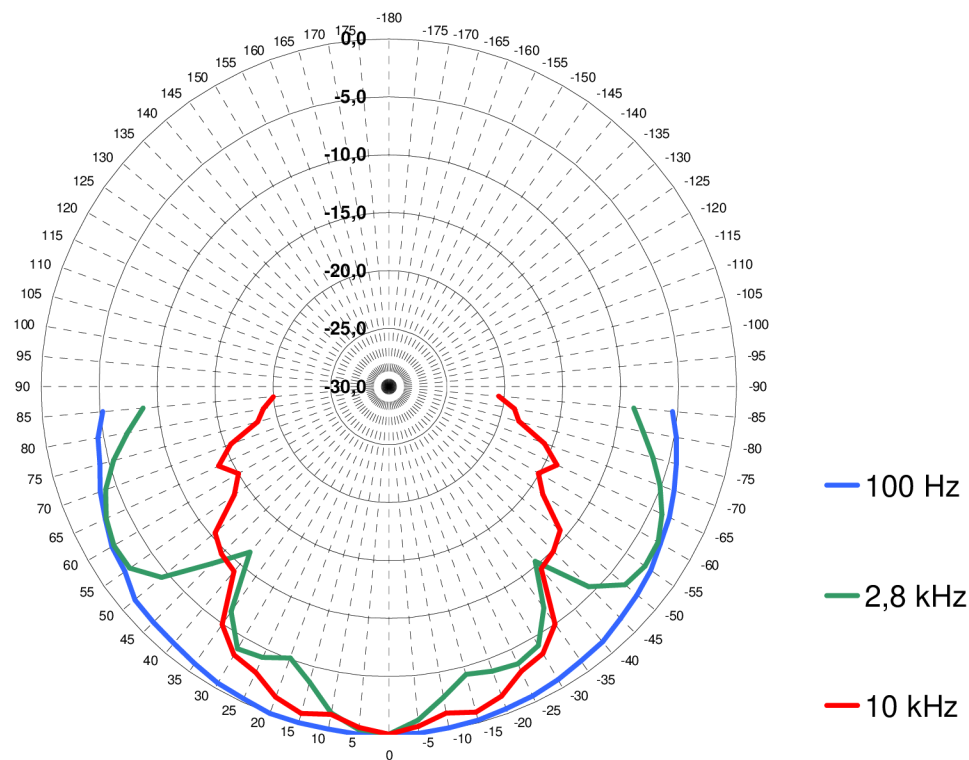
**Obr. 7.2: Kmitočtová charakteristika navrhnuté reproduktorové soustavy.**



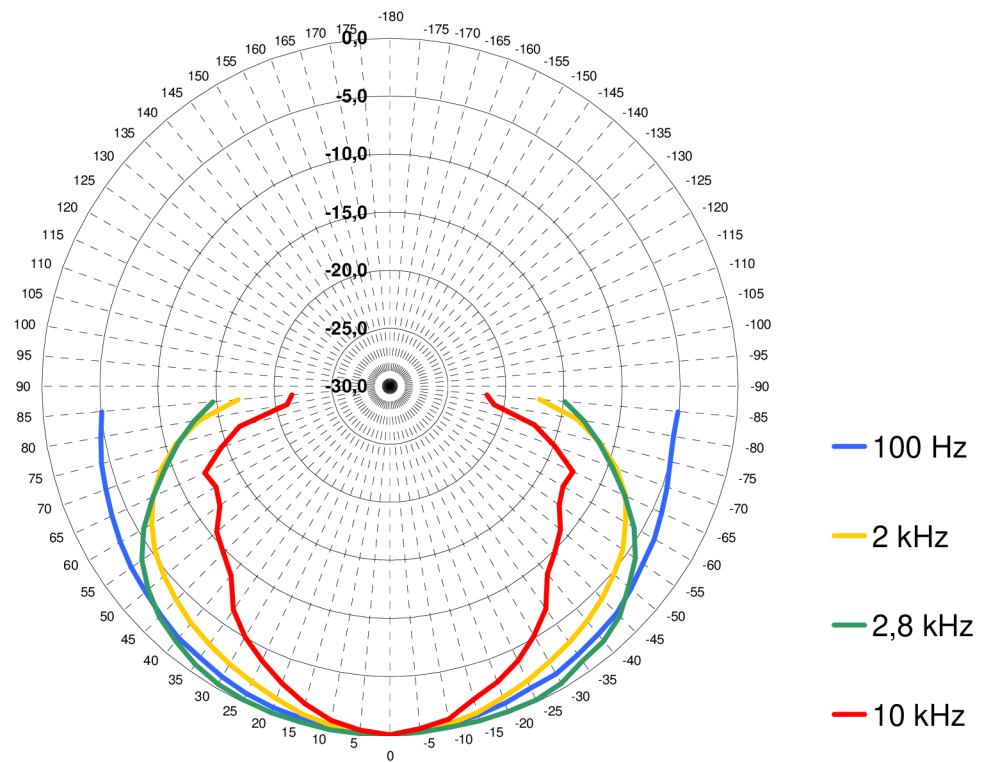
**Obr. 7.3: Detail modulové kmitočtové charakteristiky vysokotónového reproduktoru.**



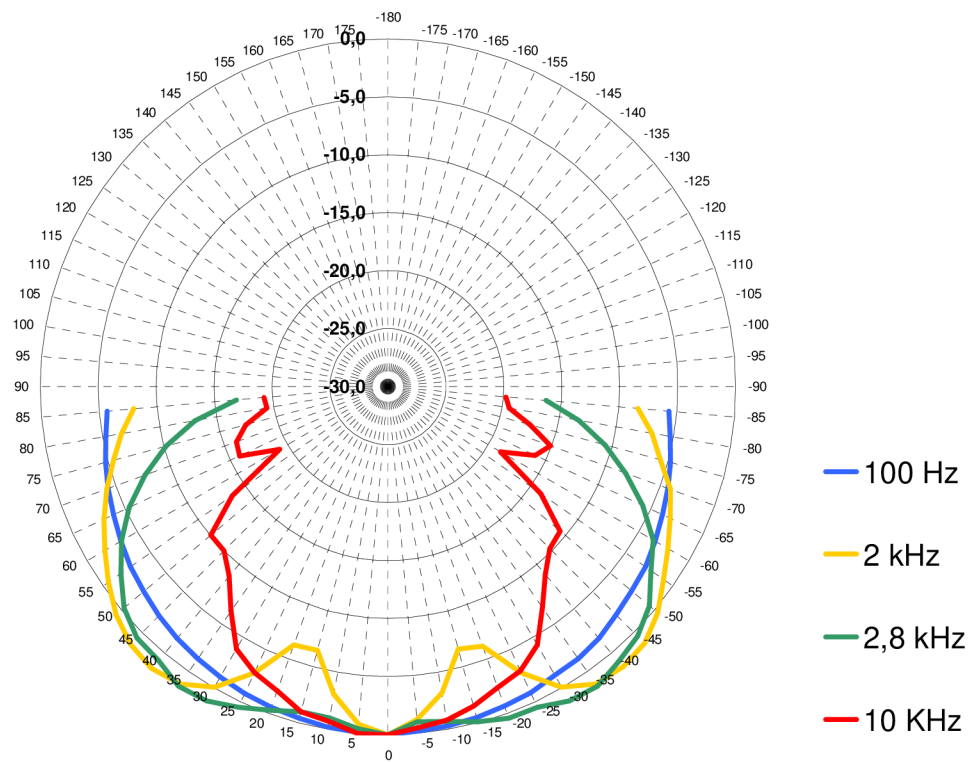
Obr. 7.4: Vertikální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 2800 Hz.



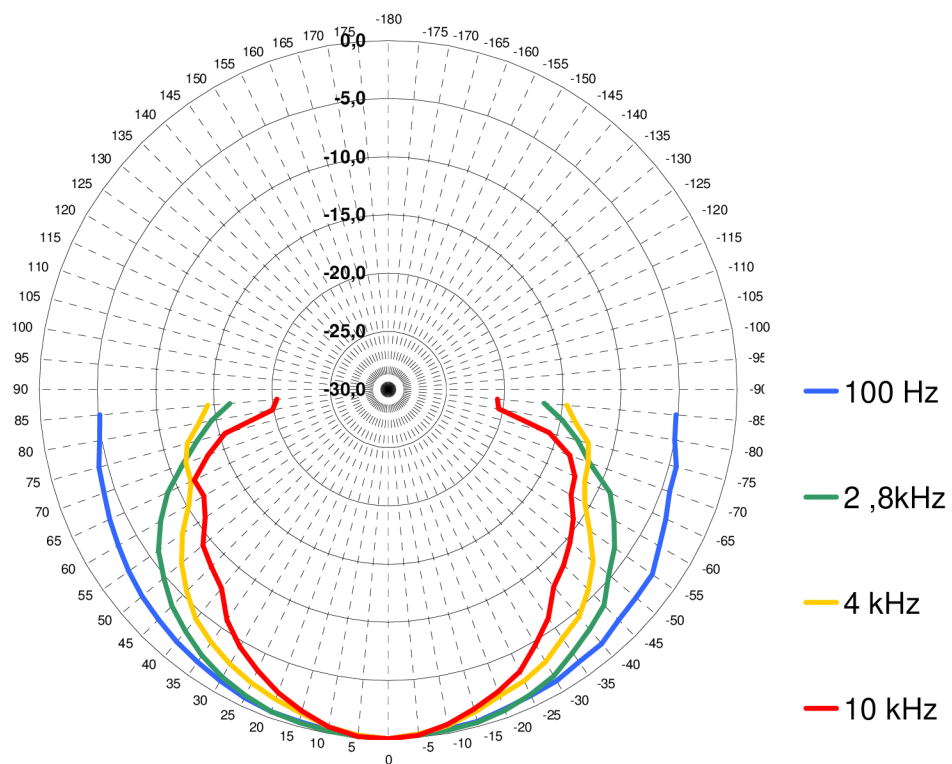
Obr. 7.5: Horizontální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 2800 Hz.



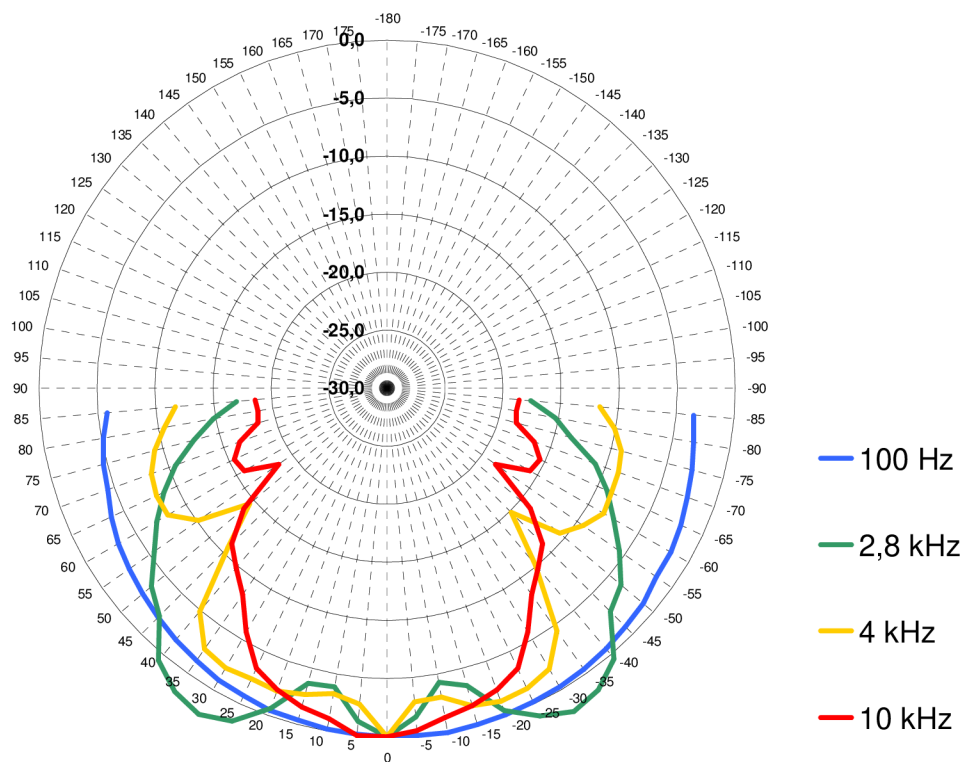
**Obr. 7.6: Vertikální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 2000 Hz.**



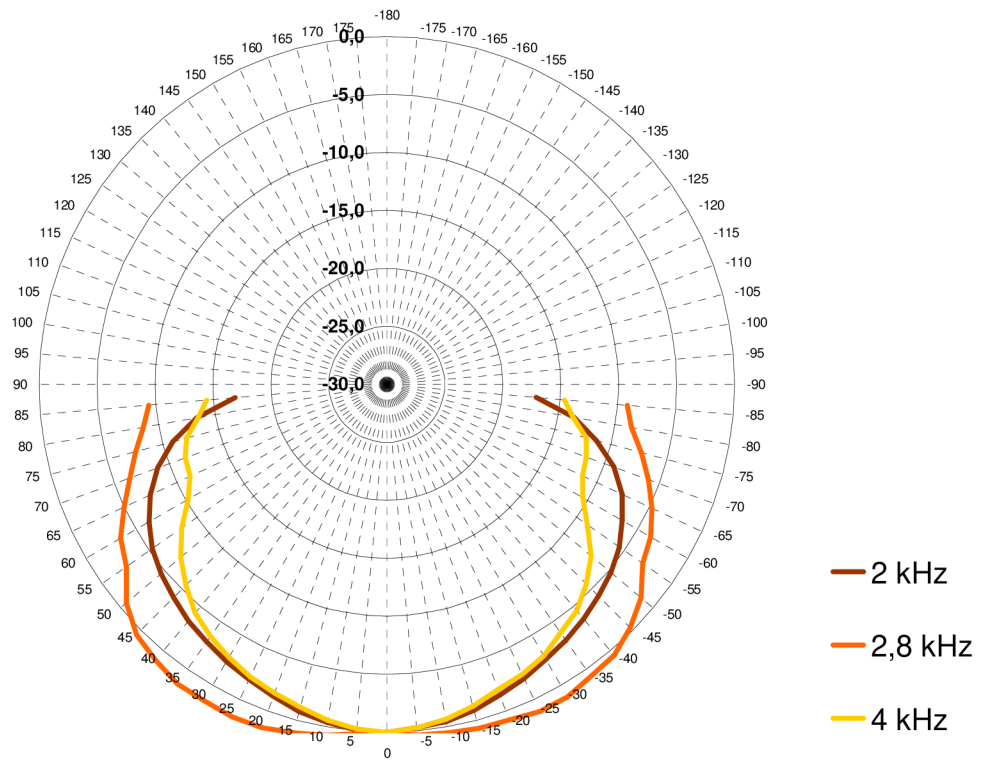
**Obr. 7.7: Horizontální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 2000 Hz.**



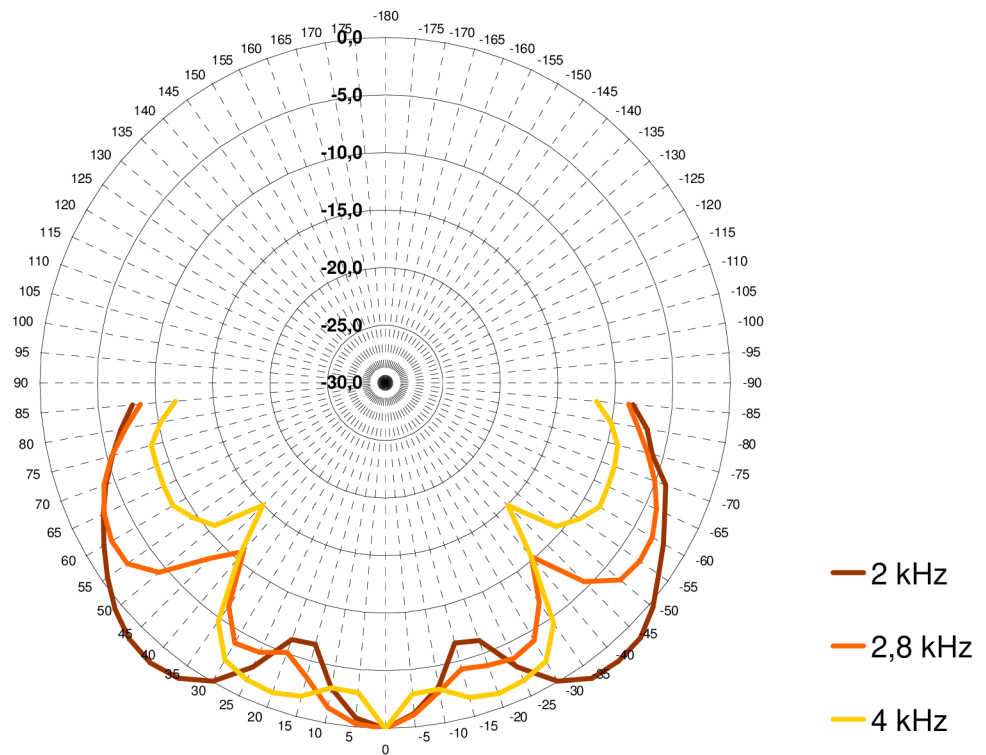
Obr. 7.8: Vertikální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 4000 Hz.



Obr. 7.9: Horizontální směrová charakteristika pro dělicí kmitočty 4000 Hz.

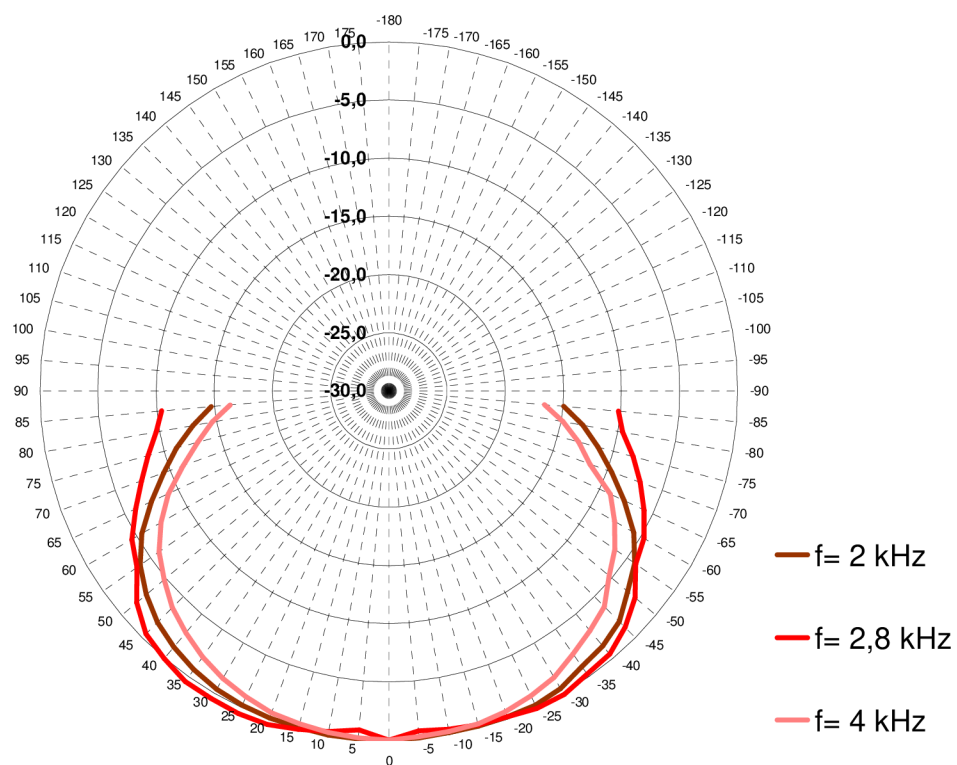


**Obr. 7.10: Vertikální směrová charakteristika pro různé dělicí kmitočty.**

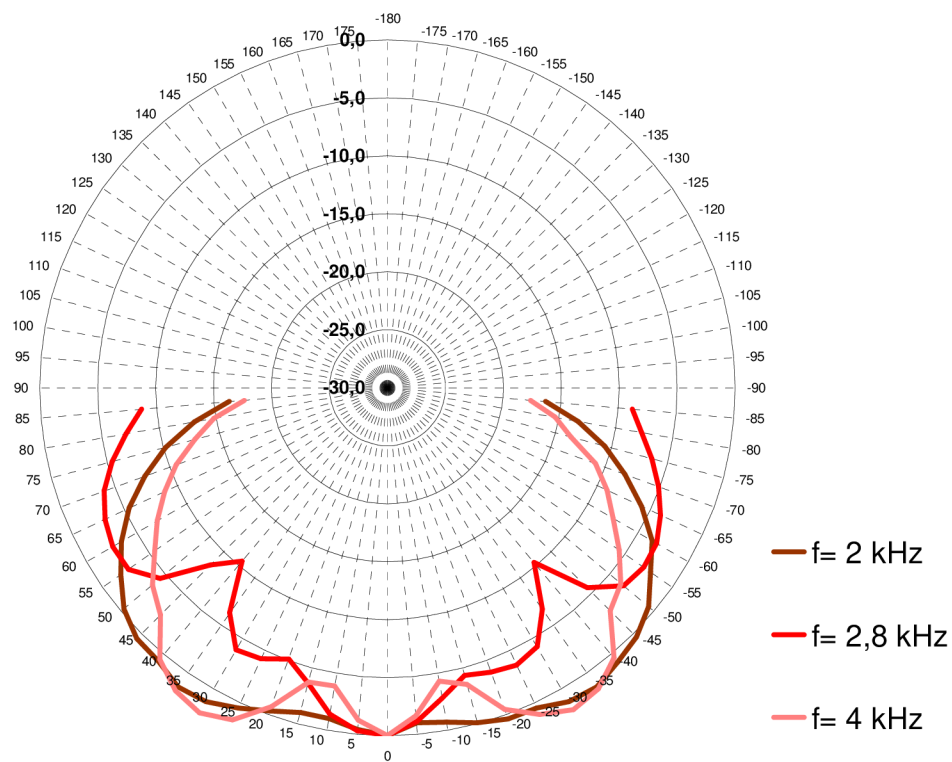


**Obr. 7.11: Horizontální směrová charakteristika pro různé dělicí kmitočty.**





Obr. 7.12: Vertikální směrová charakteristika pro 2800 Hz při různých dělicích kmitočtech.



Obr. 7.13: Horizontální směrová char. pro 2800 Hz při různých dělicích kmitočtech.

## 8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout dvoupásmovou reproduktorovou soustavu v uspořádání D´Appolito s variabilní kmitočtovou výhybkou. V úvodu práce je popsána stručná teorie základních principů funkce reproduktoru a konstrukce reproduktorových soustav, zejména dvoupásmových. Dále jsou popsány funkce kmitočtových výhybek používaných v reproduktorových soustavách a předpoklady pro jejich konstrukci. Zatímco při simulacích se vycházelo pouze z údajů poskytnutých výrobcem, což vedlo k nepřesným výsledkům, v závěru této práce je již popsána vlastní konstrukce reproduktorové soustavy včetně reálně naměřených charakteristik. Reproduktorová soustava je zobrazena na fotografiích v příloze E.

Pro konstrukci reproduktorové soustavy byly z nabídky firem vybrány vhodné hlubokotónové měniče a po zvážení vysokotónový reproduktor od firmy Monacor. Pro tyto reproduktory byla navržena ozvučnice s prostorem pro umístění reproduktorové výhybky v zadní části reproduktorové soustavy, ke které je snadný přístup. Na této výhybce lze měnit kondenzátory a měnit tak mezní kmitočty jednotlivých větví.

Po sestavení reproduktorové soustavy bylo provedeno několik měření. Nejprve byly změřeny impedanční charakteristiky, kmitočtová charakteristika výsledné reproduktorové soustavy a dále pak několik měření směrových charakteristik vždy pro vertikální a horizontální polohu reproduktorové soustavy. Z grafů je patrná symetričnost směrových charakteristik jak ve vertikální, tak horizontální poloze. Pouze při zvoleném dělicím kmitočtu 4000 Hz sejevila horizontální směrová charakteristika nepatrně nesymetrická v oblasti vyšších kmitočtů. Na grafech vertikálních směrových charakteristik je zřejmé, že pro různé dělicí kmitočty zůstává reproduktorová soustava stále symetrická a směrové charakteristiky jsou bez většího zvlnění, což se také dalo očekávat. Větší rozdíly ve směrové charakteristice jsou však patrné při horizontální poloze reproduktorové soustavy, a to zejména na dělicích kmitočtech, přestože pro nízké kmitočty (100 Hz) a vysoké kmitočty (10 000 Hz) je tvar směrových charakteristik přibližně shodný. U vysokých kmitočtů je patrná užší směrová charakteristika, zatímco u nízkých kmitočtů je směrová charakteristika kulová nezvlněná. Při dělicím kmitočtu 2800 Hz jsou na směrové charakteristice vidět minima přibližně při 40° natočení od osy, avšak její tvar strmě neklesá. Při dělicím kmitočtu 4000 Hz je patrné menší zvlnění směrové charakteristiky, avšak postranní laloky charakteristiky jsou více potlačeny. Zajímavě však dopadlo měření s dělicím kmitočtem 2000 Hz, kdy jsou směrové charakteristiky v horizontální poloze poměrně vyrovnané pro všechny kmitočty v celém pásmu i mimo osu reproduktorové soustavy.

## Seznam použité literatury

- [1] TOMAN, K. *Reproduktory a reprosoustavy*. 1. díl 1. vyd. Karviná : DEXON, 2001. 212 s.
- [2] SVOBODA, L., ŠTEFAN, M. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*. 3. přeprac. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1983. 280 s. ISBN 04-503-83.
- [3] SÝKORA, B. : *Stavíme reproduktorové soustavy*. 1. – 48. díl. Amatérské Rádio, 10/97 – 9/2001. ISSN 0322-9572
- [4] Tulip. *Za scénou – Dr. D'Appolito* [online].[cit.2008-12-06]. Dostupné z: <<http://www.usheraudio.cz/profil/d-appolito>>.
- [5] Premiss Communication AS. *The art of sound perfection by Seas* [online]. 2005, [cit.2008-11-30]. Dostupné z: < <http://www.seas.no>>.
- [6] Ingemar Johansson. *IJData* [online].[cit.2008-12-10]. Dostupné z: <<http://www.ijdata.com>>.

## Seznam symbolů a zkratk

A	útlum
$C_{DP}$	kapacita v dolní propusti
$C_{HP}$	kapacita v horní propusti
$C_{kr}$	kapacita členu kompenzace rezonance
$C_m$	ekvivalent hmotnosti kmitacího systému
d	vzdálenost
f	kmitočet
$f_d$	dělicí kmitočet
$f_r$	rezonanční kmitočet reproduktoru
$f_{rb}$	rezonanční kmitočet reproduktoru v ozvučnici
Hi-fi	(High fidelity) označení vysoké věrnosti reprodukce akustického signálu
$L_b$	ekvivalent tuhosti závěsu
$L_{DP}$	indukčnost v dolní propusti
$L_{HP}$	indukčnost v horní propusti
$L_{ki}$	indukčnost členu kompenzace indukčnosti
$L_{kr}$	indukčnost členu kompenzace rezonance
$L_m$	ekvivalent tuhosti závěsu membrány
M.D.F.	(Medium density fibreboard) Středně zhuštěná dřevovláknitá deska
P	akustický výkon
$Q_{tc}$	celkový činitel jakosti uzavřené soustavy
$Q_{ts}$	celkový činitel jakosti reproduktoru
$R_{ki}$	odpor členu kompenzace indukčnosti
$R_{kr}$	odpor členu kompenzace rezonance
$R_m$	ekvivalent mechanického tlumení kmitacího systému
$R_s$	stejnoseměrný odpor kmitací cívky
S	plocha membrány
$V_{as}$	ekvivalentní objem reproduktoru
$V_b$	objem ozvučnice
y	výchylka membrány
$\omega$	úhlový kmitočet

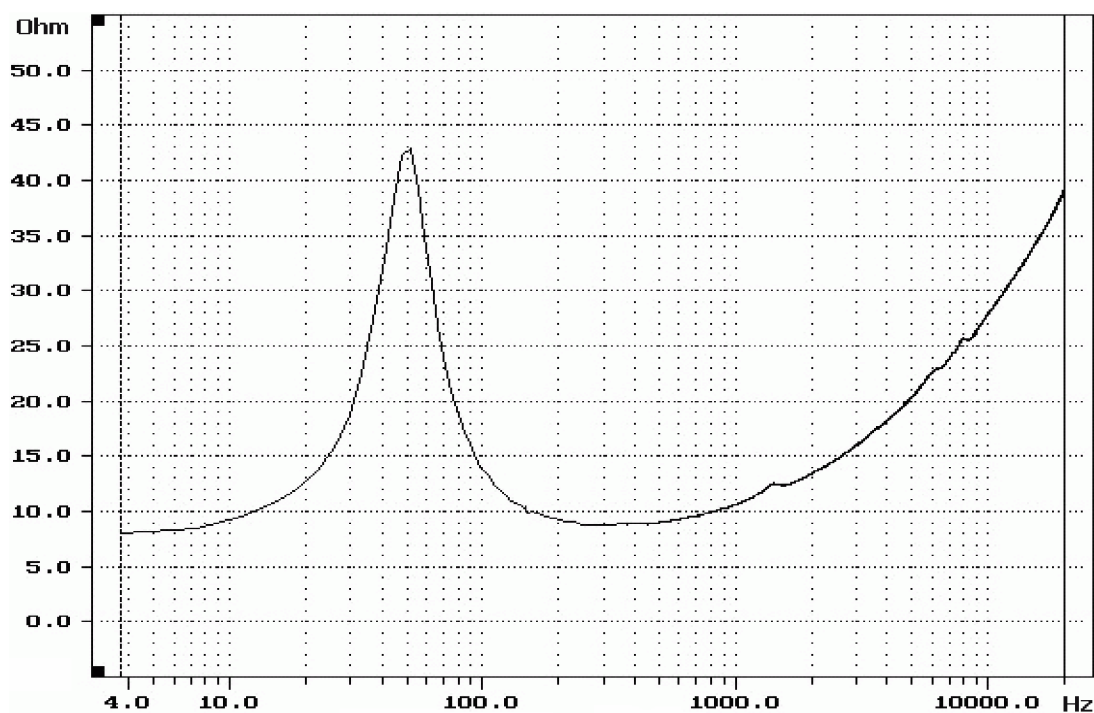
## **Přílohy**

Příloha A: Technické parametry reproduktoru TVM Acoustics ARN-130-02/8.....	50
Příloha B: Technické parametry reproduktoru Monacor DT-25N.....	52
Příloha C: Výkres navrhnuté reproduktorové soustavy.....	53
Příloha D: Schéma výhybky ve formátu EAGLE .....	54
Příloha D: DPS ve formátu EAGLE.....	55
Příloha D: Osazovací schéma výhybky.....	56
Příloha E: Fotografie reproduktorové soustavy.....	57
Příloha F: Obsah přiloženého CD.....	59

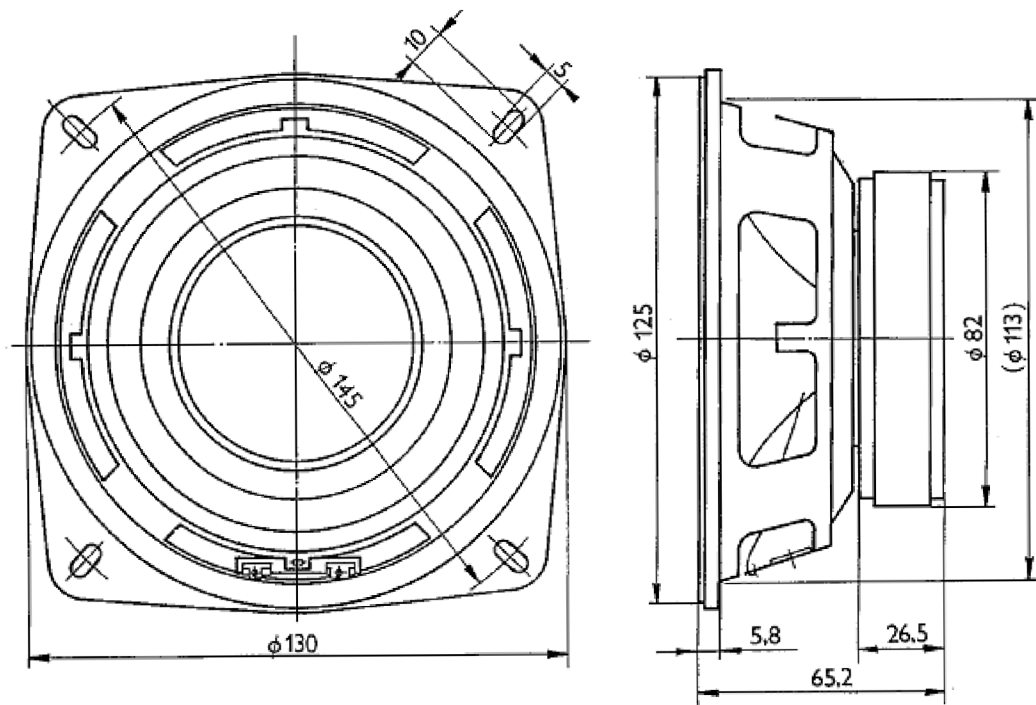
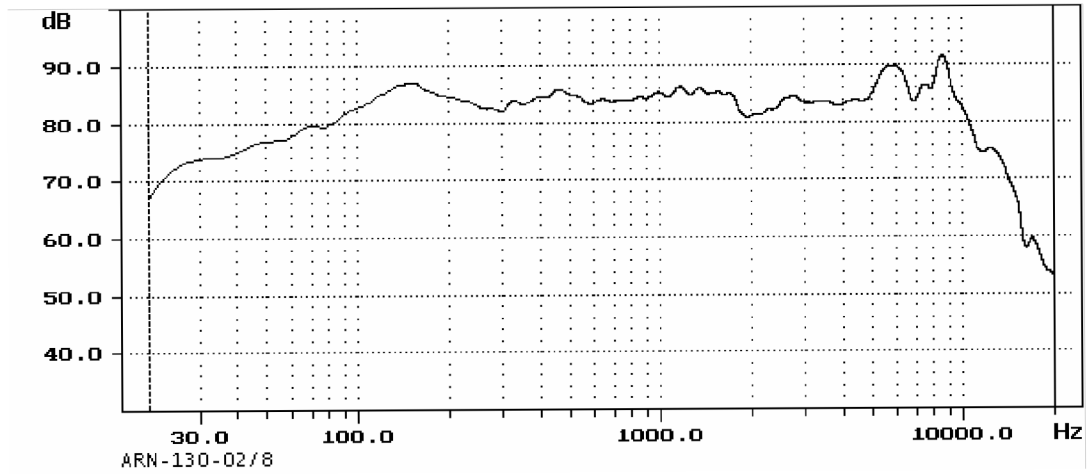
**Příloha A: Technické parametry reproduktoru TVM Acoustics ARN-130-02/8.**

**TVM Acoustics ARN-130-02/8**

AKUSTICKÁ DATA		MECHANICKÁ DATA	
Jmenovitý šumový příkon*	60 W	Kmitací cívka	Aluminium
Krátkodobý maximální příkon*	100 W	Průměr kmitací cívky	25,4 mm
Jmenovitá impedance	8 Ω	Výška vinutí kmitací cívky	13 mm
Rezonanční kmitočet Fs	45 Hz	Průměr jádra	25 mm
Jmenovitý kmitočtový rozsah	45-5000 Hz	Výška vzduchové mezery	4,5 mm
Charakteristická citlivost	85 dB	Vnější průměr magnetu	82 mm
TS PARAMETRY		Vnitřní průměr magnetu	33 mm
Efektivní plocha membrány Sd	72 cm <sup>2</sup>	Výška magnetu	17 mm
Stejnoseměrný odpor kmitací cívky Re	7.8 Ω	Hmotnost	0.8kg
Mechanický činitel jakosti Qms	2.25		
Elektrický činitel jakosti Qes	0.48		
Celkový činitel jakosti Qts	0.40		
Indukčnost kmitací cívky Le	0.6 mH		
Ekvivalentní objem Vas	11.2 l		
Celková kmitající hmotnost Mms	6.9 g		
Mechanická poddajnost závěsu Cms	1525 uM/Newton		
Silový faktor Bl	5.8 Tm		
Maximální lineární výchylka Xmax	8.5 mm		



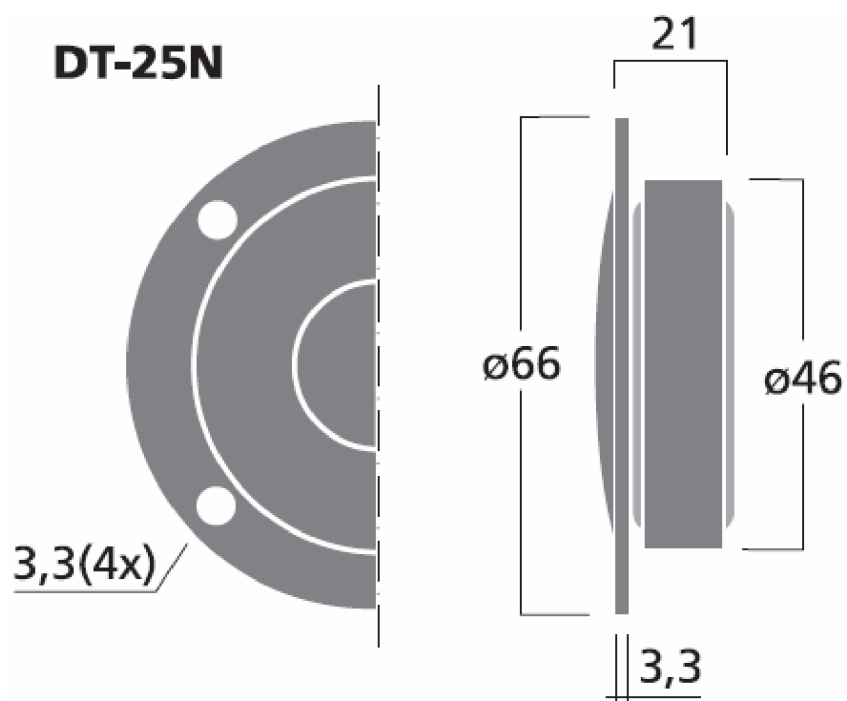
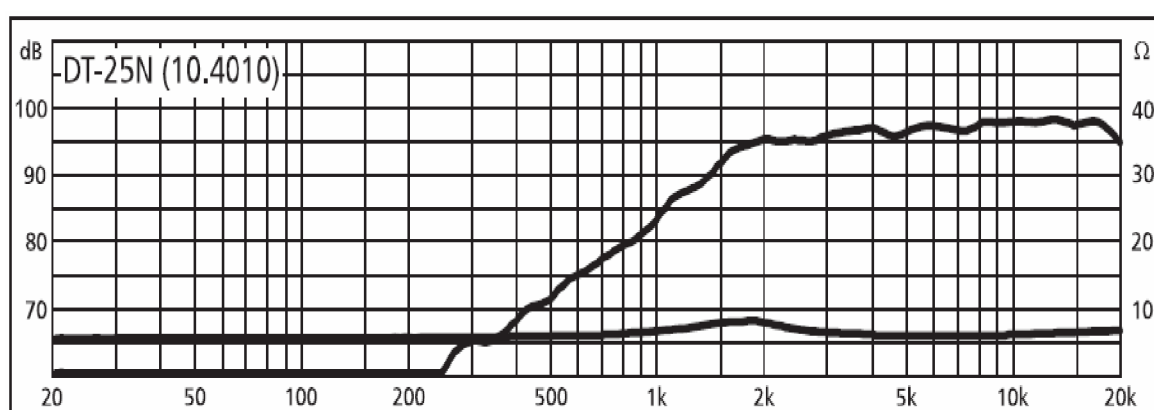
# TVM Acoustics ARN-130-02/8



**Příloha B: Technické parametry reproduktoru Monacor DT-25N.**

**Monacor DT-25N**

AKUSTICKÁ DATA		MECHANICKÁ DATA	
Jmenovitý šumový příkon*	40 W	Magnet	neodymium
Krátkodobý maximální příkon*	80 W	Průměr kmitací cívky	25 mm
Jmenovitá impedance	8 Ω	Vnější průměr magnetu	46 mm
Rezonanční kmitočet Fs	1600 Hz	Vnitřní průměr magnetu	33 mm
Jmenovitý kmitočtový rozsah	2-20 kHz	Výška magnetu	18 mm
Charakteristická citlivost	95 dB	Hmotnost	70 g

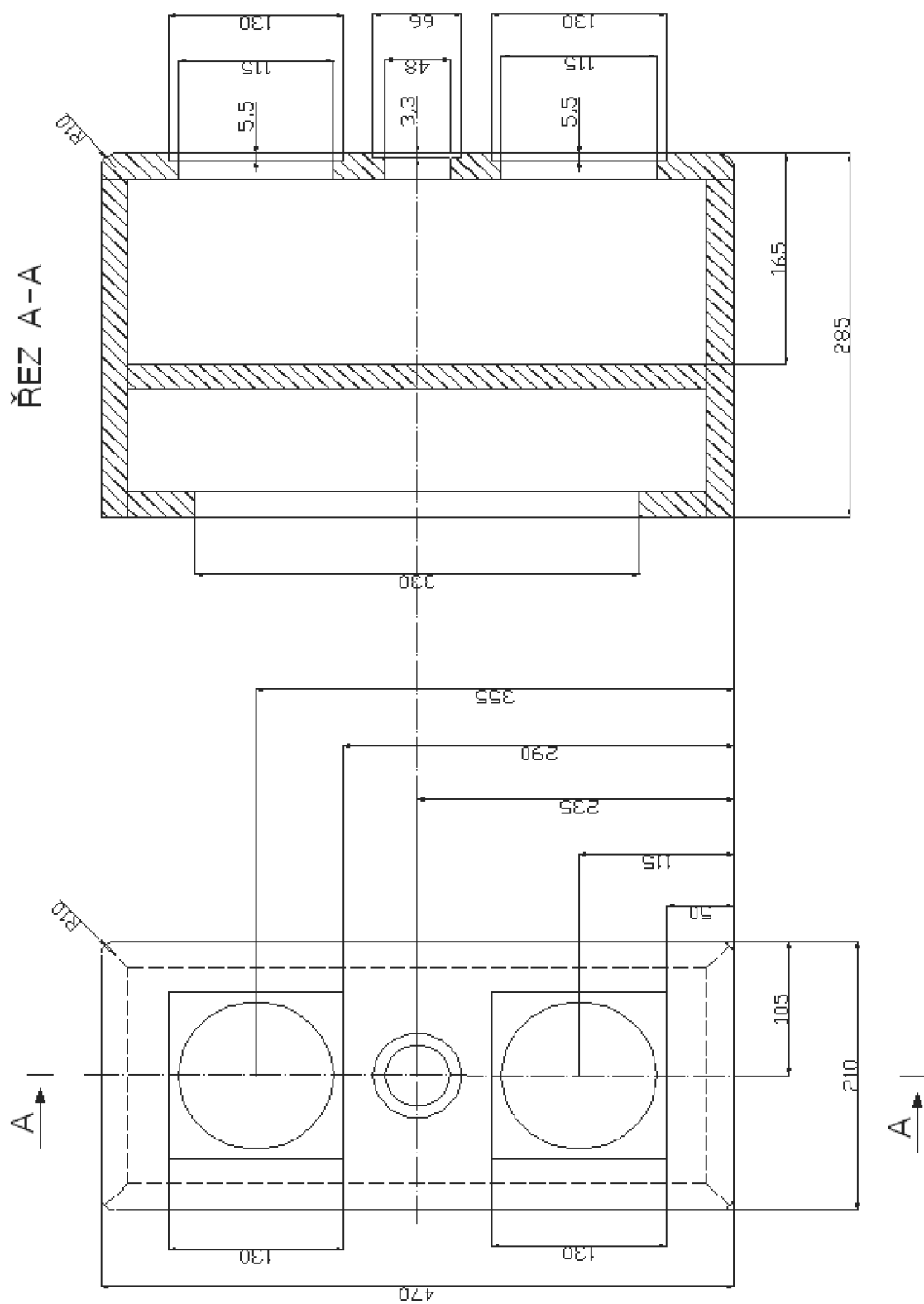


\* Dle ČSN IEC 268-5, s předřazeným filtrem 5 kHz 100 hod. nepřerušovaně

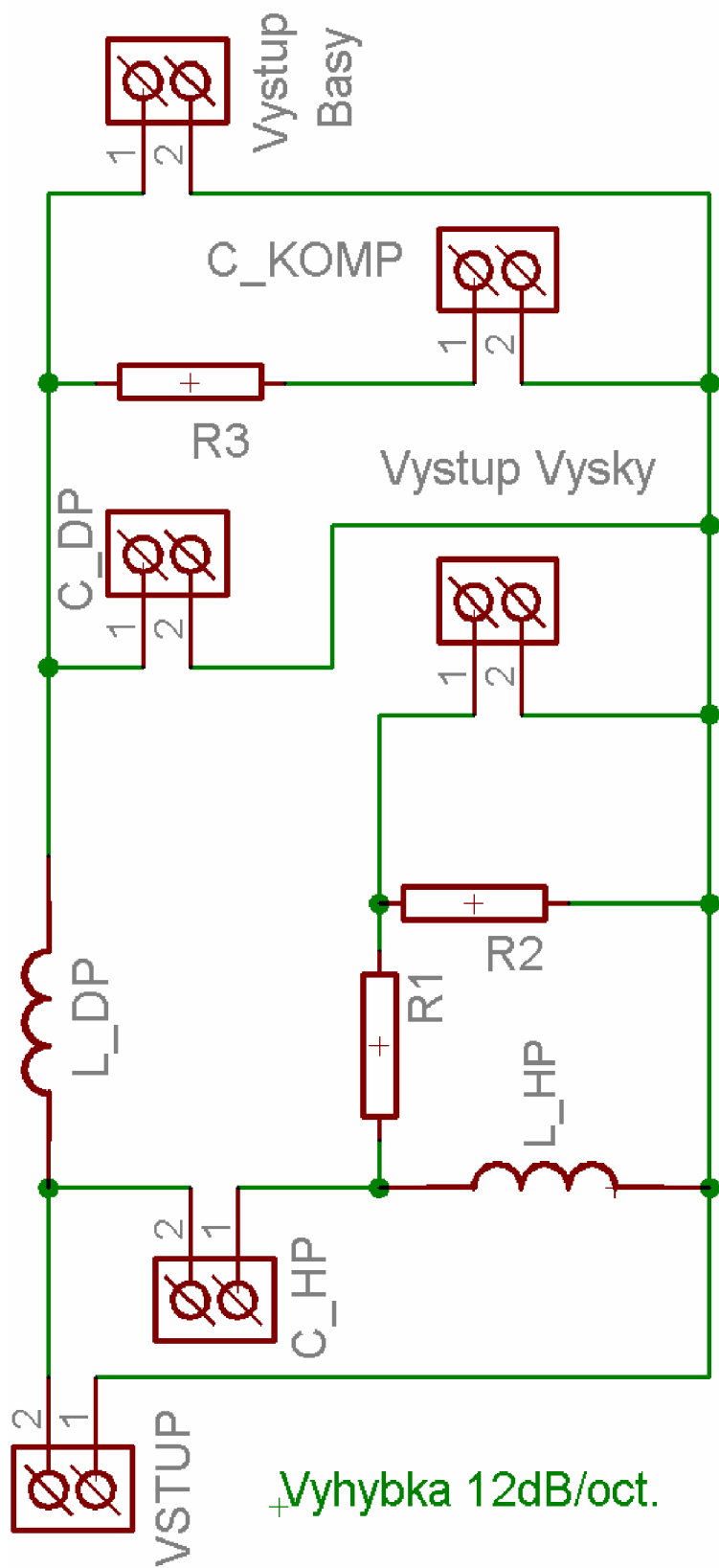
\*\* Dle ČSN IEC 268-5, standardní ozvučnice, 1 W, 1 m, 2500 - 18000 Hz

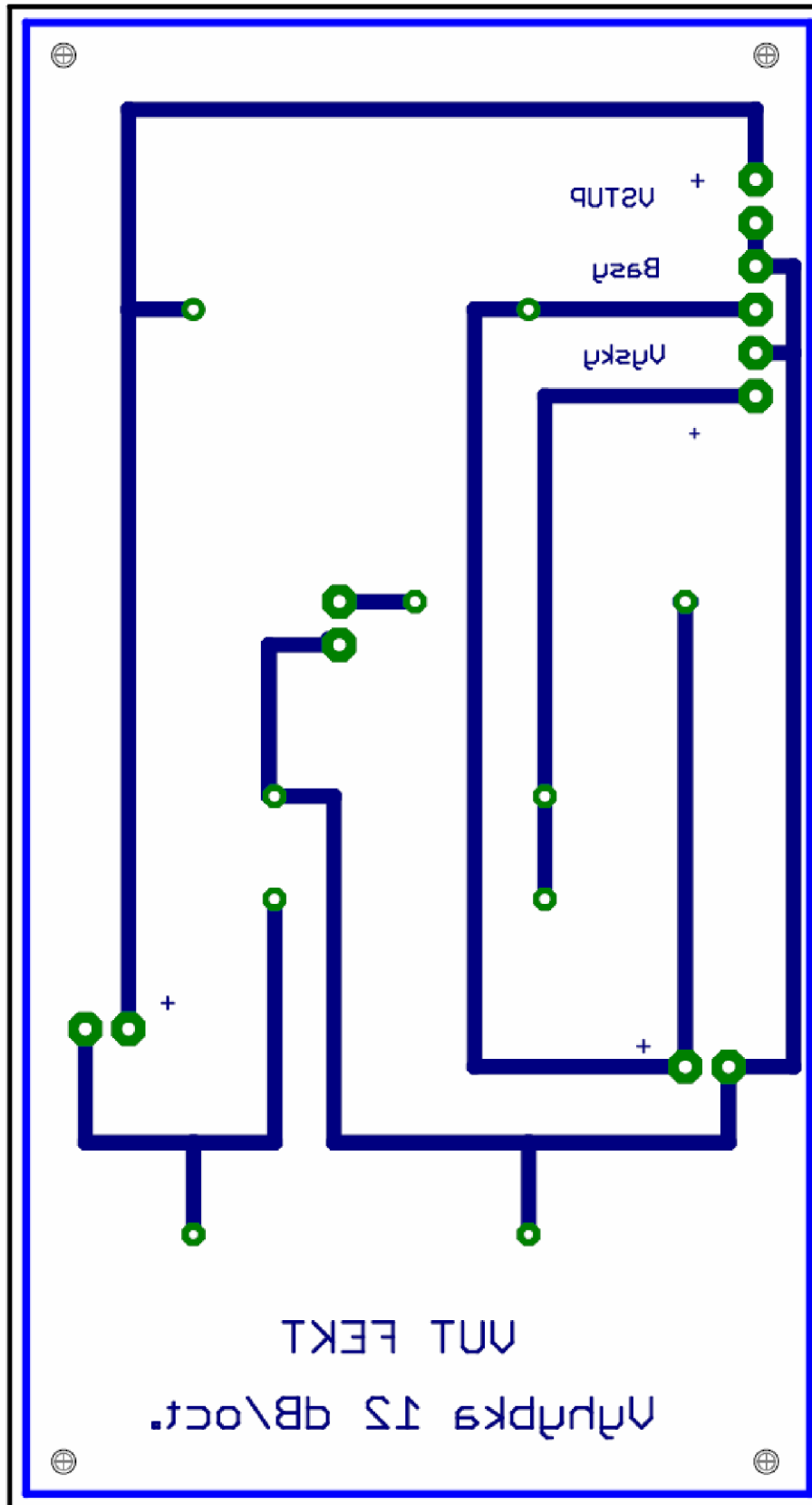


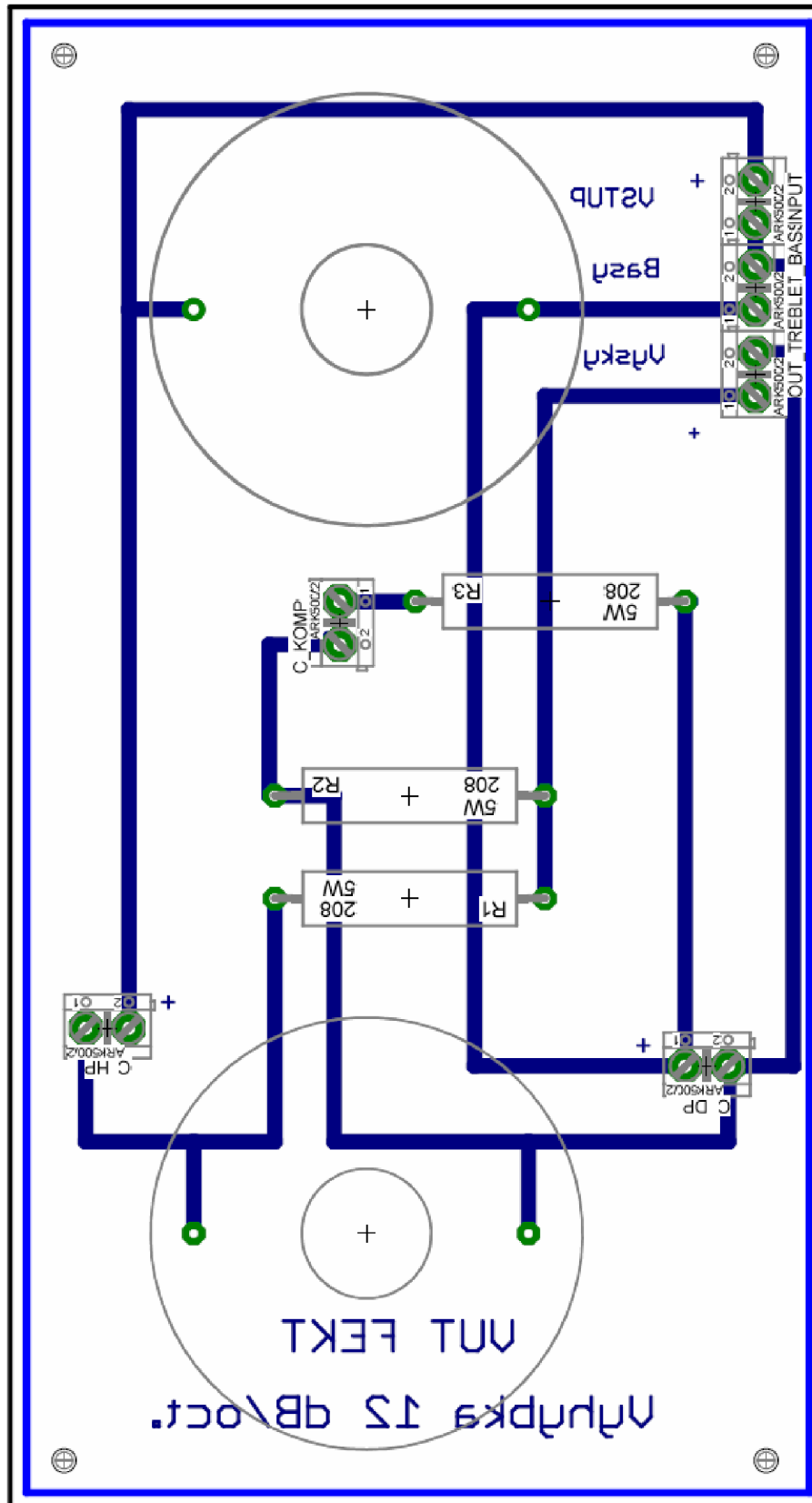
**Příloha C: Výkres navrhnuté reproduktorové soustavy.**



Příloha D: Schéma DPS a osazovací schéma DPS ve formátu EAGLE.







**Příloha E: Fotografie reproduktorové soustavy.**





## **Příloha F: Obsah přiloženého CD.**

Na přiloženém médiu jsou (kromě elektronické verze práce) umístěny také zdrojové soubory, naměřená data a schémata. Tento seznam slouží pro snadnou orientaci v adresářích.

V adresáři **Bakalářská práce\_xtomas01** se nachází tyto složky:

<b>Elektronická verze BP</b>	obsahuje vlastní text bakalářské práce včetně zdrojových souborů
<b>Naměřená data</b>	obsahuje naměřená data, grafy a tabulky (soubory MS Excel)
<b>Obrázky</b>	obsahuje obrázky použité v textu BP
<b>Ozvučnice</b>	obsahuje schéma ozvučnice reproduktoru (soubor <i>Ozvucnice_schema.dwg</i> )
<b>Reproduktorová výhybka</b>	obsahuje schéma reproduktorové výhybky a zdrojové soubory pro program Eagle