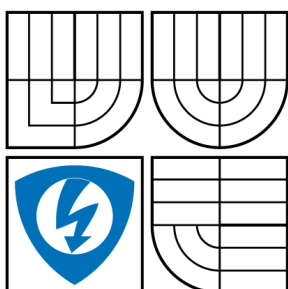


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA PRO LABORATORNÍ MĚŘENÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK

LOUDSPEAKER SYSTEM FOR LABORATORY MEASUREMENTS OF POLAR PATTERNS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

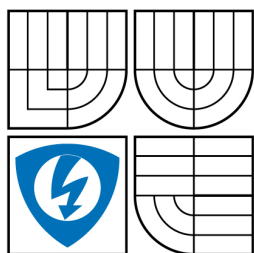
FILIP MORKUS

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:** Filip Morkus

**ID:** 88811

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

**Reproduktorová soustava pro laboratorní měření směrových charakteristik**

## 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:**

V první části je pozornost směřována k výběru vhodných reproduktorů. Pro tento výběr bylo zapotřebí si stanovit požadovaná kritéria a parametry. Cílem bylo, aby soustava měla co nejširší reprodukovatelné spektrum kmitočtů, ale aby nebyla příliš rozměrná. Dalším kritériem byla kvalita reproduktorů a jejich cena.

V druhé části byla podle parametrů vybraných reproduktorů navrhována kmitočtová výhybka, jak pro spodní kmitočtové pásmo, tak pro pásmo horní. Při stanovení dělícího kmitočtu byly brány v úvahu doporučení výrobce a kmitočtové charakteristiky reproduktorů, aby nebyl dělící kmitočet umístěn do místa, kde nemá reproduktor „konstantní“ charakter.

Třetí část se zabývala konstrukcí reproduktorové skříně (ozvučnice). Byla zde podrobněji rozvedena konstrukce reproduktorové soustavy typu D'Appolito a její konstrukční požadavky. V této části bylo rovněž vycházeno z předchozích částí, protože zapojení D'Appolito vyžaduje stanovení vzdálenosti reproduktorů vůči sobě podle dělícího kmitočtu. Přičemž musela být brána v úvahu jejich velikost. Podle parametrů reproduktorů se vypočítal objem reproduktorové skříně, stanovil se její tvar a vypočítaly geometrické rozměry. Vše bylo pak simulováno ve vhodném softwaru.

V poslední části byla již zkonstruovaná soustava měřena v bezodrazové komoře. Bylo na ní provedeno měření směrových charakteristik a kmitočtové charakteristiky. Výsledky měření byly porovnány se simulacemi.

## **Klíčová slova:**

Reproduktor, D'Appolito, kmitočtová výhybka, dělící kmitočet, reproduktorová skříň, ozvučnice, objem, směrová charakteristika, kmitočtová charakteristika, simulace.

## **Abstract:**

In the first part the attention is aiming to the choice of suitable loudspeakers. For this choice it was necessary to set required criteria and parameters. The aim of the system was to have as wide reproducibility range of frequency as possible but on the other hand not to be too large. The other criterion was the quality of the loudspeakers and its price.

In the second part there was frequency crossover suggested according to the parameters of the chosen loudspeakers. This was suggested for low frequency spectrum as well as for high frequency spectrum. When determining the dividing frequency there were thought over producer's recommendations and frequency characteristics of the loudspeakers so that the dividing frequency was not set in the place where the loudspeaker does not have "constant" character.

The third part concerns the construction of the loudspeaker case. There one can find more details about the construction of the loudspeaker system called D'Appolito and its constructional requirements. This part was kept to the previous parts because integrating "D'Appolito" needs setting the distance between the loudspeakers according to the dividing frequency. It was also necessary to count with their size. According to the loudspeakers parameters it was possible to calculate the capacity of the loudspeaker case, also its shape was said and geometric proportions were calculated. Then everything was simulated in suitable software.

In the last part the complete loudspeaker system was measured in an anechoic room. There were the direction characteristics and frequency characteristics measured there. The results of the measuring were compared with the software simulations.

## **Keywords:**

Loudspeaker, D'Appolito, frequency crossover, dividing frequency, loudspeaker case, baffle, polar pattern, frequency characteristic, simulation.

## CITACE PRÁCE

MORKUS, F. *Reproduktorová soustava pro laboratorní měření směrových charakteristik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 27 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA PRO LABORATORNÍ MĚŘENÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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 Třešti dne 31.5.2009,

.....

podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Schimmlovi, Ph.D. a Ing. Kamilovi Tomanovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování práce.

V Třešti dne 31.5.2009,

.....

podpis autora

# OBSAH

Obsah.....	1
Seznam obrázků.....	2
Seznam tabulek.....	3
Úvod.....	4
1 Výběr reproduktorů.....	5
1.1 Kritéria pro výběr reproduktorů.....	5
1.2 Výběr reproduktorů dle kritérií.....	5
2 Kmitočtové výhybky.....	7
2.1 Filtr typu dolní propust pro středobasový reproduktor.....	7
2.1.1 Výpočet indukčnosti a kapacity filtru typu dolní propust.....	8
2.1.2 Kompenzační článek RC.....	9
2.1.3 Simulace reálného zapojení filtru typu dolní propust na počítači.....	6
2.1.4 Výběr součástek pro filtr typu dolní propust z katalogu.....	7
2.2 Filtr typu horní propust pro výškový reproduktor.....	7
2.2.1 Výpočet indukčnosti a kapacity filtru typu horní propust.....	8
2.2.2 Simulace zapojení filtru typu horní propust na počítači.....	8
2.2.3 Výběr součástek pro filtr typu horní propust z katalogu.....	10
2.3 Zapojení navržených filtrů do jednoho obvodu a simulace na počítači.....	10
2.4 Návrh plošného spoje.....	12
3 Reproduktorová skříň.....	13
3.1 Uspořádání D'Appolito.....	13
3.2 Návrh čelní strany reproduktorové skříně.....	13
3.3 Návrh zbývajících stran reproduktorové skříně.....	15
3.3.1 Objem reproduktorové skříně.....	15
3.3.2 Rozměry a tvary ostatních stěn reproduktorové skříně.....	15
3.4 Simulace směrové charakteristiky na PC.....	18
4 Měření parametrů sestavené reproduktorové soustavy.....	19
4.1 Směrová charakteristika.....	19
4.2 Kmitočtová charakteristika.....	21
4.3 Porovnání reálných parametrů se simulovanými.....	22
5 Závěr.....	24
Seznam literatury.....	25
Přehled použitých zkratk, veličin a symbolů.....	26
Seznam příloh.....	27



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Vybrané reproduktory a) BRB 6"/50/01,8, b) HRT 8/50/01,8.....	6
Obr. 2.1 Schéma filtru dolní propust 2. řádu .....	7
Obr. 2.2 Kmitočtová charakteristika reproduktoru BRB 6"/50/01,8 .....	8
Obr. 2.3 Kmitočtová charakteristika bez kompenzace .....	9
Obr. 2.4 Kompenzační článek RC .....	9
Obr. 2.5 Kmitočtová charakteristika s kompenzací indukčnosti.....	6
Obr. 2.6 Schéma zapojení při simulaci v programu Micro-Cap .....	6
Obr. 2.7 Kmitočtová charakteristika odladěného filtru dolní propust.....	7
Obr. 2.8 Filtr typu horní propust .....	7
Obr. 2.9 Kmitočtová charakteristika výškového reproduktoru .....	8
Obr. 2.10 Schéma zapojení HP při simulaci v programu Micro-Cap.....	8
Obr. 2.11 Závislost impedance na frekvenci výškového reproduktoru .....	9
Obr. 2.12 Kmitočtová charakteristika filtru horní propust s vypočtenými.....	9
Obr. 2.13 Kmitočtová charakteristika filtru HP s katalogovými součástkami .....	10
Obr. 2.14 Schéma zapojení filtrů typu dolní a horní propust do jednoho obvodu .....	11
Obr. 2.15 Kmitočtové charakteristiky filtrů dolní propust a horní propust zapojené do jednoho obvodu.....	11
Obr. 2.16 Fázové charakteristiky filtrů dolní a horní propusti zapojené.....	12
Obr. 2.17 Plošný spoj pro navržené filtry .....	12
Obr. 3.1 Uspořádání podle dr. D'Appolita .....	13
Obr. 3.2 Čelní strana reproduktorové skříně.....	14
Obr. 3.3 Tvary jednotlivých stěn reproduktorové skříně.....	16
Obr. 3.4 Obrázek pro výpočet rozměrů bočnice.....	16
Obr. 3.5 Rozměry bočnice .....	17
Obr. 3.6 Simulovaná směrová charakteristika .....	18
Obr. 4.1 Směrové charakteristiky a) 100 Hz, b) 3 kHz, c) 4,65 kHz ( $f_{DD}$ ), d) 10 kHz..	20
Obr. 4.2 Graf kmitočtové charakteristiky.....	22
Obr. 4.3 Porovnání a) simulované a b) odměřené směrové charakteristiky .....	22

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Nabídka a přehled parametrů vybraných reproduktorů firmy Dexon .....	5
Tab. 1.2 Zvolené reproduktory pro konstrukci skříně podle D'Appolita.....	6
Tab. 1.3 Výpis základních parametrů reproduktorů z katalogových listů firmy Dexon.	6
Tab. 2.1 Rozměry a parametry použitých součástí pro výrobu filtrů DP a HP. ....	12
Tab. 3.1 Hodnoty $d$ při $k = 1, 2, 3, 4, 5$ a mezním kmitočtu 4650 Hz .....	14
Tab. 3.2 $Q_{tc}$ pro různé typy aproximací .....	15
Tab. 4.1 Naměřené hodnoty pro směrovou charakteristiku.....	20
Tab. 4.2 Naměřené hodnoty pro kmitočtovou charakteristiku .....	21

# ÚVOD

Reproduktorová soustava pro měření směrových charakteristik by měla co nejlépe reprezentovat teoretické znalosti studentů, které se při měření v laboratorních podmínkách snaží demonstrovat v praxi teoretické znalosti. Uspořádání D'Appolito je konstruováno tak, aby směrové charakteristiky měly vertikálně symetrickou charakteristiku s nízkým zvlněním.

Při samotném návrhu se bude postupovat v krocích, přičemž následující krok bude vycházet z předchozího kroku, protože jednotlivé kroky na sebe navazují a vycházejí z předchozích hodnot. Bude tedy nutné v první řadě vybrat vhodné reproduktory, ke kterým podle jejich parametrů budou konstruovány filtry, aby do každého reproduktoru byl přiváděn pouze signál, který je pro něj reprodukovatelný.

Po výběru reproduktorů a zhotovení návrhu filtrů je vhodný čas na návrh přední strany reproduktorové skříně, která pro konstrukci typu D'Appolito musí splňovat určité parametry. Podle přední strany s pomocí vypočítaného objemu se určí vzhled a rozměry ostatních stran reproduktorové skříně. Posléze už zbývá jen volba konstrukčních materiálů.

V okamžiku, kdy bude celá reproduktorová soustava již sestavena, bude ji možno v bezodrazové komoře změřit směrovou a kmitočtovou charakteristiku a porovnat je se simulacemi.

# 1 VÝBĚR REPRODUKTORŮ

V následující části bude věnována pozornost výběru reproduktorů, které budou pro účely zadání plnit požadovaná kritéria.

## 1.1 Kritéria pro výběr reproduktorů

Základním stavebním prvkem každé reproduktorové skříně je elektroakustický měnič, který se též nazývá reproduktor. Do podmínek pro výběr reproduktorů je potřeba zahrnout jistá kritéria a nároky. To jak z hlediska požadovaného výkonu a funkce, kterou bude konkrétní zástavba zastávat, prostorové nároky a v neposlední řadě i finanční investice, jakou bude potřeba vynaložit.

Od vybraných reproduktorů a hlavně jejich parametrů se vyvíjí veškeré následné konstrukční výpočty a operace, počínaje geometrickým uspořádáním skříně reproduktoru, objemem této skříně a výpočty mezních kmitočtů pro propusti jednotlivých reproduktorů.

Z těchto hledisek je nutné věnovat výběru reproduktorů zvýšenou pozornost a promyslet si jednotlivé varianty zapojení a nároků na stavěnou sestavu. Protože případné zanedbání některého z hledisek může způsobit jisté konstrukční komplikace, poddimenzování či zbytečné předimenzování sestavy.

## 1.2 Výběr reproduktorů dle kritérií

V případě navrhování reproduktorové soustavy pro měření směrových charakteristik v laboratorních měřeních není kladen vysoký nárok na výkon této sestavy, ale spíše na jakost reprodukováného zvuku a ověření si teoretických znalostí v praktickém provedení. D'Appolito konstrukce reproduktorů se vyznačuje téměř symetrickou směrovou charakteristikou s nízkým zvlněním. Tato charakteristika se bude laboratorním měřením ověřovat, bude tedy při realizaci a návrhu kladen důraz na přesnou konstrukci a výpočty dílčích parametrů.

Tab. 1.1 Nabídka a přehled parametrů vybraných reproduktorů firmy Dexon

Název	Průměr	Impedance [ $\Omega$ ]	$f_{\min}$ [Hz]	$f_{\max}$ [Hz]	RMS [W]	Citlivost [dB]	Cena [Kč]
BRB 6"/50/01,8	6"	8	80	6 000	50	91	550
BRB 8"/100/01,8	8"	8	83	7 500	100	92	890
BRB 10"/250/01,8	10"	8	63	5 000	250	94	1390
BRB 12"/300/01,8	12"	8	52	3 400	300	95	1990
BRB 15"/300/01,8	15"	8	53	4 000	300	96	2190
BRT 25/20/01,8		8	1 600	20 000	20	105	690
BRT 25/30/01,8		8	1 000	20 000	30	98	990
BRT 25/50/01,8		8	1 200	20 000	50	101	1390
HRB 25/100/03,8	25 cm	8	33	3 000	100	89	1390
HRB 13/40/02,8	13 cm	8	50	6 000	40	84	290
HRT 8/50/01,4		4	1 500	20 000	50	94	330
HRT 8/50/01,8		8	1 500	20 000	50	94	290
DRB 13/40/01,6	14 cm	6	40	8 000	40	92	79
DRFD 16/10/02,8	16 cm	8	100	10 000	10	85	120
DRB 10"/100/01,8	10"	8	50	5 000	100	90	690
DRB 12"/150/01,8	12"	8	40	4 000	150	90	890

Pro dvoupásmové zapojení, které vyžaduje dva středobasové reproduktory a jeden výškový reproduktor, se jako nejvhodnější z Tab. 1.1 jeví, podle výše uvedených požadavků, tyto dva reproduktory, viz Tab. 1.2.

Tab. 1.2 Zvolené reproduktory pro konstrukci skříně podle D'Appolita

Název	Průměr	Impedance [ $\Omega$ ]	$f_{\min}$ [Hz]	$f_{\max}$ [Hz]	RMS [W]	Citlivost [dB]	Cena [Kč]
BRB 6"/50/01,8	6"	8	80	6 000	50	91	550
HRT 8/50/01,8		8	1 500	20 000	50	94	290

**Poznámka:** Výškový reproduktor HRT 8/50/01,8 při konstrukci již nebyl v nabídce výrobce. Jím mi byla doporučena adekvátní náhrada a to reproduktor GDWK 10/80/7,8. Který má srovnatelné parametry, pouze je zde vyšší doporučená  $f_{DD}$  a to 4 kHz. Tento reproduktor nemá publikován katalogový list. Z těchto důvodů budu dále vycházet z parametrů reproduktoru HRT 8/50/01,8.

Tab. 1.3 Výpis základních parametrů reproduktorů z katalogových listů firmy Dexon

	BRB 6"/50/01,8	HRT 8/50/01,8
Nominální průměr	160 mm	-
Nominální impedance	8 $\Omega$	8 $\Omega$
Nominální výkon RMS	50 W	50 W (HP 12 dB/oct)
Maximální výkon	100 W	-
Citlivost	91 dB	94 dB
Frekvenční rozsah	80 - 6000 Hz	1,5 - 20 kHz
Stejnoseměrný odpor	5,97 $\Omega$	6,2 $\Omega$
Minimální impedance	-	6,1 $\Omega$
Indukčnost	0,7 mH	-
Rezonanční frekvence	80,1 Hz	1800 Hz
Doporučená dělicí frekvence	-	> 3500 Hz
Ekvivalentní objem Vas	7,23 l	-
Plocha membrány	143 cm <sup>2</sup>	-

Nyní jsou nám známa všechna potřebná fakta o vybraných reproduktorech, které budeme při následujících krocích návrhů potřebovat. Pro případ potřeby jsou v příloze č.1 a č.2 této semestrální práce vloženy originální katalogové listy jednotlivých součástek.



a)



b)

Obr. 1.1 Vybrané reproduktory a) BRB 6"/50/01,8, b) HRT 8/50/01,8.

## 2 KMITOČTOVÉ VÝHYBKY

Aby nedocházelo k nežádoucímu přetěžování a předcházelo se i možnému poškození reproduktorů kmitočty, které nejsou schopny reprodukovat a na které nejsou konstrukčně navrženy, je nutné pro každou sadu reproduktorů redukovat pásmo kmitočtů, pro které je reproduktor navržen. Šířka pásma reprodukovatelného signálu, jinak řečeno rozsah kmitočtu, je uváděn u každého reproduktoru jeho výrobcem.

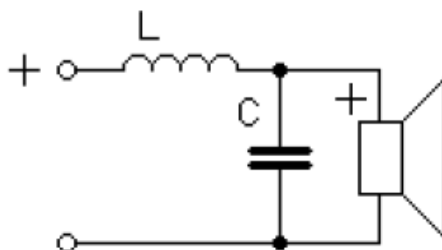
Existují čtyři hlavní druhy reproduktorů z hlediska kmitočtových rozsahů, na které jsou konstruovány.

1. basové
2. středové
3. výškové
4. širokopásmové

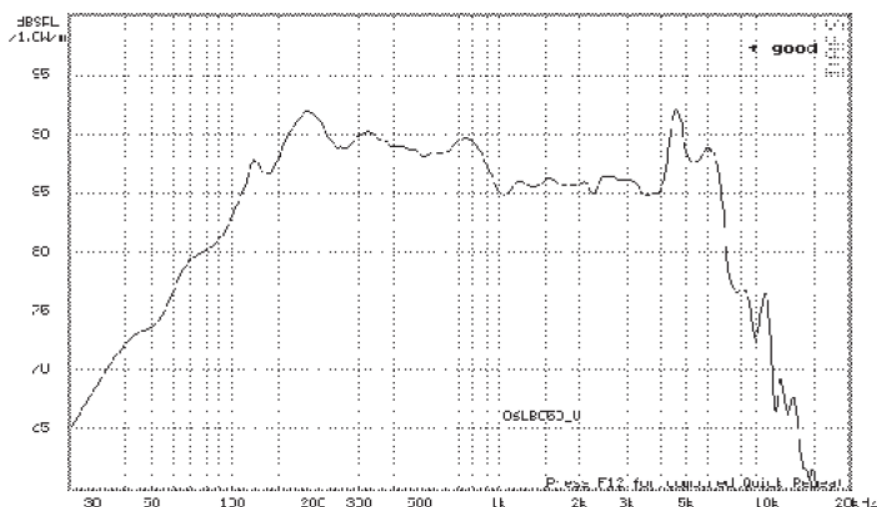
Při konstruování reproduktorových sestav se setkáváme s různými typy zapojení těchto druhů reproduktorů. Někdy se využívá tří druhů reproduktorů (třípásmové sestavy – basový, výškový, středový), někdy jen dvou (dvoupásmové sestavy – středobasový, výškový) a v nenáročných případech postačí pouze jeden druh reproduktoru, ve většině případů se jedná o reproduktor širokopásmový (jednopásmové sestavy). V případě mého zadání je požadováno dvoupásmové zapojení. Bude tedy třeba navrhnout dva filtry. První bude typu dolní propust, ta bude použita pro středobasový reproduktor, a druhým typem filtru bude horní propust, ten bude pro výškový reproduktor.

### 2.1 Filtr typu dolní propust pro středobasový reproduktor

V tomto případě bude nejvýhodnější použít pasivní filtr typu dolní propust druhého řádu, který má strmost 12 dB/okt (Obr. 2.1). Tato hodnota by měla plně vyhovovat požadovaným parametrům. Pro návrh takového filtru je zapotřebí stanovit dělicí kmitočet označovaný jako  $f_{DD}$ . Dělicí kmitočet se volí s ohledem na kmitočtový rozsah reproduktoru a průběhu kmitočtové charakteristiky. Může se stát, že ač má reproduktor daný kmitočtový rozsah, tak v některém místě, zejména ke konci kmitočtové charakteristiky (viz. Obr. 2.2) dochází ke zvlnění této charakteristiky, což je pro reprodukování hudby nežádoucí. Proto se zvolí dělicí kmitočet ještě před toto zvlnění nebo do místa, kde výchyly jsou ještě akceptovatelné.



Obr. 2.1 Schéma filtru dolní propust 2. řádu



Obr. 2.2 Kmitočtová charakteristika reproduktoru BRB 6"/50/01,8

### 2.1.1 Výpočet indukčnosti a kapacity filtru typu dolní propust

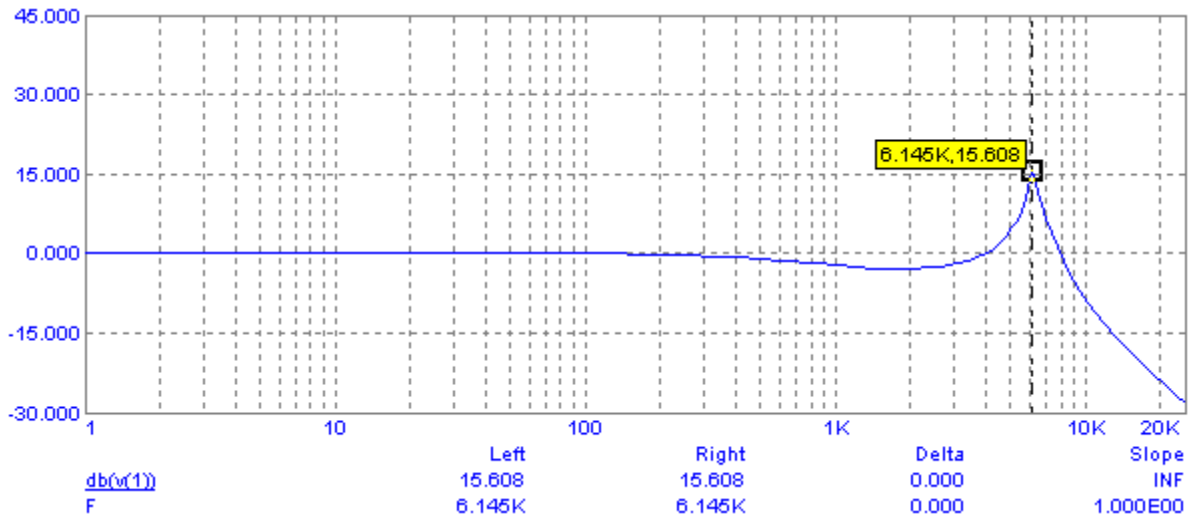
Při uvážení frekvenčního rozsahu a tvaru kmitočtové charakteristiky jsem si zvolil dělicí kmitočet roven 5000 Hz. Snažil jsem se tento kmitočet posunout co nejvýše a to z důvodu vyššího okamžitého výkonu, který je u tohoto reproduktoru 100W a dokáže jej tedy lépe reprodukovat nežli výškový reproduktor, který tak nebude zbytečně zatěžován vysokými výkony, které by mohly vést k jeho poškození.

Pro výpočet prvků filtru L a C budeme vycházet ze vzorců 2.1 a 2.2, (viz lit.[1]). Vztah vychází z Linkwitz – Rilley aproximace pro kterou platí  $Q = 0,500$ , čímž je splněna podmínka konstantní amplitudy akustického tlaku. Impedanci záměrně volím poloviční a to z důvodu 2x většího zatížení výhybky, protože na ní budou připojeny dva stejné reproduktory.

$$L = \frac{Z/2}{\pi \cdot f_{DD}} = \frac{4}{\pi \cdot 5000} = 0,255 \text{ mH} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{1}{4\pi \cdot f_{dd} \cdot Z/2} = \frac{1}{4\pi \cdot 5000 \cdot 4} = 3,99 \text{ } \mu\text{F} \quad (2.2)$$

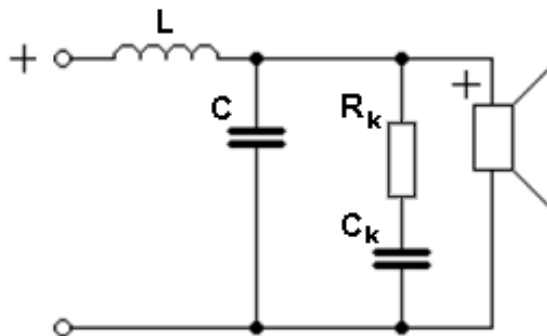
Při těchto výpočtech je brána v úvahu pouze reálná impedance reproduktoru, bohužel reálný reproduktor má spíše induktivní charakter a je třeba provést kompenzaci. Bez této kompenzace by se kmitočtová charakteristika značně zdeformovala, jak je vidět na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Kmitočtová charakteristika bez kompenzace

### 2.1.2 Kompenzační článek RC

Kompenzace se provádí paralelním přiřazením kapacitního prvku a to sériového RC článku k reproduktoru (Obr. 2.4). Tím se indukční a kapacitní charakter navzájem vyruší a kmitočtová charakteristika dostane žádaný tvar, jak je vidět na Obr. 2.5.



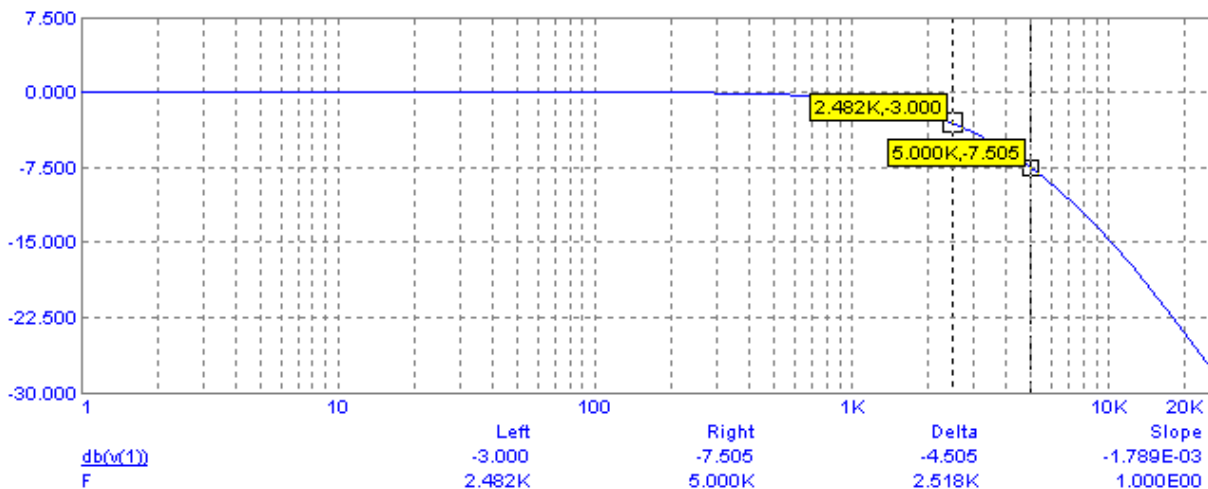
Obr. 2.4 Kompenzační článek RC

Hodnoty prvků  $R_k$  a  $C_k$  se vypočítají ze vztahů 2.3 a 2.4 (viz lit. [1]). Hodnoty impedance a rezistivity budou opět dosazeny v polovičních hodnotách z důvodu paralelního zapojení dvou reproduktorů.

$$R_k = \frac{R_c}{2} = 2,985 \Omega \quad (2.3)$$

$$C_k = \frac{\frac{L_c}{2}}{R_c^2} = 39,28 \mu\text{F} \quad (2.4)$$

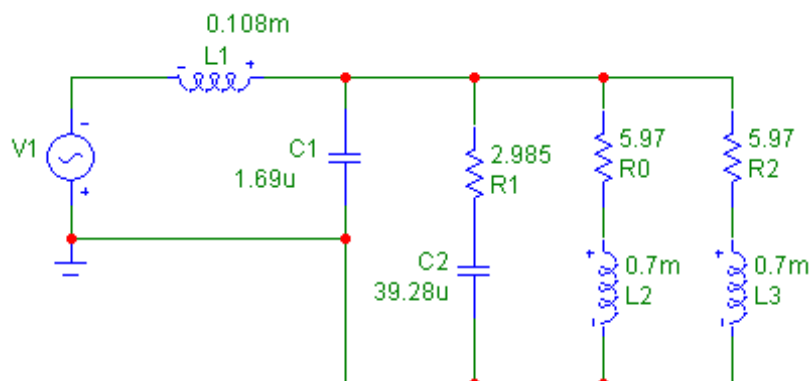




Obr. 2.5 Kmitočtová charakteristika s kompenzací indukčnosti

### 2.1.3 Simulace reálného zapojení filtru typu dolní propust na počítači

Na Obr. 2.5 je vyznačena hodnota útlumu v námi navrhovaném dělicím kmitočtu, jak z obrázku vyplývá, je zde již vysoký útlum a to -7,5 dB, což by vedlo k předčasnému propadu úrovně a při reprodukci by zde mohla vzniknout „díra“. Akceptovatelný útlum je -3dB (viz lit. [4]). Kmitočet, který odpovídá útlumu -3dB je též vyznačen na Obr. 2.5, jeho hodnota je 2482 Hz. Bude tedy nutné upravit hodnoty prvků filtru a posunout tuto charakteristiku více doprava.



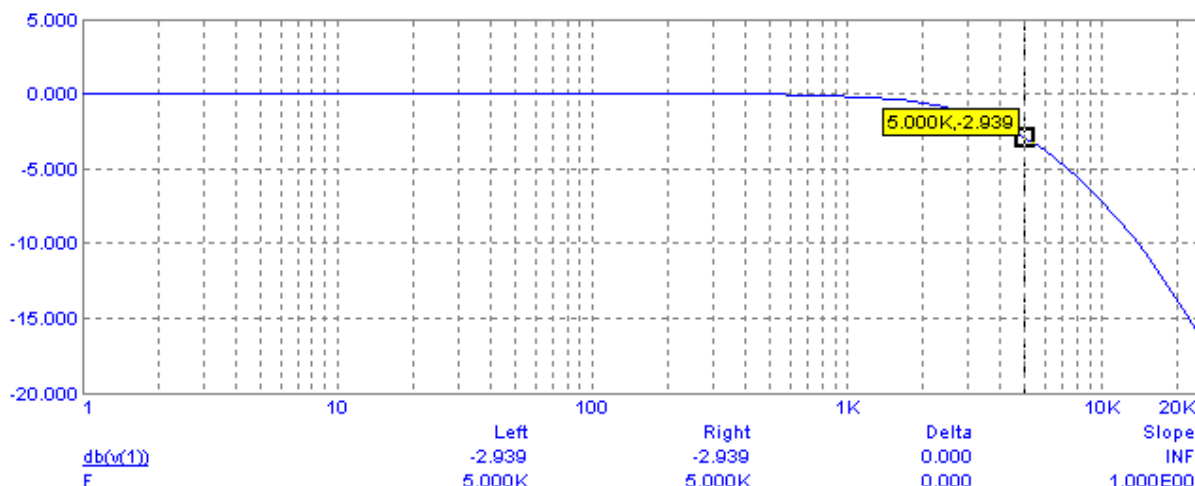
Obr. 2.6 Schéma zapojení při simulaci v programu Micro-Cap

Po vyzkoušení několika možností přepočítání hodnot prvků L a C filtru, a simulaci na PC v programu Micro-Cap, ve kterém bylo simulováno kompletní zapojení filtru včetně kompenzace (Obr. 2.6) a reálného reproduktoru jsem došel k hodnotám

$$L = 0,108 \text{ mH}$$

$$C = 1,69 \text{ }\mu\text{F}$$

Odladěná charakteristika je uvedena na Obr. 2.7, kde je vidět, že při kmitočtu odpovídající 5 kHz je útlum -2,939 dB, což je přijatelná hodnota.



Obr. 2.7 Kmitočtová charakteristika odladěného filtru dolní propust

### 2.1.4 Výběr součástek pro filtr typu dolní propust z katalogu

Nyní zbývá vybrat součástky podle vypočítaných parametrů. Firma Dexon nabízí již navinuté vzduchové cívky přímo určené pro tvorbu filtrů. Vypočítané hodnotě indukce filtru LC se nejlíže dostaneme s cívkou, která má  $L = 0,1$  mH. U kondenzátoru je vypočítané hodnotě nejlíže svitkový kondenzátor, který má kapacitu  $C = 1,5$   $\mu$ F.

V případě kompenzačního RC článku je nejvhodnější kondenzátor s kapacitou  $C_k = 33$   $\mu$ F, též svitkový. Rezistor jsem vybral keramický se zatížitelností 20W a hodnotou odporu odpovídající  $R_k = 3,3$   $\Omega$ .

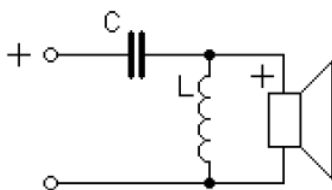
Dosazením zvolených hodnot do programu Micro-Cap, bohužel došlo ke změně mezního kmitočtu, který nebyl přijatelný a musel jsem učinit změnu výběru součástek. Touto změnou se posunul mezní kmitočet na hodnotu 4,4 kHz. Nově zvolené hodnoty součástek jsou:

$$L = 0,15 \text{ mH} \quad C = 3,3 \mu\text{F} \quad C_k = 33 \mu\text{F} \quad R_k = 3,3 \Omega$$

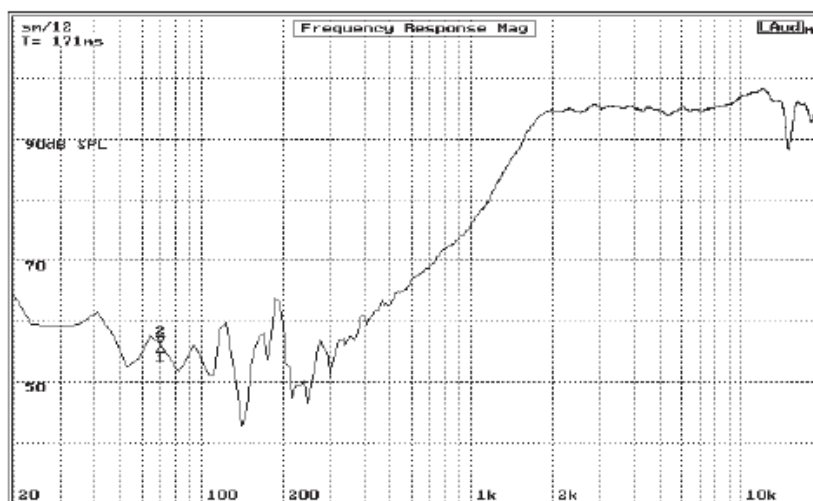
## 2.2 Filtr typu horní propust pro výškový reproduktor

Pro výpočet parametrů filtru horní propust je nutné učinit téměř totožné kroky jako pro filtr typu dolní propust. Tento filtr bude filtrovat signál pro výškový reproduktor. Zde se musí vycházet jak z konstrukčních vlastností samotného výškového reproduktoru (viz Obr. 2.9), tak k hodnotě  $f_{DD}$ , která byla mírně upravena, vzhledem ke konstrukčním možnostem pro předchozí filtr.

Filtr bude opět druhého řádu s útlumem 12 dB/okt. Jeho schéma je znázorněno na Obr. 2.8.



Obr. 2.8 Filtr typu horní propust



Obr. 2.9 Kmitočtová charakteristika výškového reproduktoru

### 2.2.1 Výpočet indukčnosti a kapacity filtru typu horní propust

Hodnoty prvků L a C budou počítány podle stejných vztahů jako u filtru pro spodní pásmo (2.5) a (2.6).

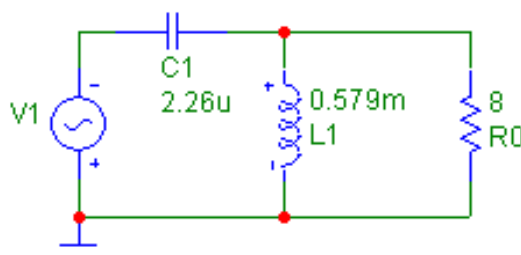
$$L = \frac{Z}{\pi \cdot f_{DD}} = \frac{8}{\pi \cdot 4400} = 0,579 \text{ mH} \quad (2.5)$$

$$C = \frac{1}{4\pi \cdot f_{dd} \cdot Z} = \frac{1}{4\pi \cdot 4400 \cdot 8} = 2,26 \text{ }\mu\text{F} \quad (2.6)$$

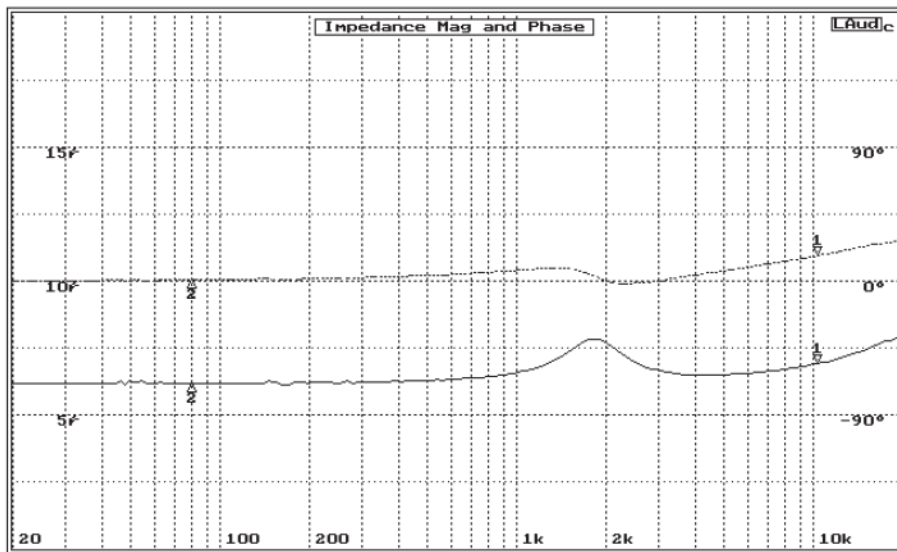
Jelikož tento výškový reproduktor nemá tak výrazný indukční charakter jako tomu bylo u reproduktoru pro spodní pásmo kmitočtů, nebude zde třeba kompenzace, což o jeden krok usnadní výpočty.

### 2.2.2 Simulace zapojení filtru typu horní propust na počítači

I v tomto případě je lepší si vypočítané prvky odsimulovat na počítači v programu Micro-Cap. Pro výškový reproduktor nebude na rozdíl od předchozího případu simulováno zapojení s reálným reproduktorem (Obr. 2.10), protože v katalogovém listu nejsou udány potřebné parametry pro tuto simulaci. V katalogovém listu je však uvedena charakteristika závislosti impedance na kmitočtu (Obr. 2.11) a dle průběhu, který není nějak výrazně zvlněný a ani zvláště strmě neklesá či nestoupá, se zdá, že by toto zjednodušení nemělo mít na výslednou charakteristiku výrazný vliv.

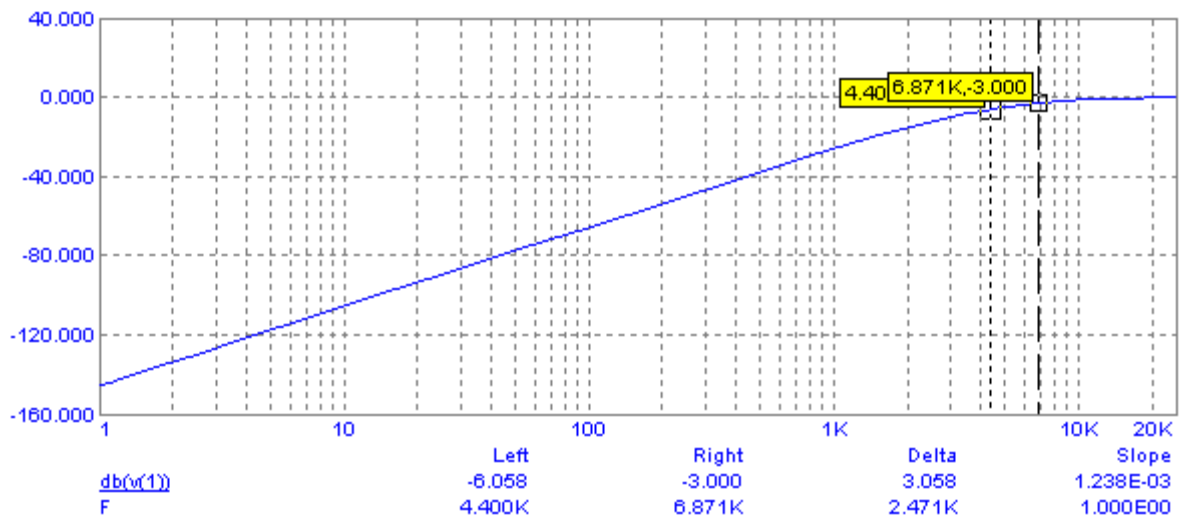


Obr. 2.10 Schéma zapojení HP při simulaci v programu Micro-Cap



Obr. 2.11 Závislost impedance na frekvenci výškového reproduktoru

Ani v tomto případě mi nevyšla požadovaná charakteristika, což je vidět na Obr. 2.11. Útlum na dělicím kmitočtu je opět příliš vysoký a to přes  $-6$  dB, bude tedy potřeba provést korekce prvků filtru tak, aby na dělicím kmitočtu, který je 4400 Hz, byl útlum maximálně  $-3$  dB. Tato hodnota však nyní odpovídá kmitočtu téměř 7 kHz.



Obr. 2.12 Kmitočtová charakteristika filtru horní propust s vypočtenými hodnotami L a C

Po odladění filtru na charakteristiky vyhovující požadavkům se hodnoty L a C rovnají:

$$L = 0,93 \text{ mH,}$$

$$C = 3,62 \text{ }\mu\text{F.}$$

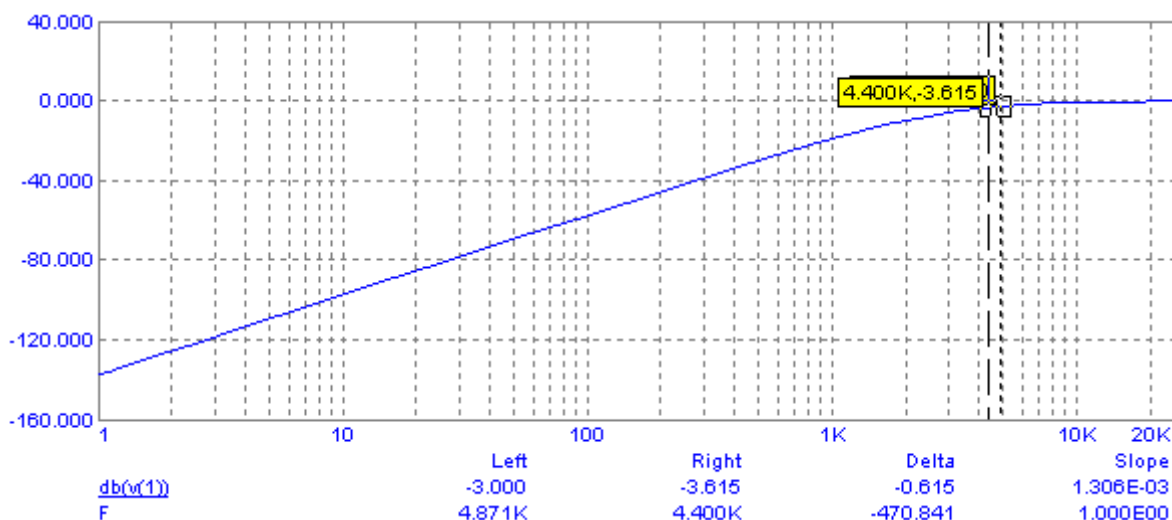
Při těchto hodnotách prvků filtru je útlum při dělicím kmitočtu rovnajícimu se 4400 Hz roven  $-2,98$  dB.

### 2.2.3 Výběr součástek pro filtr typu horní propust z katalogu

Výběr součástek provádím rovněž z nabídky firmy Dexon. Pro indukčnost jsem zvolil vzduchovou cívku s indukčností  $L = 1 \text{ mH}$  a kondenzátor jsem vybral svitkový s hodnotou  $C = 3,3 \text{ }\mu\text{F}$ .

Pro kontrolu opět dosadím hodnoty těchto součástek do simulačního programu, abych zkontroloval, zda nedošlo ke změnám, které by vyžadovaly nějaké úpravy.

Z nasimulovaných charakteristik bohužel vyplývá, že situace není ideální, po přezkoušení jiných hodnot však původně dosazené vyhovují nejlépe. Při kmitočtu 4,4 kHz je útlum -3,615 dB (Obr. 2.13). Tato skutečnost mírně posune  $f_{DD}$ .



Obr. 2.13 Kmitočtová charakteristika filtru HP s katalogovými součástkami

Hodnoty součástek budou tedy:

$$L = 1 \text{ mH}$$

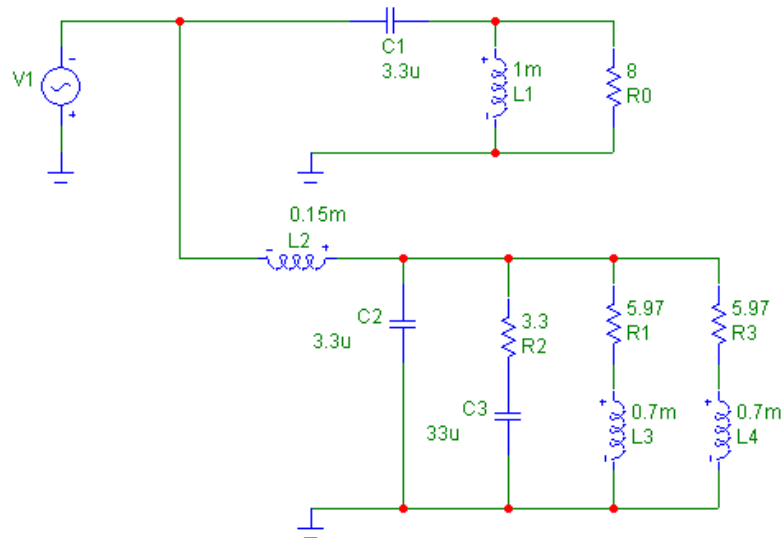
$$C = 3,3 \text{ }\mu\text{F}.$$

### 2.3 Zapojení navržených filtrů do jednoho obvodu a simulace na počítači

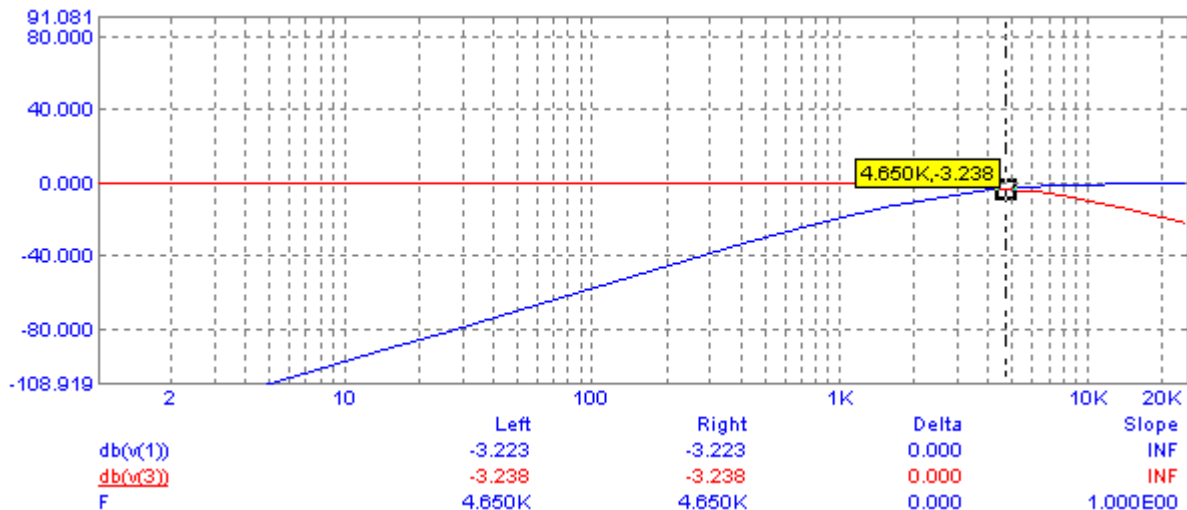
Pro následný návrh plošného spoje je zapotřebí navržené filtry zapojit do jednoho obvodu (Obr. 2.14) tak, aby bylo lépe realizovatelné uspořádání součástek na plošném spoji. Návrhu plošného spoje se budu věnovat později.

Při této příležitosti je vhodné v simulačním programu zkontrolovat chování filtrů zapojených do jednoho obvodu, je-li dělicí kmitočet pro oba filtry stejný. V neposlední řadě je také zapotřebí zkontrolovat fázové charakteristiky, aby nedošlo k vzájemnému otočení fáze reproduktorů, což by mělo zásadní vliv na měření směrových charakteristik, protože by reproduktory kmitaly v opačné fázi a tím se navzájem tlumily.

Z Obr. 2.15, na kterém jsou znázorněny kmitočtové charakteristiky obou filtrů do jednoho grafu, vyplývá skutečnost, že u filtrů, i přes veškeré přizpůsobení katalogovým hodnotám součástek, nedošlo k výraznému zhoršení vlastností. Došlo ke změně  $f_{DD}$  a to na hodnotu 4650 Hz. V této hodnotě mají oba filtry téměř totožný útlum, který je vyšší než -3 dB, ne však nějak zásadně a z hlediska omezení možností katalogových součástek je hodnota -3,238 dB akceptovatelná.

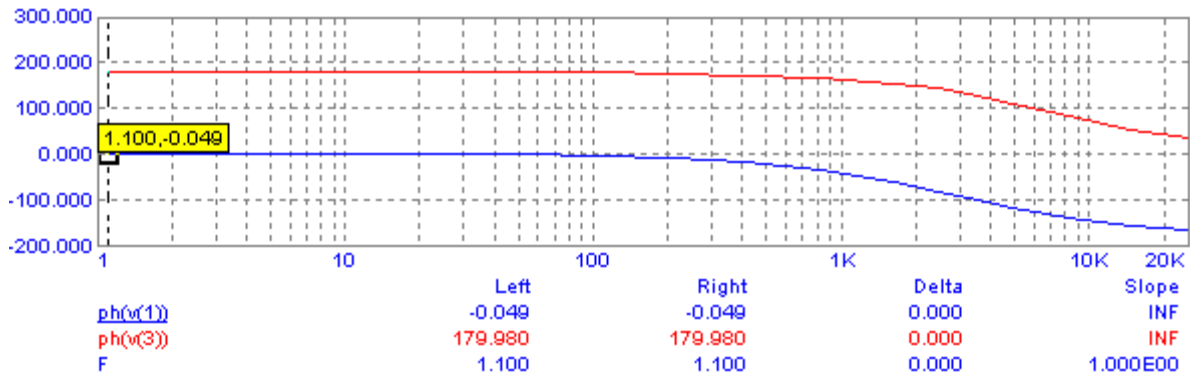


Obr. 2.14 Schéma zapojení filtrů typu dolní a horní propust do jednoho obvodu



Obr. 2.15 Kmitočtové charakteristiky filtrů dolní propust a horní propust zapojené do jednoho obvodu

Na Obr. 2.16 jsou vyobrazeny fázové charakteristiky obou filtrů, ze kterých je patrné, že dochází k posuvu o 180° u obou filtrů, avšak u každého naopak. Toto není nijak na závadu, tuto situaci lze vyřešit přepólováním výškového reproduktoru. Tímto zásahem dostaneme oba reproduktory do stejné fáze.



Obr. 2.16 Fázové charakteristiky filtrů dolní a horní propusti zapojené do jednoho obvodu

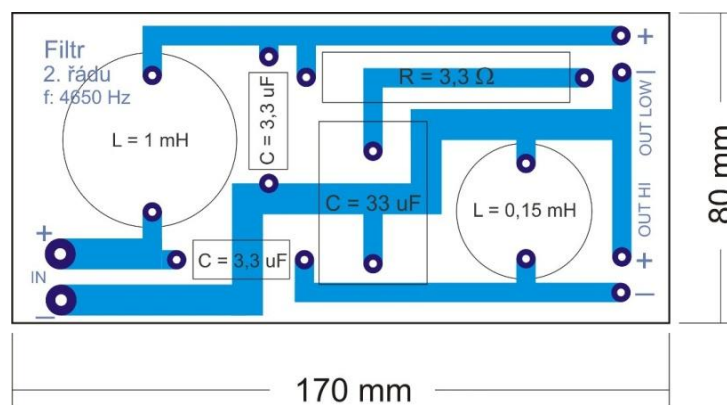
## 2.4 Návrh plošného spoje

Jelikož již znám schéma zapojení a mám vybrané jednotlivé součástky z katalogu, je třeba navrhnout plošný spoj, na který budou tyto součástky umístěny. Pro lepší přehlednost jsou vypsány všechny potřebné parametry v Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Rozměry a parametry použitých součástek pro výrobu filtrů DP a HP.

Filtr	Součástka	Hodnota	Rozměry
DP	$L_L$	0,15 mH	$\varnothing$ 25 mm
	$C_L$	3,3 $\mu$ F	$\varnothing$ 10 x 25 mm
	$C_K$	33 $\mu$ F	45 x 28 mm
	$R_K$	3,3 $\Omega$	13 x 64 mm
HP	$L_H$	1 mH	$\varnothing$ 45 mm
	$C_H$	3,3 $\mu$ F	$\varnothing$ 10 x 25 mm

Ze součástek v Tab. 2.1 jsem navrhl plošný spoj (Obr. 2.17) tak, aby nebyl příliš velkých rozměrů a jeho konstrukce byla co nejjednodušší. Hlavní spoje jsou dostatečně široké, aby byla zajištěna uspokojivá rezerva s ohledem na proudovou hustotu. Na tomto plošném spoji nejsou žádné svorkovnice pro připojení, předpokladem je umístění do krabičky, ze které budou vývody obstarány pomocí konektorů typu RCA cinch.



Obr. 2.17 Plošný spoj pro navržené filtry

### 3 REPRODUKTOROVÁ SKŘÍŇ

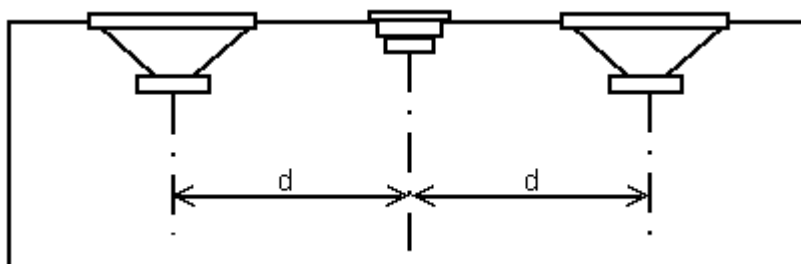
Reproduktorovou skříní lze výrazně ovlivnit zvukové vlastnosti reproduktoru jako celku. V případě zapojení D'Appolito toto platí dvojnásob, protože při špatném umístění reproduktorů by výsledná směrová charakteristika nemusela být symetrická, což je u tohoto zapojení záměrem. Proto je nutné i této kapitole věnovat patřičnou pozornost.

Účelem reproduktorové skříně je co nejvíce utlumit zvukové vyzařování směrem dozadu a konstantně, s ohledem na kmitočty, podpořit vyzařování dopředu. Z těchto titulů se v konstrukci skříně klade důraz na perfektní utěsnění skříně, zabraňuje se vytvoření rezonančních kmitočtů ve skříně, které by mohly nějaké kmitočtové rozsahy zesilovat a některé naopak tlumit. A též výběr konstrukčního materiálu je důležitý. Konstrukční materiál by měl být co nejvíce tuhý, relativně těžký a měl by mít co největší vnitřní tlumení.

#### 3.1 Uspořádání D'Appolito

V roce 1983 dr. Joseph D'Appolito přišel na to, jak uspořádat dvoupásmovou reproduktorovou soustavu tak, aby měla vertikálně symetrickou směrovou charakteristiku s nízkým zvlněním. Výsledkem jeho dlouhodobého zkoumání pomocí výpočtu Linkwitz (viz lit. [1]) bylo použití dvou středobasových reproduktorů symetricky uspořádaných kolem výškového reproduktoru, přičemž rozteč  $d$  musí být násobkem (nejlépe jednonásobkem) vlnové délky odpovídající dělicímu kmitočtu  $f_{DD}$  (Obr. 3.1).

$$d = k \cdot \frac{340}{f_{DD}} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3.2)$$



Obr. 3.1 Uspořádání podle dr. D'Appolita

#### 3.2 Návrh čelní strany reproduktorové skříně

Pro konstrukci čelní strany reproduktorové skříně je nutné uvažovat velikosti vybraných reproduktorů a vypočítanému  $d$ , které nesmí být menší než součet poloměrů výškového a středobasového reproduktoru (3.2). Poloměr vybraného středobasového reproduktoru je 87,5 mm a výškového reproduktoru 47 mm.

$$d > r_L + r_H = 87,5 + 47 = 134,5 \text{ mm} \quad (3.2)$$



Minimální velikost je již stanovená, zbývá už jen tedy určit z rovnice (3.1) samotnou vzdálenost mezi výškovým reproduktorem a středobasovými reproduktory. V tab. 3.1 je znázorněna hodnota  $d$  při  $k = 1, 2, 3, 4, 5$ .

Tab. 3.1 Hodnoty  $d$  při  $k = 1, 2, 3, 4, 5$  a mezním kmitočtu 4650 Hz

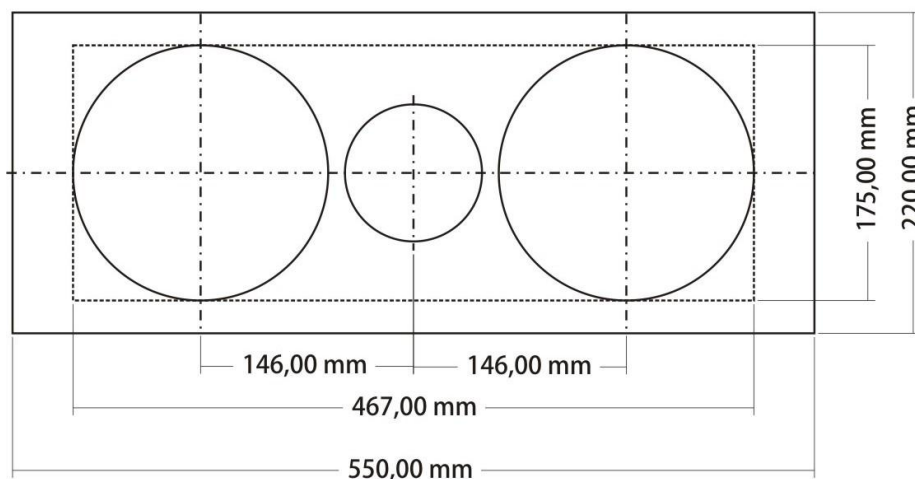
$f_{DD}$ [Hz]	$k$	$d_{MIN}$ [mm]	$d$ [mm]	$d - d_{MIN}$ [mm]
4650	1	134,5	73,12	-61,38
4650	2	134,5	146,24	11,74
4650	3	134,5	219,35	84,85
4650	4	134,5	292,47	157,97
4650	5	134,5	365,59	231,09

Z tabulky vyplývá, že minimální vzdálenost reproduktorů odpovídá  $k = 2$ , kdy je  $d = 146,24$  mm. Rozdíl je však pouhých 11,74 mm, čímž se reproduktory navzájem přiblíží na vzdálenost cca 6 mm.

Tedy je třeba určit geometrické rozměry, jako je výška a šířka čelní strany. Proto je nutné opět určit minimální rozměry těchto parametrů. Určení minimální výšky je celkem jednoduché a je určeno průměrem největšího reproduktoru, což je v tomto případě středobasový reproduktor. Jeho průměr je 175 mm. Minimální výška bude tedy 175 mm. V případě šířky je její určení mírně složitější, je dána součtem průměru krajních reproduktorů a dvou vzdáleností  $d$  (3.3).

$$s = d_L + 2d = 175 + 2 \cdot 146,24 \approx 467 \text{ mm} \quad (3.3)$$

Minimální rozměry jsou tedy 175 x 467 mm, jeví se mi tedy jako nejvhodnější rozměry čelní strany reproduktorové skříně použít velikosti stran 220 x 550 mm (Obr. 3.2). Tyto hodnoty ještě nemusí být definitivní, jelikož při konstrukci zbylých stran je nutno vycházet z objemu, kterému se budu věnovat v další podkapitole. Mohla by nastat situace, že by reproduktorová skříň měla příliš malou hloubku a nemohla by se uskutečnit zástavba reproduktorů či naopak, a hloubka by byla zbytečně příliš velká. Zatím vycházím z vnitřních rozměrů reproduktorové skříně, vnější rozměry budou odlišné a budou záviset na tloušťce použitého materiálu ke stavbě této skříně.



Obr. 3.2 Čelní strana reproduktorové skříně

### 3.3 Návrh zbývajících stran reproduktorové skříně

Pro návrh velikostí zbývajících stran je nutné znát požadovaný objem reproduktorové skříně. Dále je také nutné určit si tvar této reproduktorové skříně. Pro tato daná kritéria je nutné vycházet z určitých zásad.

#### 3.3.1 Objem reproduktorové skříně

U reproduktorů, u kterých dochází k relativně velkým výchylkám membrány (basové a středové reproduktory), je zapotřebí, aby měla reproduktorová skříň určitý objem, který vychází z tzv. ekvivalentního objemu označovaný jako  $V_{AS}$ . Tento objem se počítá ze vztahu (3.4). Většina výrobců ekvivalentní objemy u reproduktorů již udává a není jej tedy třeba vypočítávat.

$$V_{as} = c_{ms} \cdot c_0^2 \cdot \delta \cdot S_d^2 \quad [m^3] \quad (3.4)$$

$c_{ms}$  – mechanická poddajnost (udává výrobce)

$c_0$  – rychlost šíření zvuku

$\delta$  – hustota vzduchu [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$S_d$  – plocha membrány

Výpočet objemu reproduktorové soustavy vychází z parametrů  $V_{as}$  - ekvivalentní objem,  $Q_{tc}$  – činitel jakosti (určíme podle Tab. 3.2),  $Q_{ts}$  – celkový činitel jakosti (udává výrobce). Vztah pro výpočet objemu reproduktorové soustavy je znázorněn níže (3.5).

Tab. 3.2  $Q_{tc}$  pro různé typy aproximací

Název aproximace	Linkwitz - Rillley	Bussel	Butterworth
$Q_{tc}$	0,500	0,570	0,707

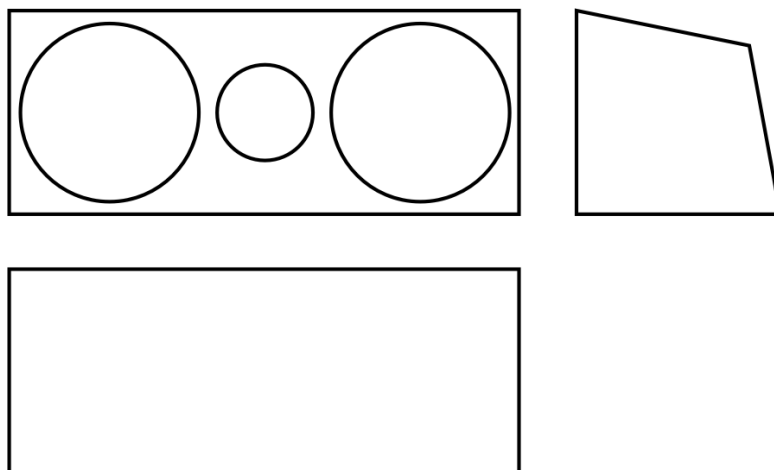
$$V_b = \frac{2 \cdot V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} = \frac{2 \cdot 0,00723}{\left(\frac{0,570}{0,46}\right)^2 - 1} \approx 27 \text{ l} \quad (3.5)$$

Z vypočítaného objemu lze také dopočítat rezonanční kmitočet reproduktorové skříně s osazenými reproduktory (3.6). Tento parametr je spíše orientační a nebude dále potřeba.

$$f_c = f_s \sqrt{\frac{2 \cdot V_{as}}{V_b} + 1} = 80,1 \sqrt{\frac{2 \cdot 7,23}{27} + 1} \approx 99 \text{ Hz} \quad (3.6)$$

#### 3.3.2 Rozměry a tvary ostatních stěn reproduktorové skříně

Z hlediska tvarů je lepší, když reproduktorová skříň nemá žádné rovnoběžné stěny, zabrání se tím vytvoření případných rezonančních kmitočtů, které by mohly mít nežádoucí vliv na kmitočtovou charakteristiku. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl vrchní a zadní část reproduktorové skříně zkosit, jak je znázorněno na Obr. 3.3.



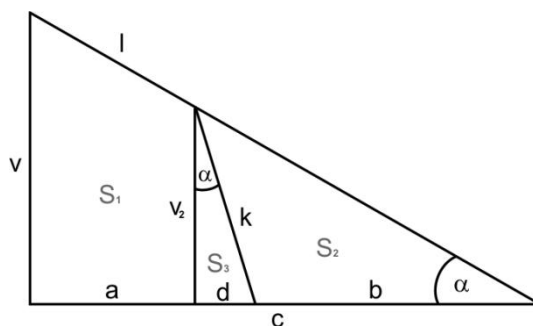
Obr. 3.3 Tvary jednotlivých stěn reproduktorové skříně

Přední strana má již stanoveny své rozměry. Spolu s vypočítaným objemem reproduktorové skříně je pro výpočet zbylých stěn vše potřebné připraveno.

Z délky reproduktorové skříně (550 mm), jsem schopen spočítat plochu boční strany, jak je uvedeno v rovnici 3.7. Zbývá si tedy pouze určit, jak velké bude zkosení vrchní a zadní strany reproduktorové skříně. Z hlediska prostoru a vzhledu jsem se rozhodl, že zkosení bude činit  $15^\circ$

$$S_b = \frac{V_b}{d_r} = \frac{27}{5,5} = 4,9 \text{ dm}^2 \quad (3.7)$$

Podle Obr. 3.4 jsem dopočítal ostatní rozměry, jak je znázorněno v rovnicích (3.8) až (3.17).



Obr. 3.4 Obrázek pro výpočet rozměrů bočnice

$$c = v \cdot \text{tg}(90 - \alpha) = 2 \cdot \text{tg}(75) = 8,211 \text{ dm} \quad (3.8)$$

$$S_1 = v \cdot c \cdot 0,5 = 2 \cdot 7,464 \cdot 0,5 = 9,032 \text{ dm}^2 \quad (3.9)$$

$$v_2 = \frac{c-a}{\text{tg}(90-\alpha)} = \frac{7,464-1,275}{\text{tg}(75)} = 1,544 \text{ dm} \quad (3.10)$$

$$S_2 = (c - a) \cdot v_2 \cdot 0,5 = (8,211 - 2,450) \cdot 1,544 \cdot 0,5 = 4,447 \text{ dm}^2 \quad (3.11)$$

$$d = v_2 \cdot \text{tg}(\alpha) = 1,658 \cdot \text{tg}(15) = 0,414 \text{ dm} \quad (3.12)$$

$$S_3 = v_2 \cdot d \cdot 0,5 = 1,658 \cdot 0,444 \cdot 0,5 = 0,319 \text{ dm}^2 \quad (3.13)$$

$$S_b = S_1 - S_2 + S_3 = 9,032 - 4,447 + 0,319 = 4,9 \text{ dm}^2 \quad (3.14)$$

$$l = \frac{a}{\sin(90-\alpha)} = \frac{2,450}{\sin(75)} \approx 25,4 \text{ cm} \quad (3.15)$$

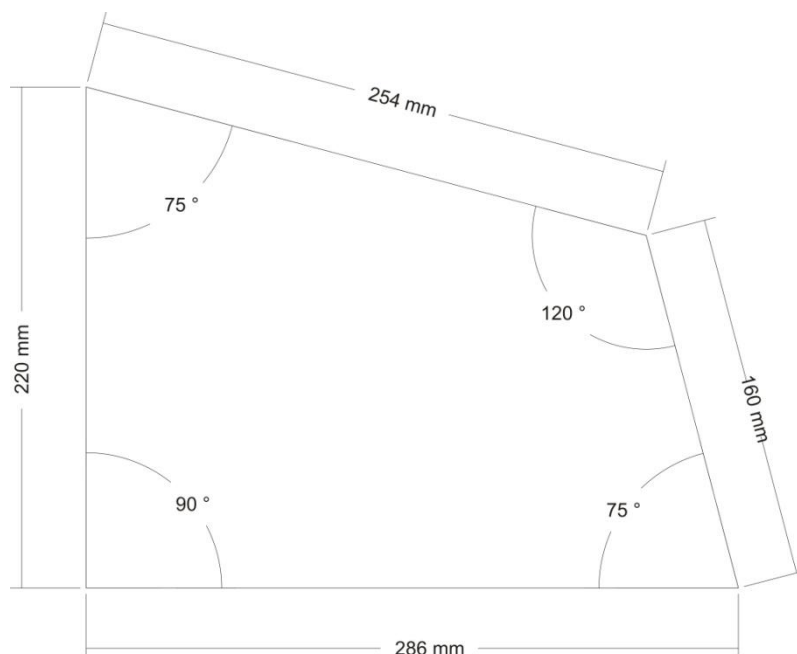
$$k = \frac{d}{\sin(\alpha)} = \frac{0,414}{\sin(15)} \approx 16,0 \text{ cm} \quad (3.16)$$

$$h = a + d = 2,450 + 0,414 \approx 28,6 \text{ cm} \quad (3.17)$$

Tyto rovnice jsem si naprogramoval v programu Microsoft Office Excel a dosazováním hodnoty za proměnou „a“ metodou půlení intervalů jsem vyladil konečný obsah bočnice na potřebných 4,9 dm<sup>2</sup>. Rozměry bočnice jsou graficky znázorněny na Obr. 3.5.

Jak už jsem výše uvedl, výpočet reproduktorové skříně se zatím týkal pouze vnitřních rozměrů. Nyní je tedy na řadě zvolit vhodný materiál pro konstrukci a navrhnout reproduktorovou skřín jako celek.

Jako nejvhodnější materiál se mi jeví dřevovláknitá deska (dřevotříska). Nejedná se o drahý materiál a jeho mechanické vlastnosti (tuhost, pevnost, váha a vnitřní tlumení) jsou pro toto použití zcela dostačující. Úprava dřevovláknité desky nevyžaduje žádné speciální nástroje a je tedy i po stránce opracování tento materiál přijatelný. Jeho výhodou je také možnost zakoupení laminátové desky, která má i pěkný výsledný vzhled. Šířky dřevovláknitých desek se vyrábí v těchto hodnotách, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 16 mm, 18 mm, 19 mm, 20 mm, 22 mm,... Pro konstrukci jsem si zvolil dřevovláknitou desku s laminátovou úpravou o šířce 18 mm. Tato šířka je vzhledem k rozměrům reproduktorové soustavy kompromisem, mezi dostatečnou tuhostí, pevností a váhou.



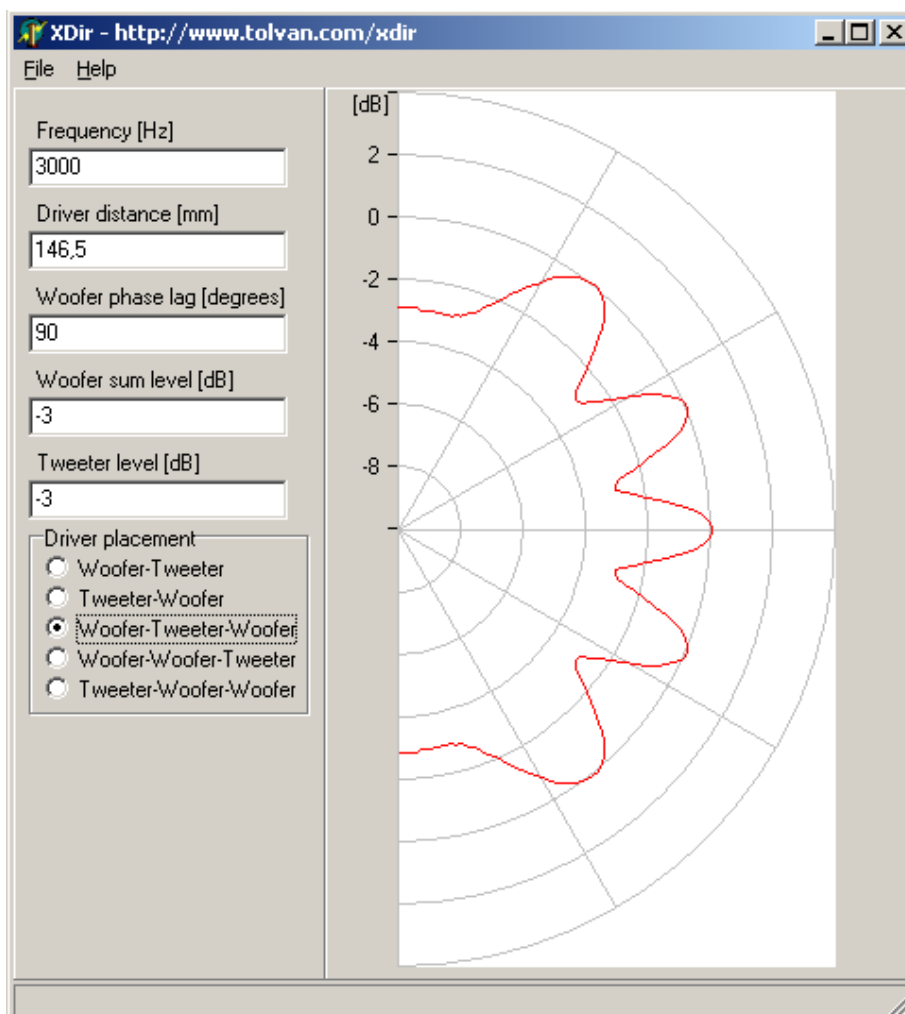
Obr. 3.5 Rozměry bočnice

V tuto chvíli jsem schopen dopočítat i vnější rozměry reproduktorové skříně a zabývat se konstrukčními postupy jako je lepení, klínování a ostatní procedury kompletace. V příloze č.3 je znázorněn průřez reproduktorovou skříní a v příloze č.4 je vidět podoba čelní strany reproduktorové skříně.

Spoje budou lepené a vyztužené pérky, aby byla zvýšena pevnost spoje. Pro zlepšení akustických vlastností reproduktorové skříně budou vnitřní stěny potaženy tlumícím roumem, aby v prostoru reproduktorové skříně bylo co nejvíce zabráněno odrazu zvuku a tím se předcházelo stojatému vlnění. Poslední věc, o které jsem se do této chvíle nezmínil, jsou zdířky pro připojení vstupních signálů. Zdířky budou typu CINCH a budou umístěny na zadní straně reproduktorové skříně. Zdířky budou celkem dvě, jedna bude pro přívod signálu pro výškový reproduktor a druhá bude pro přívod signálu ke středobasovým reproduktorům.

### 3.4 Simulace směrové charakteristiky na PC

V této fázi jsou známy veškeré potřebné údaje k provedení počítačové simulace směrových charakteristik tohoto reproduktoru jako celku. K simulaci jsem použil volně dostupný program *xdir* (viz. lit. [3]). Simulace byla prováděna pro kmitočet 3 kHz. Výsledek simulace včetně vstupních parametrů je vidět na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Simulovaná směrová charakteristika

## 4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ SESTAVENÉ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Měření reproduktorové soustavy se provádělo v bezodrazové komoře, a to z důvodu minimalizace odrazů zvuku a tím i negativního ovlivnění měřených charakteristik. Měřily se dvě charakteristiky, první byla charakteristika směrová a druhou charakteristikou byla kmitočtová.

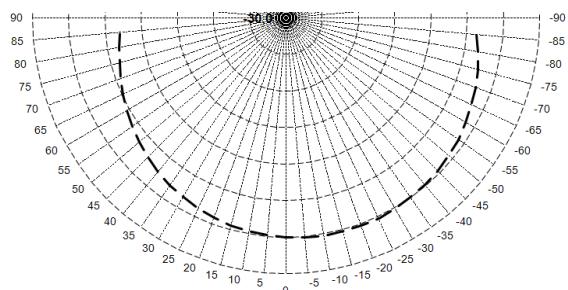
### 4.1 Směrová charakteristika

Úkolem tohoto měření bylo zjistit, zda-li je směrová charakteristika symetrická, což je u reproduktorové soustavy typu D'Appolito charakteristické a žádoucí.

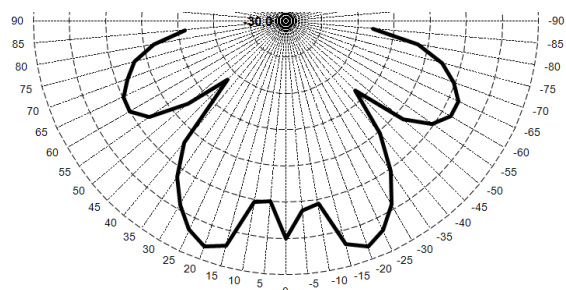
Měření probíhalo dle následujícího postupu:

1. Reproduktorová soustava se umístila na točnu, která se dala ovládat z připojeného PC umístěného vně komory.
2. Před reproduktorovou soustavu se umístil na její osu mikrofon do stejné výšky, jako byl střed soustavy, ve vzdálenosti 1m od ní. Tento mikrofon byl vyveden k PC, kde byl připojen k měřiči L [dB<sub>SPL</sub>].
3. Soustava se připojila na generátor sinusového průběhu, na kterém šel měnit výstupní kmitočet. Zvukovou zkouškou se ověřila funkčnost připojení.
4. Bezodrazová komora se uzavřela a zbytek měření probíhal vzdáleně od PC, kde byly všechny potřebné ovládací a měřicí prvky.
5. Na generátoru se nastavil první měřený kmitočet 100 Hz.
6. Měření se provádělo pro rozsah úhlů  $-85^\circ$  až  $+85^\circ$  od osy soustavy. Tyto úhly se postupně zadávaly do softwaru, který byl nahraný v PC ovládací točnu a to v krocích o velikosti  $5^\circ$ . Pro každý tento krok se zaznamenala hodnota L [dB<sub>SPL</sub>].
7. Bod 5 se opakuje pro kmitočty 3 kHz, 4,65 kHz ( $f_{DD}$ ) a 10 kHz.
8. Z naměřených hodnot zapsaných do předem připraveného souboru v programu Excel byly vygenerovány grafy směrových charakteristik.

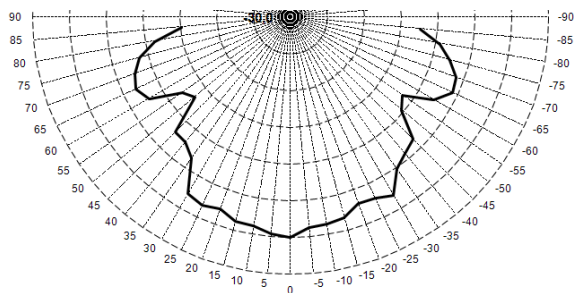
Výsledné grafy jsou znázorněny na Obr. 4.1 a konkrétní naměřené hodnoty pro jednotlivé frekvence v Tab. 4.1. Na grafech je lehce pozorovatelné, jak jsou symetrické vzhledem k ose soustavy. Mírné odchylky mohou být způsobeny ne zcela přesným umístěním mikrofonu vzhledem k ose soustavy. Vzájemné porovnání jednotlivých charakteristik včetně kompletní legendy viz příloha č. 5.



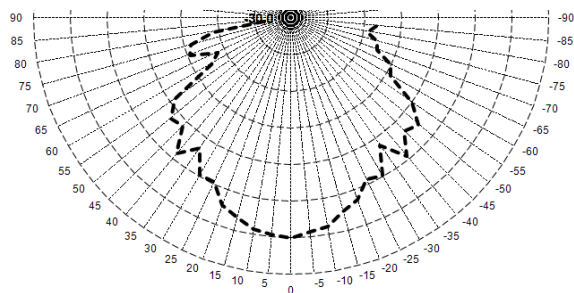
a)



b)



c)



d)

Obr. 4.1 Směrové charakteristiky a) 100 Hz, b) 3 kHz, c) 4,65 kHz ( $f_{DD}$ ), d) 10 kHz

Tab. 4.1 Naměřené hodnoty pro směrovou charakteristiku

relativní úhel vůči akustické ose	$L$ [dB <sub>SPL</sub> ]			
	100 Hz	3 kHz	4650 Hz	10 kHz
s [°]				
-85	81,0	61,8	73,7	72,3
-80	81,5	68,2	76,6	71,3
-75	82,0	72,0	78,4	72,8
-70	82,4	74,4	79,9	73,2
-65	82,8	76,0	80,2	75,6
-60	83,2	76,0	78,4	76,3
-55	83,6	74,4	74,5	80,8
-50	83,9	70,8	75,7	83,3
-45	84,2	63,2	79,5	82,4
-40	84,4	69,9	80,1	85,2
-35	84,5	75,0	81,2	81,8
-30	84,7	78,9	84,0	85,5
-25	84,8	81,5	83,2	84,9
-20	84,8	82,8	83,0	87,0
-15	84,8	81,6	84,3	88,0
-10	84,8	75,3	84,6	89,5
-5	84,7	75,9	84,8	89,9
0	84,6	79,7	86,0	90,7
5	84,4	74,7	85,6	90,3
10	84,2	75,1	84,8	89,9
15	84,0	81,8	84,8	88,8
20	83,7	82,8	83,8	87,8
25	83,3	81,4	84,2	85,3
30	82,9	79,0	83,7	85,3
35	82,5	76,0	79,4	82,3
40	82,1	71,6	78,1	84,8
45	81,5	61,1	78,1	81,4
50	81,0	67,4	72,9	81,9
55	80,5	72,8	73,8	79,9
60	80,0	74,6	78,1	73,1
65	79,4	74,5	79,1	71,7
70	78,9	73,1	78,4	75,3
75	78,4	71,4	77,1	74,7
80	78,0	68,3	74,7	71,4
85	77,6	63,7	70,8	64,0

## 4.2 Kmitočtová charakteristika

Tímto měřením se ověří zda-li reproduktorová soustava má konstantní průběh reprodukce v závislosti na reprodukovaném kmitočtovém spektru a zda-li nedochází v nějakém místě spektra k útlumu či naopak k zesílení.

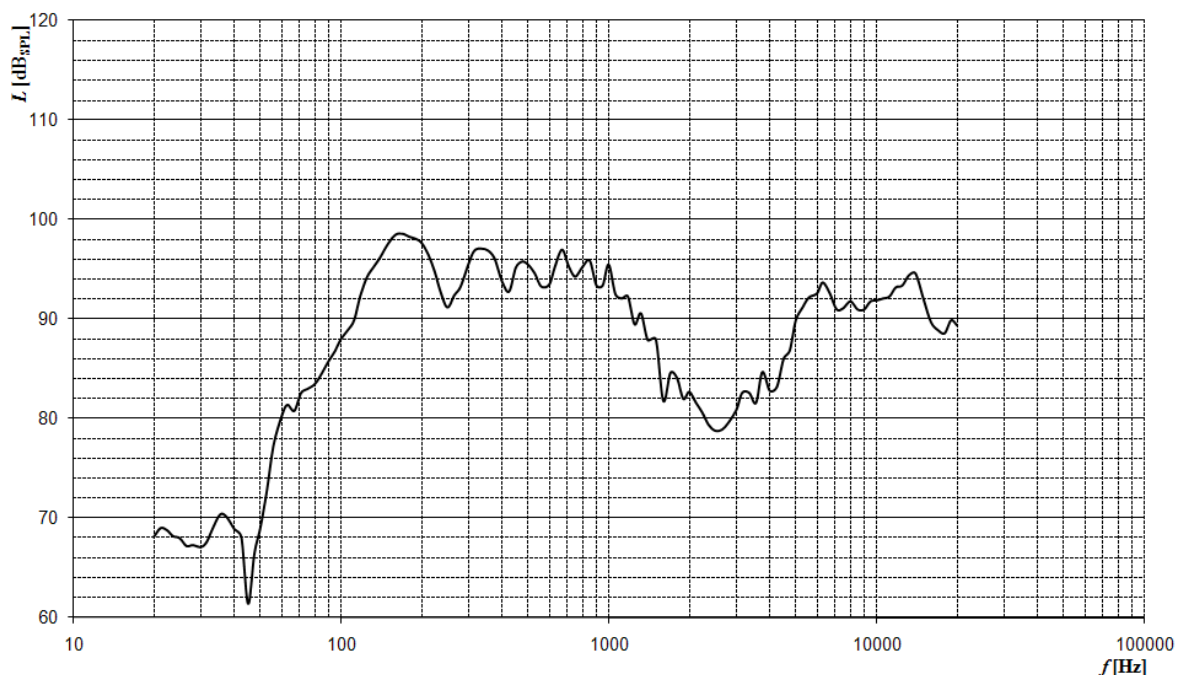
Postup měření kmitočtové charakteristiky:

- 1) Zopakujeme body 1) až 4), které jsme vykonali při měření směrových charakteristik.
- 2) Mikrofon je umístěn na ose soustavy ( $0^\circ$ ).
- 3) Na generátoru se mění kmitočty dle Tab 4.2 a zapisují se hodnoty  $L$  [ $\text{dB}_{\text{SPL}}$ ].
- 4) Z naměřených hodnot se sestaví graf závislosti  $L$  [ $\text{dB}_{\text{SPL}}$ ] na  $f$  [Hz].

Tab. 4.2 Naměřené hodnoty pro kmitočtovou charakteristiku

$f$ [Hz]	$L$ [ $\text{dB}_{\text{SPL}}$ ]	$f$ [Hz]	$L$ [ $\text{dB}_{\text{SPL}}$ ]	$f$ [Hz]	$L$ [ $\text{dB}_{\text{SPL}}$ ]
20,0	68,1	212	96,5	2240	80,6
21,2	69,0	224	94,8	2360	79,4
22,4	68,8	236	92,7	2500	78,8
23,6	68,2	250	91,2	2650	78,9
25,0	68,0	265	92,4	2800	79,6
26,5	67,2	280	93,3	3000	80,9
28,0	67,3	300	95,6	3150	82,6
30,0	67,1	315	96,9	3350	82,6
31,5	67,6	335	97,1	3550	81,6
33,5	69,2	355	96,9	3750	84,7
35,5	70,4	375	96,1	4000	82,8
37,5	70,1	400	93,8	4250	83,2
40,0	68,9	425	92,8	4500	86,0
42,5	68,1	450	95,2	4750	86,9
45,0	61,4	475	95,8	5000	89,9
47,5	66,4	500	95,5	5300	91,2
50,0	69,0	530	94,6	5600	92,2
53,0	72,9	560	93,3	6000	92,6
56,0	77,3	600	93,5	6300	93,7
60,0	80,2	630	95,3	6700	92,6
63,0	81,4	670	97,0	7100	91,0
67,0	80,8	710	95,3	7500	91,1
71,0	82,6	750	94,3	8000	91,8
75,0	83,0	800	95,3	8500	91,0
80,0	83,5	850	95,9	9000	91,0
85,0	84,6	900	93,4	9500	91,8
90,0	85,8	950	93,4	10000	91,9
95,0	86,8	1000	95,5	10600	92,1
100	88,0	1060	92,5	11200	92,3
106	88,9	1120	92,1	11800	93,2
112	89,9	1180	92,3	12500	93,4
118	92,3	1250	89,5	13200	94,4
125	94,2	1320	90,6	14000	94,6
132	95,2	1400	87,9	15000	92,0
140	96,2	1500	88,0	16000	89,7
150	97,6	1600	81,8	17000	88,9
160	98,5	1700	84,6	18000	88,6
170	98,6	1800	84,1	19000	89,9
180	98,3	1900	82,0	20000	89,4
190	98,1	2000	82,7		
200	97,7	2120	81,6		





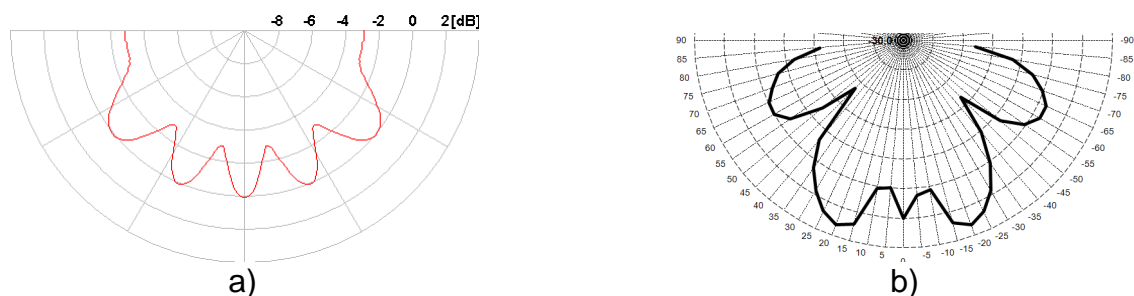
Obr. 4.2 Graf kmitočtové charakteristiky

Z grafu bohužel vyplývá, že průběh není zcela ideální. Na kmitočtech od 1 kHz do 6 kHz dochází k příliš velkému útlumu cca 15 dB. Tento jev je s největší pravděpodobností zapříčiněn chybně fungující kmitočtovou výhybkou, která má příliš nízko umístěn  $f_{DD}$  pro spodní pásmo a naopak pro horní pásmo kmitočtů je  $f_{DD}$  posunut směrem nahoru.

### 4.3 Porovnání reálných parametrů se simulovanými

Při samotném návrhu byla simulována směrová charakteristika reproduktorové soustavy dle vypočítané a navrhnuté specifikace. Pro porovnání je na Obr. 4.3 znázorněna charakteristika simulovaná a změřená v bezodrazové komoře. Zde uvedená charakteristika je pro 3 kHz ostatní porovnání viz příloha č.6.

Na Obr. 4.3 je vidět, že obě charakteristiky mají stejný počet laloků a prostřední lalok má na ose své maximum. Laloky ležící vedle osy svírají přibližně stejný úhel k ose soustavy, kdežto vnější laloky mají úhly již rozdílné. Tvary jednotlivých laloků se liší. Tato situace může být zapříčiněna již výše zmíněnou nesprávnou funkcí kmitočtové výhybky a musí být brána v potaz skutečnost, že je na Obr 4.3 a) zobrazen ideální případ bez ohledu na parametry reproduktorů atd.



Obr. 4.3 Porovnání a) simulované a b) odměřené směrové charakteristiky

Simulaci kmitočtové charakteristiky jsem nemohl uskutečnit, protože se mi nikde nepodařilo získat bezlicenční simulační program, který by uměl simulovat tento druh zapojení a konstrukce reproduktorové soustavy. Porovnání by v tomto případě nebylo objektivní, protože soustava jako celek nereprodukuje správně a v kmitočtové oblasti 1 kHz až 6 kHz dochází k útlumu, což je zapříčiněno chybou v kmitočtové výhybce. V případě, že by kmitočtová výhybka pracovala správně, byla by kmitočtová charakteristika zcela vypovídající o kvalitě konstrukce a použitých reproduktorů, a dala by se porovnávat se simulovanou charakteristikou, kde by byl ideální průběh této charakteristiky.

## 5 ZÁVĚR

Jelikož se jedná o sestavu pro laboratorní měření, nevěnoval jsem příliš velké úsilí vzhledu reproduktoru jako celku, ale spíše jsem se soustředil na její funkčnost. Pokud by byl reproduktor navrhován jako jistá část soustavy reproduktorů pro poslech hudby nebo jako součást domácího kina, bylo by jistě co vylepšovat. Například by bylo vhodnější pro připojení reproduktoru využít misky s vestavěnými kontakty a zapustit je do zadní strany reproduktorové skříně. Dále by bylo zapotřebí olamínovat hrany soustavy, případně zvolit náročnější, ale vzhledově přijatelnější druh spojů a konstrukce. V oblasti elektroinstalace by bylo vhodnější umístit kmitočtovou výhybku do vnitřní části reproduktorové skříně, čímž by se stala kompaktnější.

Protože kmitočtová výhybka nemá  $f_{DD}$  pro obě pásma na správném místě a tím dochází k velkému útlumu cca 15 dB v pásmu kmitočtů 1 kHz až 6 kHz. Tento jev nemůže být způsoben tolerancí hodnot použitých součástek, v tomto případě by byl útlum menší. Tato skutečnost je pozorovatelná na kmitočtové charakteristice soustavy. Bylo by zapotřebí, výhybku pod zátěží změřit a zjistit přesněji odchylky od uvažované  $f_{DD}$  pro obě pásma samostatně a podle zjištěných odchylek zvolit nejsnazší a nejekonomičtější úpravu. Bohužel se domnívám, že v tomto případě půjde o výměnu obou indukčností i kondenzátorů. Jelikož v tomto případě nepůjde udělat kompromis a přizpůsobit jedno pásmo druhému, protože soustava je navržena na dělicí kmitočet 4650 Hz a v zapojení D'Appolito je to výchozí parametr. Kompenzace by v tomto případě měla být v pořádku a nemělo by být potřeba jí jakkoli upravovat.

## SEZNAM LITERATURY

- [1] TOMAN, K. *Reproduktory a reprosoustavy*, 1.díl. 1. vydání, dotisk. Karviná: DEXON, 2003. 212 s
- [2] DEXON. *Reproduktory, reprosoustavy a ozvučovací audio technika* [online]. < [http://eshop.dexon.cz/hifi\\_domaci\\_kino.htm](http://eshop.dexon.cz/hifi_domaci_kino.htm) >
- [3] AUDIOWEB.CZ. *DIY projekty, reproduktory, reprosoustavy, subwoofery, zesilovače, reprobedny, Tesla/TVM* [online]. 2003. Poslední revize 2008 [cit. 11.1.2008]. <<http://audioweb.cz/index.htm> >
- [4] VRBA, K., Lattenberg, I. a Matějčíček, L. *Analogová technika*. VUT Brno, 2002, 107 s.

## PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

C	Kapacita
$c_0$	Rychlost šíření zvuku
$C_k$	Kondenzátor kompenzačního článku
$C_L$	Kondenzátor pro spodní pásmo kmitočtů
$c_{mn}$	Mechanická poddajnost
DP	Dolní propust
f	Kmitočet
$f_c$	Rezonanční kmitočet reproduktorové skříně
$f_{DD}$	Dělicí kmitočet pro kmitočtovou výhybku
$f_{MAX}$	Horní mezní kmitočet
$f_{MIN}$	Spodní mezní kmitočet
HP	Horní propust
$C_H$	Kondenzátor pro horní pásmo kmitočtů
L [dB <sub>SPL</sub> ]	Úroveň akustického tlaku
L	Indukčnost
$L_H$	Indukčnost pro horní pásmo kmitočtů
$L_L$	Indukčnost pro spodní pásmo kmitočtů
PC	Osobní počítač (Personal Computer)
$Q_{tc}$	Činitel jakosti dle použité aproximace
R	Rezistivita
$R_k$	Rezistor kompenzačního článku
RMS	Efektivní hodnota výkonu (Root Mean Square)
$S_b$	Obsah bočnice
$S_d$	Plocha membrány
š	Minimální šířka reproduktorové skříně
$V_{AS}$	Ekvivalentní objem
$V_b$	Objem reproduktorové skříně
$\delta$	Hustota vzduchu

## SEZNAM PŘÍLOH

- 1) Katalogový list středobasového reproduktoru
- 2) Katalogový list výškového reproduktoru
- 3) Průřez reproduktorovou skříní
- 4) Čelní strana reproduktorové skříně
- 5) Směrové charakteristiky
- 6) Porovnání směrových charakteristik
- 7) Fotografie soustavy

# BRB 6"/50/01,8



Reproduktor je založen na koši z hliníkového odlitku a CCAW kmitací cívky. Je velmi vhodný především pro menší satelitní boxy ale taktéž jako středotónový reproduktor.



## SPECIFIKACE:

Nominální průměr:	160 mm
Nominální impedance:	8 Ω
Nominální výkon (dlouhodobý):	50 W rms
Maximální výkon:	100 W max.
Citlivost:	91 dB / 1W, 1m
Frekvenční rozsah:	80 - 6 000 Hz

## THIELE-SMALL PARAMETRY:

Stejnoseměrný odpor, Re:	5,97 Ω
Indukčnost cívky, Le:	0,7 mH
Rezonanční frekvence, fs:	80,1 Hz
Mechanický činitel jakosti, Qms:	2,77
Elektrický činitel jakosti, Qes:	0,55
Celkový činitel jakosti, Qts:	0,46
Mechanický odpor, Rms:	2,66 Ns/m
Hmotnost kmitacího systému, Mmd:	14,77 g
Hm. k.s. a sloupce vzduchu, Mms:	15,74 g
Mechanická poddajnost, Cms:	0,251 mm/N
Akustická poddajnost, Cas:	5,2 E-8 m <sup>3</sup> /N
Ekvivalentní objem, Vas:	7,23 l
Plocha membrány, Sd:	143 cm <sup>2</sup>
Gyrační konstanta, Bl:	9,26 N/A
Účinnost, η <sub>0</sub> :	0,65 %
Maximální lin. výchylka, Xmax:	± 1,6 mm

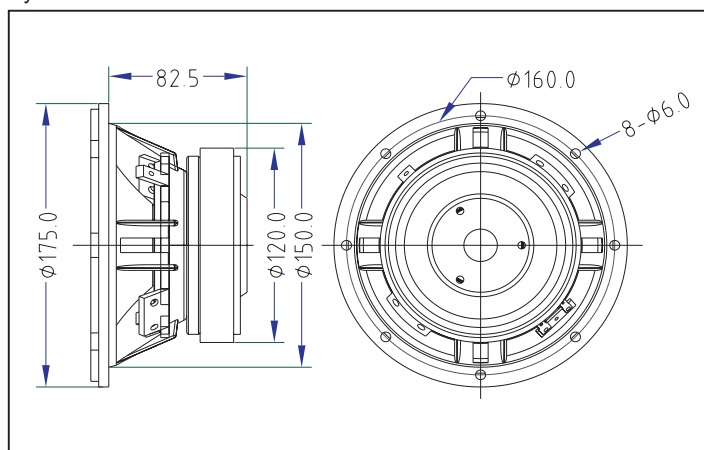
## MATERIÁLY:

Koš:	Al slitina
Membrána:	papír
Závěs:	textil
Drát kmit. cívky:	Cul
Former kmit. cívky:	kapton
Magnet:	ferit

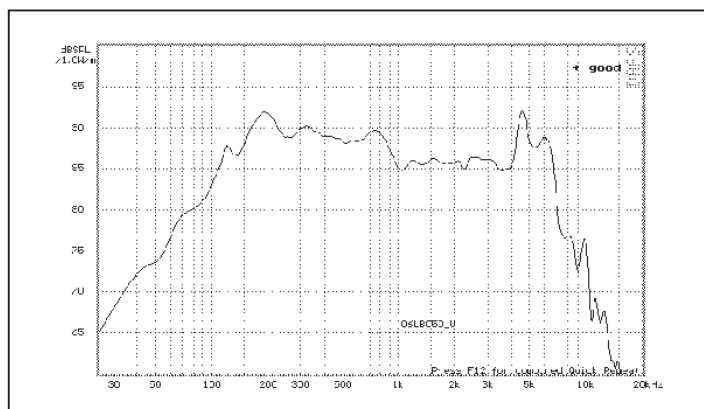
DEXON Slovakia: Sunny-S s.r.o., Framborská 41, 010 01 Žilina  
Tel./Fax: +421 41 564 09 94, E-mail: sunnys.dexon@stonline.sk

DEXON Poland: Klonowa 2, 62-300 Bierzglinek k/Wrzesni  
Tel./Fax: +48 614 38 91 67, E-mail: speakers@dexon.pl

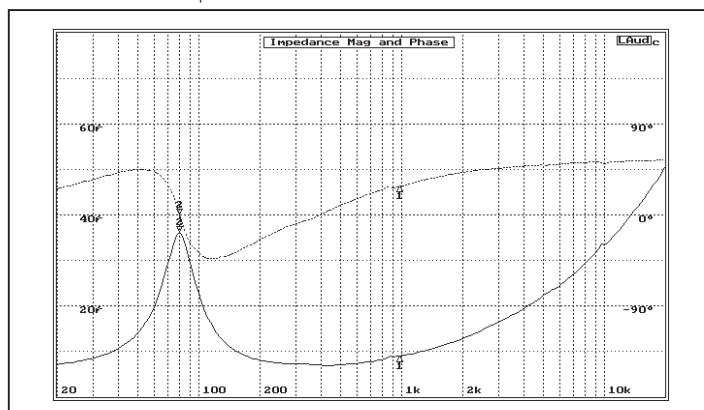
## Výkres



## Charakteristika SPL / f



## Charakteristika Z + φ / f



# DEXON

# HRT 8/50/01,8



Reproduktor je založen na magnetu z feritu, který spolupracuje s kmitací cívkou s kalotou s mylaru. Je vhodný zejména pro kvalitní HiFi konstrukce.

**SPECIFIKACE:**

Nominální impedance:	8 $\Omega$
Nominální výkon (dlouhodobý, HP 12 dB/oct):	50 W rms
Citlivost:	94 dB / 1W, 1m
Frekvenční rozsah:	1,5 - 20 kHz

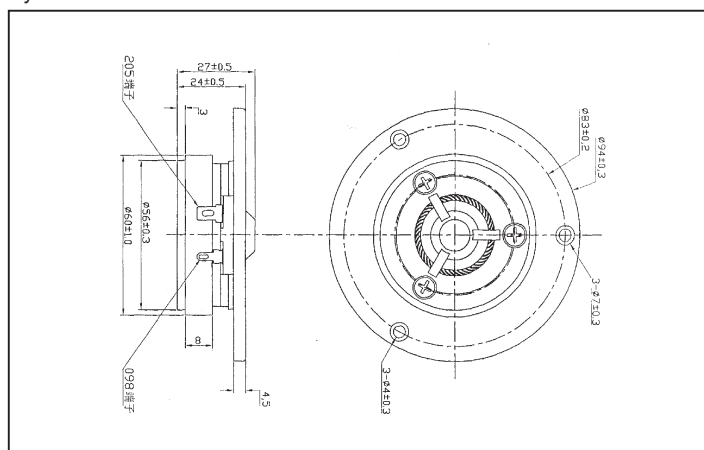
**PARAMETRY:**

Stejnoseměrný odpor, Re:	6,2 $\Omega$
Minimální impedance Zmin:	6,1 $\Omega$
Rezonanční frekvence, fs:	1 800 Hz
Doporuč. dělicí frekvence, fcut:	> 3 500 Hz
Průměr kmitací cívky	20 mm

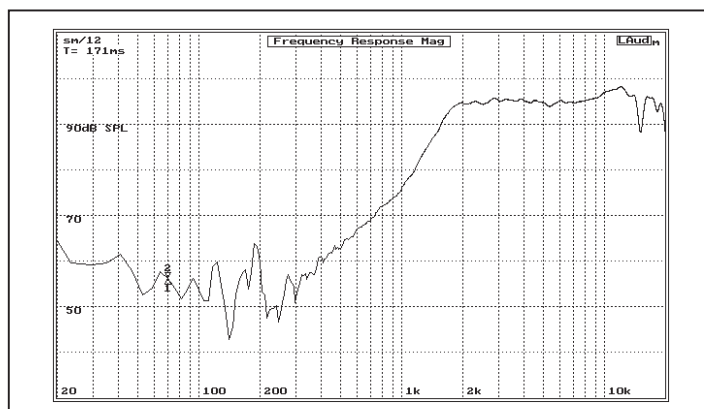
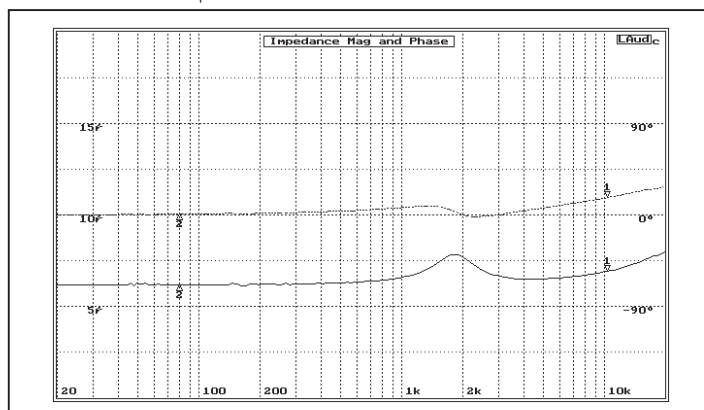
**MATERIÁLY:**

Spodní kryt:	-
Membrána:	mylar
Drát kmit. cívky:	Cu
Former kmit. cívky:	Al
Magnet:	ferit

Výkres



Charakteristika SPL / f

Charakteristika Z +  $\phi$  / f

DEXON Slovakia: Sunny-S s.r.o., Framborská 41, 010 01 Žilina  
Tel./Fax: +421 41 564 09 94, E-mail: sunnys.dexon@stonline.sk

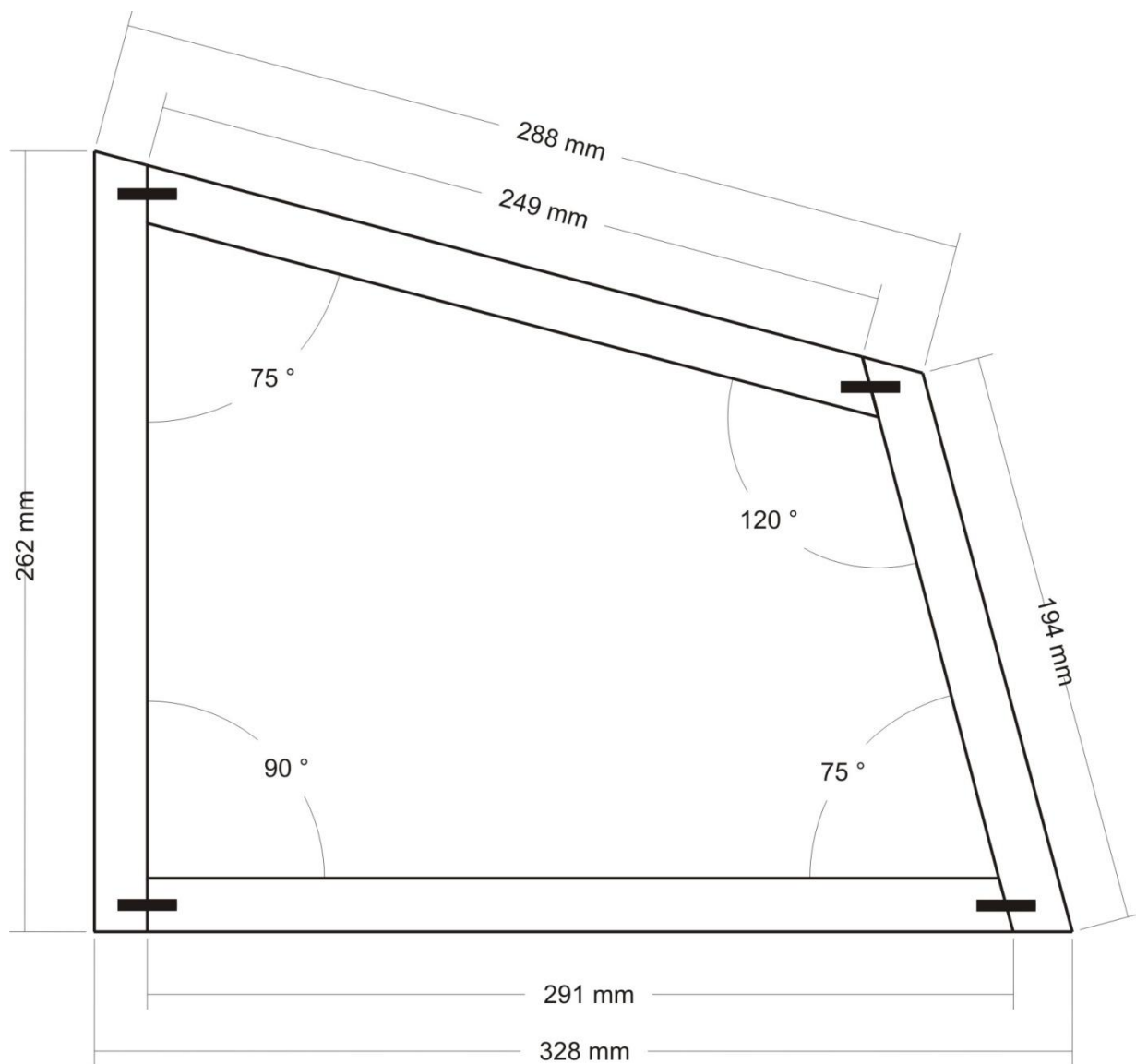
DEXON Poland: Klonowa 2, 62-300 Bierzglinek k/Wrzesni  
Tel./Fax: +48 614 38 91 67, E-mail: speakers@dexon.pl

# DEXON



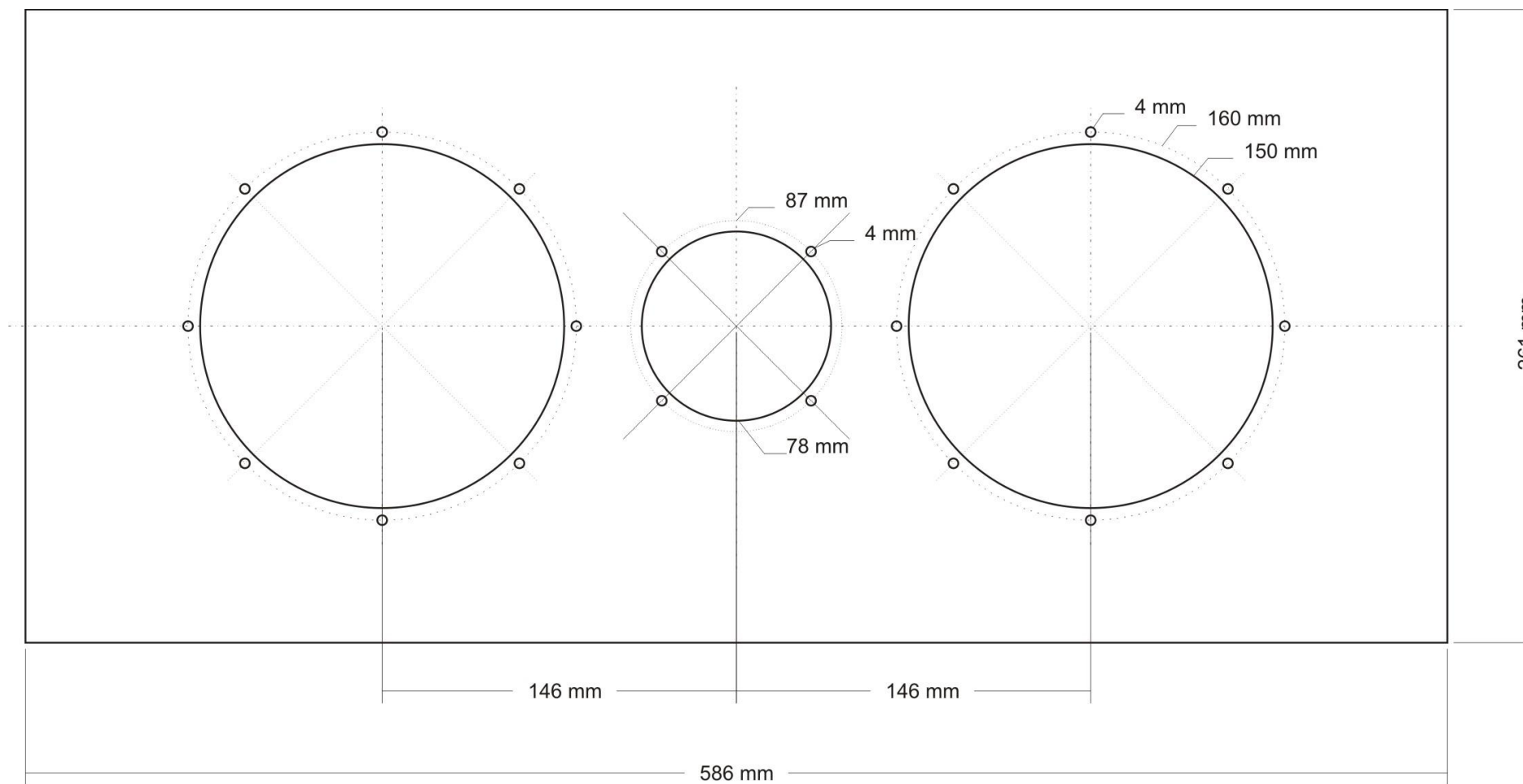
### Příloha č. 3

## Průřez reproduktorovou skříní



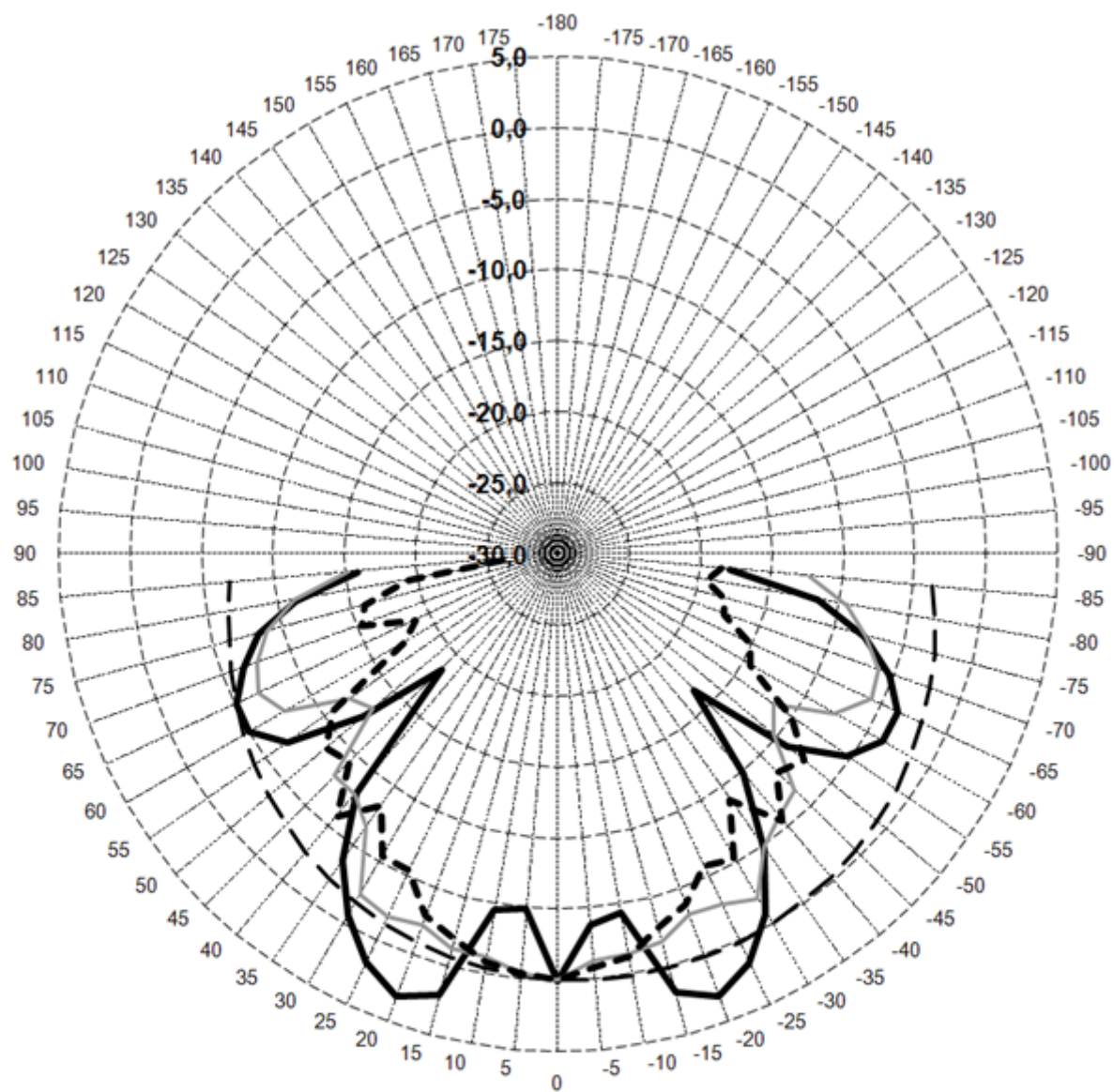
Příloha č. 4

**Čelní strana reproduktorové skříně**



## Příloha č. 5

### Směrové charakteristiky



- 100 Hz
- 3 kHz
- 4650 Hz
- 10 kHz

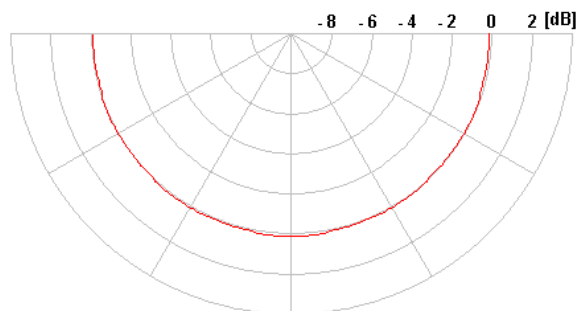
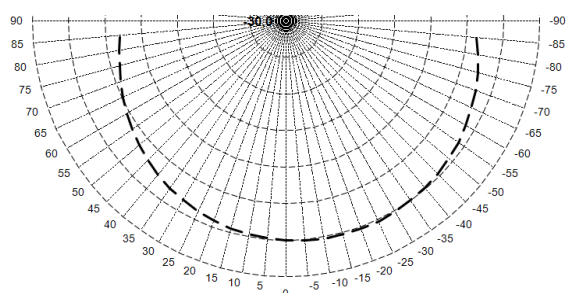
## Příloha č. 6

### Porovnání směrových charakteristik

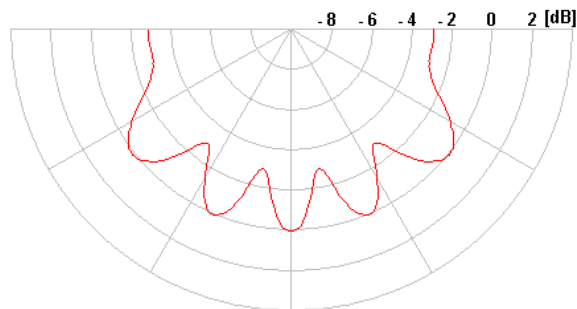
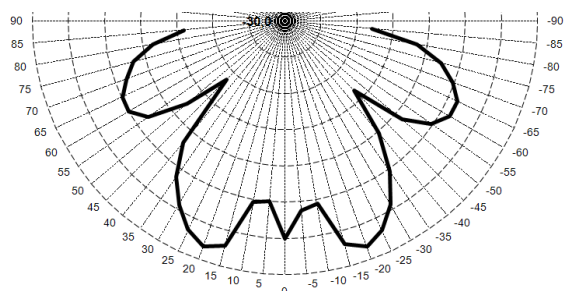
Měřené

Simulované

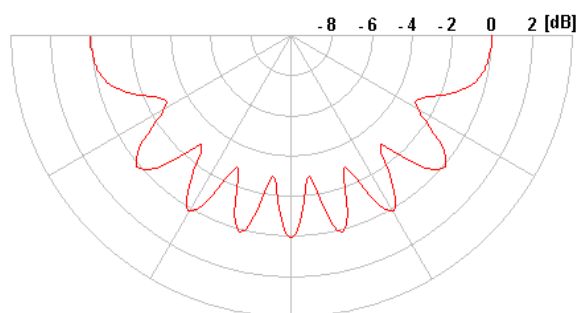
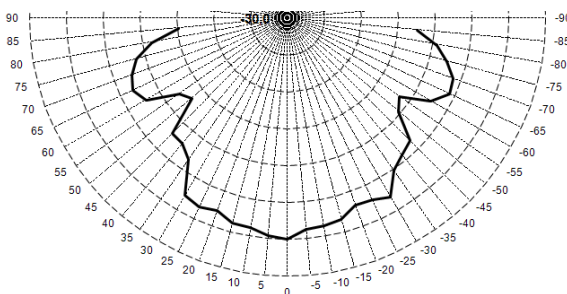
$f = 100 \text{ Hz}$



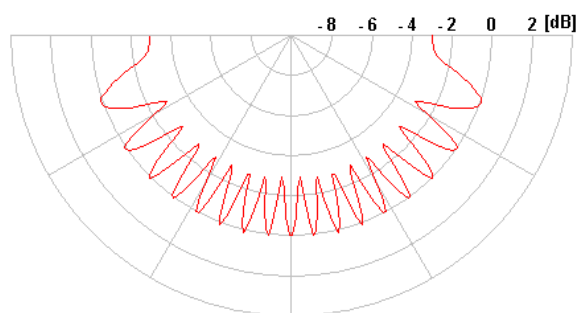
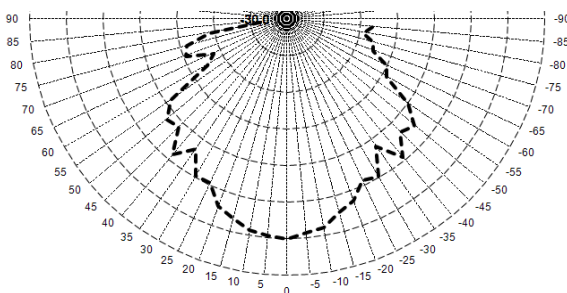
$f = 3 \text{ kHz}$



$f = 4,65 \text{ kHz}$



$f = 10 \text{ kHz}$



Příloha č. 7

**Fotografie soustavy**

