



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA S USPOŘÁDÁNÍM D'APPOLITO A JEJÍ MĚŘENÍ

D'APPOLITO LOUDSPEAKER ENCLOSURE AND ITS MEASUREMENT

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Dočekal

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2023



# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**  
specializace Zvuková technika  
Ústav telekomunikací

**Student:** Ondřej Dočekal

**ID:** 221446

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

## NÁZEV TÉMATU:

### Reproduktorová soustava s uspořádáním D'Appolito a její měření

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte teorii a postup návrhu dvoupásmové reproduktorové soustavy se symetricky uspořádanými hlubokotónovými měniči v uspořádání D'Appolito. Provedte měření potřebných charakteristik všech měničů použitých v modulární reproduktorové soustavě umožňující sestavení konfigurace D'Appolito a na základě těchto měření navrhnete kmitočtovou výhybku pro měřenou kombinaci reproduktorů. S navrženou kmitočtovou výhybkou provedte měření charakteristik reproduktorové soustavy pro různé vzdálenosti hlubokotónových reproduktorů od sebe, od hran ozvučnice a pro různou polohu vysokotónového reproduktoru vzhledem k ose ozvučnice. Provedte kontrolu a optimalizaci návrhu kmitočtové výhybky pro optimální polohu měničů v modulární reproduktorové soustavě. Výsledky měření přehledně zpracujete samostatným protokolem měření.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Colloms, M. High Performance Loudspeakers, 6th ed. John Wiley & Sons, Ltd., 2005. ISBN 978-0-470094-30-3.
- [2] D'Appolito, J. A. A Geometric Approach to Eliminating Lobing Error in Multiway Loudspeakers, AES 74th Convention (Paper 2000), New York, 1983.

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 26.5.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

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



## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá modulární dvoupásmovou reproduktorovou soustavou se dvěma středobasovými reproduktory v uspořádání D'Appolito. Je zde zkoumán jak vliv uspořádání D'Appolito na směrové charakteristiky, tak vliv vzájemné polohy reproduktorů na tyto charakteristiky. Součástí této práce je i teorie, která vysvětluje základní poznatky o reproduktorových soustavách a jejich částí, a která také objasňuje i smysl této práce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

uspořádání D'Appolito, reproduktorová soustava, modulární, konfigurace, pasivní výhybka, směrová charakteristika

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with a modular two-way speaker system with two mid-bass speakers in a D'Appolito arrangement. Both the effect of the D'Appolito arrangement on the directional characteristics and the effect of the relative position of the loudspeakers on these characteristics are investigated here. Part of this work is also a theory that explains basic knowledge about speaker systems and their parts, and which also clarifies the meaning of this work.

## **KEYWORDS**

D'Appolito arrangement, speaker system, modular, configuration, passive crossover, directional characteristics



DOČEKAL, Ondřej. *Reproduktorová soustava s uspořádáním D'Appolito a její měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023, 59 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.





## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Ondřej Dočekal  
**VUT ID autora:** 221446  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2022/23  
**Téma závěrečné práce:** Reproduktorová soustava s uspořádáním D'Appolito a její měření

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

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing.Miroslavovi Balíkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.



# Obsah

Úvod	17
<b>1 Reproduktorová soustava a její součásti</b>	<b>19</b>
1.1 Reproduktor	19
1.2 Ozvučnice reproduktoru	20
1.2.1 Difrakce vlnění na ozvučnici	21
1.2.2 Vliv rozměrů ozvučnice na charakteristiky reproduktoru	22
1.3 Roviny měření směrových charakteristik	22
1.3.1 Azimutální směrová charakteristika	22
1.3.2 Elevační směrová charakteristika	22
1.4 Směrová charakteristika reproduktoru	23
1.5 Směrová charakteristika reproduktorové soustavy	24
1.5.1 Vliv vzájemné polohy reproduktorů v dvoupásmové reproduktorové soustavě	25
1.5.2 Uspořádání D'Appolito	27
<b>2 Pasivní dvoupásmová kmitočtová výhybka</b>	<b>29</b>
2.1 Obvody použité v konkrétní kmitočtové výhybce	30
2.1.1 Kompenzace impedančních charakteristik	31
2.1.2 Obvody pro korekci a kompenzaci kmitočtových charakteristik jednotlivých reproduktorů	31
2.1.3 Použité typy aproximací filtrů kmitočtové výhybky	33
<b>3 Modulární reproduktorová soustava pro testování konfigurace D'Appolito</b>	<b>35</b>
<b>4 Návrh a simulace výhybky pro konkrétní TL ozvučnici</b>	<b>37</b>
4.1 Návrh kompenzační impedanční charakteristiky	38
4.2 Měření reproduktorů v jednotlivých pásmech	39
4.2.1 Návrh výhybky	41
<b>5 Měření charakteristik reproduktorové soustavy</b>	<b>45</b>
5.1 Porovnání měření v referenční ose	45
5.1.1 Vliv vzdálenosti hlubokotónových reproduktorů od sebe	46
5.1.2 Vliv vyosení vysokotónového reproduktoru	47
5.2 Měření směrové charakteristiky	47
5.2.1 Měření azimutální směrové charakteristiky	48
5.2.2 Měření elevační směrové charakteristiky	49

5.3	Měření kmitočtově-směrové charakteristiky . . . . .	52
	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
	<b>Literatura</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>59</b>

# Seznam obrázků

1.1	Řez elektrodynamickým reproduktorem s popisem jeho součástí [1]	20
1.2	Zobrazení difrakce na hranách ozvučnice, červený bod znázorňuje primární zdroj zvukové vlny a zelené body jsou sekundární zdroje vlnění	21
1.3	Měření v azimutu (Pohled shora), šipka zobrazuje směr pohybu mikrofonu a červený bod znázorňuje referenční bod soustavy stojící vertikálně na zemi při pohledu shora	23
1.4	Měření v elevaci (Pohled shora), šipka zobrazuje směr pohybu mikrofonu a červený bod znázorňuje referenční bod soustavy ležící v horizontální rovině při pohledu shora	23
1.5	Zobrazení směrové charakteristiky osově souměrné, pístové kmitající membrány v nekonečné ozvučnici (Tato charakteristika je shodná jak při měření v elevaci, tak v azimutu) [1]	24
1.6	Referenční osa reproduktorové soustavy	25
1.7	Elevační směrová charakteristika reproduktorové soustavy odpovídající měření na mezním kmitočtu[3]	26
1.8	Zobrazení akustické osy soustavy s uspořádáním D'Appolito, tato osa je pro všechny kmitočty shodná	27
2.1	Kmitočtové charakteristiky filtrů dvoupásmové výhybky [1]	29
2.2	Modulové a fázové kmitočtové charakteristiky filtrů různých řádů. [1]	33
3.1	Modulární reproduktorová soustava s různými konfiguracemi modulů	35
4.1	Závislost impedance použitých reproduktorů na kmitočtu	37
4.2	Závislost impedance použitých reproduktorů na kmitočtu před a po korekci	38
4.3	Modulová kmitočtová charakteristika hlubokotónových reproduktorů před korekcí	39
4.4	Modulová kmitočtová charakteristika vysokotónového reproduktoru před korekcí	40
4.5	Modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy před přidáním PRPF, měřeno v konfiguraci P1 s vyoseným VR a mikrofonem na středu modulu	41
4.6	Schéma zapojení kmitočtové výhybky vytvořené v simulačním programu LspCAD	42
5.1	Modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy s konfigurací P1, vyoseným VR měřena na středu modulu	45

5.2	Modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy s konfigurací P1, P2 a P3 s vyoseným vysokotónovým reproduktorem a mikrofonom měřena v geometrické ose modulu vysokotónového reproduktoru ve vzdálenosti jednoho metru . . . . .	46
5.3	Modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy s konfigurací P1 měřená s vysokotónovým reproduktorem v geometrické ose modulu, vyoseným reproduktorem a mikrofonom v geometrické ose modulu reproduktoru a vyoseným reproduktorem s mikrofonom v referenční ose reproduktoru e vzdálenosti jednoho metru . . . . .	47
5.4	Azimutální směrová charakteristika konfigurace P1 s VR na středu modulu a vyoseným VR (pohled shora), měřeno na mezním kmitočtu 2720 Hz . . . . .	48
5.5	Azimutální směrová charakteristika konfigurace P1 s VR na středu modulu a vyoseným VR (pohled shora), měřeno na kmitočtu 17 000 Hz	49
5.6	Elevační směrová charakteristika konfigurací P1 s vyoseným VR a P2 a P3 s VR na středu modulu (s naznačením orientace reproduktorové soustavy), měřeno na kmitočtu 666 Hz . . . . .	50
5.7	Elevační směrová charakteristika konfigurací P1 s vyoseným VR a P2 a P3 s VR na středu modulu (s naznačením orientace reproduktorové soustavy), měřeno na mezním kmitočtu 2720 Hz . . . . .	51
5.8	Elevační směrová charakteristika konfigurací P1 s vyoseným VR a P2 a P3 s VR na středu modulu (s naznačením orientace reproduktorové soustavy), měřeno na kmitočtu 5440 Hz . . . . .	51
5.9	Elevační kmitočtově-směrová charakteristika konfigurace P1 s vyoseným VR, měřeno mezi úhly 0° a 60° (kroku 15°) . . . . .	52



# Úvod

V této práci se budu zabývat dvoupásmovou reproduktorovou soustavou v uspořádání D'Appolito. Konvenční dvoupásmová reproduktorová soustava sestává z jednoho hlubokotónového a jednoho vysokotónového reproduktoru. U konvenční dvoupásmové reproduktorové soustavy se její referenční osa naklání s vlivem polohy reproduktorů v oblasti mezního kmitočtu kmitočtové výhybky, což negativně ovlivňuje její směrové charakteristiky.

Dvoupásmová reproduktorová soustava s uspořádáním D'Appolito sestává ze dvou hlubokotónových a jednoho vysokotónového reproduktoru a vznikla z důvodu kompenzace negativní vlastnosti konvenční dvoupásmové reproduktorové soustavy, která se týká její směrové charakteristiky. Oproti konvenční dvoupásmové reproduktorové soustavě by při použití uspořádání D'Appolito měla být referenční osa bez odklonu a její elevační směrová charakteristika souměrná podle této referenční osy na všech kmitočtech. V této práci se budu věnovat měření reproduktorové soustavy s tímto uspořádáním. Použiji přípravků modulární ozvučnice a modulární kmitočtové výhybky pro možnost měření vlivů změny různých parametrů, ať už polohy reproduktorů, tak použití různých obvodů v kmitočtové výhybce.

Nejprve nastuduji teorii reproduktoru, ozvučnice a reproduktorové soustavy jako celku a také měření směrových charakteristik. Důležitou součástí práce je návrh kmitočtové výhybky, proto nastuduji i teorii návrhu kmitočtových výhybek, a i jednotlivých konkrétních obvodů, které budu používat. Také vysvětlím princip uspořádání D'Appolito. Dále seznámím čtenáře s přípravkem modulární reproduktorové soustavy s konkrétními konfiguracemi této soustavy měřenými v této práci.

Pro návrh výhybky nejprve provedu sadu měření parametrů jednotlivých reproduktorů. Tak budu moci navrhnout obvody kompenzace průběhu závislosti impedance reproduktorů na kmitočtu a následně i jejich modulové kmitočtové charakteristiky. S kompenzačními a korekčními budu připraven navrhnout obvody samotné výhybky, kde nejdůležitějším parametrem bude mezní kmitočet. Měřením soustavy v referenční ose pak ověřím funkci výhybky.

Po navržení kmitočtové výhybky se budu moci věnovat měření směrových charakteristik reproduktorové soustavy. Důležité budou zejména elevační směrové charakteristiky, které nesou informaci o vlivu uspořádání D'Appolito na tuto charakteristiku. Abych ovšem mohl znát chování reproduktorové soustavy mimo její referenční osu na všech kmitočtech, provedu ještě měření kmitočtově-směrových charakteristik, ze kterých bude možné toto chování vypožorovat. Po provedení těchto měření budu mít informace potřebné závěrečnému zhodnocení funkce uspořádání D'Appolito.



# 1 Reproduktorová soustava a její součásti

V současné době neexistuje reproduktor s vyrovnanou kmitočtovou charakteristikou a lineárním přenosem v celém pásmu slyšitelných kmitočtů. Pro dosažení co nejvěrnější reprodukce zvukových signálů je tedy nutné využívat reproduktorových soustav s více reproduktory tak, že každý funguje jen v určitém pásmu.

Reproduktorová soustava sestává z tří základních prvků. Prvním prvkem je reproduktor, což je elektroakustické zařízení, které převádí elektrický signál na akustické vlny. Druhým prvkem je ozvučnice, která je fyzickým obalem celé soustavy a zároveň ovlivňuje její vlastnosti na akustické úrovni. Třetím a posledním prvkem je kmitočtová výhybka, která rozděluje vstupní signál do kmitočtových pásem a umožňuje tak různým reproduktorům reprodukovat jen určité kmitočtové pásmo. Tyto tři prvky jsou klíčovými součástmi reproduktorové soustavy a jejich správné navržení a kombinace je zásadní k věrné reprodukci zvukových signálů.

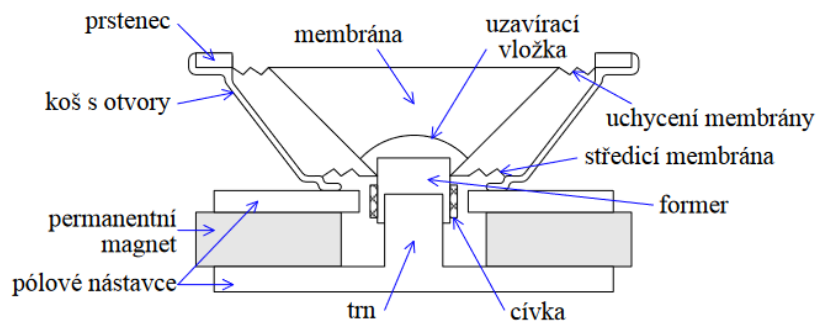
## 1.1 Reproduktor

Základní prvek reproduktorové soustavy, jak z názvu vyplývá je reproduktor. Funkce reproduktoru je převod elektrického signálu na mechanické vlnění, jedná se tedy o tzv. elektromechanický měnič. Reproduktry můžeme dělit do skupin podle různých charakteristik jako například způsob vyzařování, druh elektromechanického měniče nebo třeba schopnosti věrné reprodukce jen v určité kmitočtové oblasti.

V současnosti nejrozšířenějším typem reproduktoru je elektrodynamický cívkový reproduktor. Zásadní části tohoto typu reproduktoru jsou membrána, kmitací cívka, která je s touto membránou pevně spojena a permanentní magnet v jehož magnetickém poli je cívka umístěna.

Na obrázku 1.1 je řez typickým elektrodynamickým měničem s popisem jeho dílčích částí. Vstupní signál je přiveden na svorky cívky, takže se změnou směru proudu protékajícího cívkou se mění i síla, která na ní působí a důsledkem jsou mechanické kmity cívky. Takto kmitající cívka zároveň působí na připojenou membránu, která zase rozkmitá okolní vzduch, a tím vytváří změny akustického tlaku, námi vnímané jako zvuk. [1]

Akustická osa, je dána osou směru pohybu membrány a geometrickým středem reproduktoru. Tak určuje hlavní směr vyzařování reproduktoru. V této ose by měl mít reproduktor nejlepší vlastnosti, co se jeho kmitočtové charakteristiky týče. V případě osově symetrických reproduktorů se tato osa shoduje s geometrickou osou reproduktoru, ale pokud se jedná o jiný typ reproduktoru, určuje akustickou osu zpravidla výrobce. Plocha ze které vychází zvuková vlna se nazývá ústí reproduktoru.



Obr. 1.1: Řez elektrodynamickým reproduktorem s popisem jeho součástí [1]

Referenčním bodem reproduktoru se rozumí průsečík akustické osy s ústím reproduktoru. V tomto bodě se předpokládá, že se reproduktor chová jako ideální bodový zdroj zvuku, a tak slouží jako referenční bod pro měření různých akustických vlastností reproduktoru, jako je například směrová charakteristika. [1]

Modulová kmitočtová charakteristika reproduktoru je závislost citlivosti reproduktoru na kmitočtu a měří se v akustické ose reproduktoru, ve vzdálenosti jednoho metru a ideálně ve volném poli. Při tomto měření by měl být příkon reproduktoru 1 W.

Směrová charakteristika reproduktoru je závislost citlivosti reproduktoru na odklonu od jeho akustické osy na určitém kmitočtu. Směrové charakteristiky se obvykle měří buď v elevaci nebo v azimutu, tedy buď ve vertikální nebo horizontální rovině. U osově souměrných reproduktorů je výsledná charakteristika v obou rovinách stejná.

Kmitočtově-směrová charakteristika závislost zobrazuje závislost citlivosti reproduktoru na kmitočtu. Toto měření se provádí opět ve vzdálenosti jednoho metru ale v různých úhlech odklonu od akustické osy reproduktoru. [1] [3]

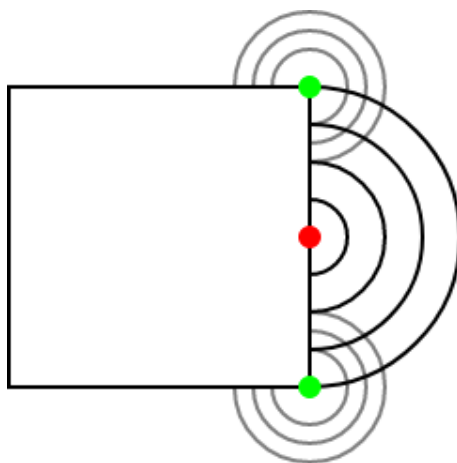
## 1.2 Ozvučnice reproduktoru

Reproduktorová skříň neboli ozvučnice reproduktoru hraje významnou roli v kmitočtové charakteristice reproduktoru. Její hlavní funkce je zabránit vzniku akustického zkratu, který je důsledkem vzájemné interference přední a zadní akustické vlny vyzařované reproduktorem. Tyto vlny jsou navzájem v protifázi a pokud se setkají, dojde k vzájemnému vyrušení, což vede ke zhoršení kvality zvuku. Reproduktorová skříň tedy funguje jako bariéra mezi přední a zadní stranou reproduktoru a její vliv se projevuje zejména u zvukových signálů s nízkými kmitočty. Proto je návrh ozvučnice prováděn na základě vlastností basového respektive hlubokotónového reproduktoru, který je v reproduktorové soustavě použit. [1]

### 1.2.1 Difrakce vlnění na ozvučnici

Difrakce zvukových vln na ozvučnici je jedním z fyzikálních dějů, které mají vliv na charakteristiky reproduktorové soustavy i reproduktoru samotného.

Při dopadu zvukové vlny na objekt s konečnými rozměry vzniká difrakce neboli ohyb vlnění. Difrakce se objevuje na ostrých hranách takového objektu, kde dochází ke změně směru vlnění za překážku. Tyto hrany si lze představit jako sekundární zdroje akustického signálu, a tak se vlnění dostává i do geometrického stínu překážky. Pokud vlnění dopadá na hladkou část objektu, dojde k částečnému pohlcení a odrazu vlnění zpět do prostoru. [3]



Obr. 1.2: Zobrazení difrakce na hranách ozvučnice, červený bod znázorňuje primární zdroj zvukové vlny a zelené body jsou sekundární zdroje vlnění

Na obrázku 1.2 je zobrazen vznik difrakce na čtvercové ozvučnici s jedním zdrojem zvuku symbolizovaným červeným bodem. Zelené body jsou sekundární zdroje zvuku vzniklé na hranách ozvučnice.

Dalším zásadním vlivem je interference vlnění. Vznik interferencí nastává v případě, že se ve stejném místě prostoru potkávají dvě a více vln. Tyto vlny se navzájem z důvodu fázového rozdílu buď sčítají a nebo odčítají. Pokud jsou například vlny ve fázi, sečtou se a zvětší tak i velikost výsledné amplitudy signálu, naproti tomu při opačné fázi se výsledná amplituda sníží. Na obrázku 1.2 je patrné, že k takovým interferencím může docházet například důsledkem difrakce na hranách ozvučnice. Vzniká tak interference vlnění primárního a sekundárního zdroje signálu. Důležitý je také fakt, že pokud jsou všechny vzdálenosti hran od reproduktoru stejné, bude i zpoždění vln vzniklých na všech hranách vůči primárním vlnám reproduktoru shodné. Tím se ještě více zesílí vliv interference vlnění na kmitočtech s vlnovou délkou shodnou se vzdáleností hran ozvučnice od reproduktoru. To se dá potlačit umístěním reproduktoru nesymetricky vůči jednotlivým hranám ozvučnice. Difrakce ovšem vzniká i

na hranách samotného reproduktoru a šroubech jimiž je uchycen, proto je dobré jak reproduktor, tak jeho montážní prvky zapustit dosti hluboko do stěny ozvučnice. [3]

## 1.2.2 Vliv rozměrů ozvučnice na charakteristiky reproduktoru

Další nežádoucí jev související s vložením reproduktoru do ozvučnice s konečnými rozměry je tzv. *baffle-step*. Když je velikost přední stěny ozvučnice větší vzhledem k vlnové délce akustických vln, můžeme pozorovat zvýšení citlivosti na těchto kmitočtech. S růstem kmitočtu se velikost vlnové délky zmenšuje vzhledem k přední stěně ozvučnice a reproduktor vyzařuje do prostoru před sebou. Při nízkých kmitočtech, má ovšem reproduktor sférický vyzařovací charakter, tedy vyzařuje do dvojnásobného prostoru, a tak vzniká pokles o -6 dB na těchto nízkých kmitočtech.

Tento jev se běžně kompenzuje na úrovni kmitočtové výhybky, ale tato korekce není vždy nezbytná. Umístěním soustavy ke zdi se například dá do jisté míry tento jev kompenzovat. Při určité vzdálenosti soustavy od zdi se část vlny šířící směrem za soustavu odrazí od zdi a sečte s přední částí vlny. Ovšem je obecně důležité správné umístění v místnosti, protože vznikají další jevy, které mohou i zhoršit vlastnosti soustavy. [6]

## 1.3 Roviny měření směrových charakteristik

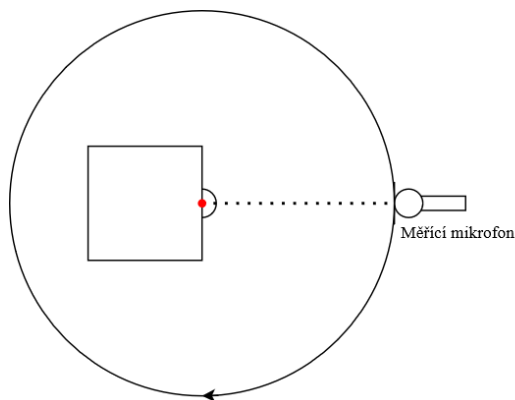
Měření směrových charakteristik se dělí mezi dva základní typy, měření v azimutu a měření v elevaci. Rozlišení těchto měření spočívá v tom, že se provádí se soustavou stojící vertikálně nebo ležící v horizontální rovině. Tak dostaneme směrovou charakteristiku azimutální nebo elevační.

### 1.3.1 Azimutální směrová charakteristika

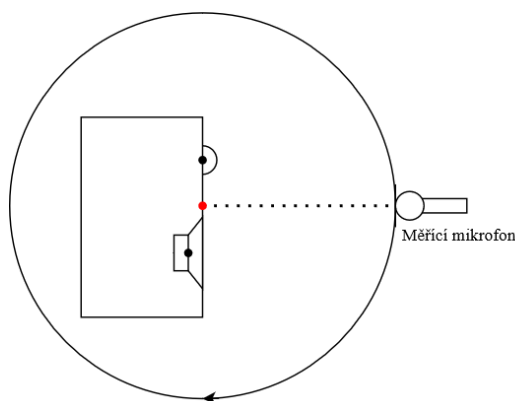
Tuto charakteristiku dostaneme postupným měřením soustavy s mikrofonem na různých úhlech odklonu od referenční osy soustavy v horizontální rovině, přičemž soustava stojí ve vertikální poloze. Vzdálenost mikrofonu však musí zůstat ve všech úhlech stejná od referenčního bodu. Konfigurace tohoto měření je znázorněna na obrázku 1.3

### 1.3.2 Elevační směrová charakteristika

Měření v elevaci probíhá stejným způsobem, jako v azimutu, avšak soustava je nyní orientována naležato v horizontální rovině. Mikrofon se postupně otáčí stejným způsobem, avšak změnou orientace soustavy je výsledná charakteristika elevační. Na obrázku 1.4 je zobrazena konfigurace tohoto měření.



Obr. 1.3: Měření v azimutu (Pohled shora), šipka zobrazuje směr pohybu mikrofonu a červený bod znázorňuje referenční bod soustavy stojící vertikálně na zemi při pohledu shora



Obr. 1.4: Měření v elevaci (Pohled shora), šipka zobrazuje směr pohybu mikrofonu a červený bod znázorňuje referenční bod soustavy ležící v horizontální rovině při pohledu shora

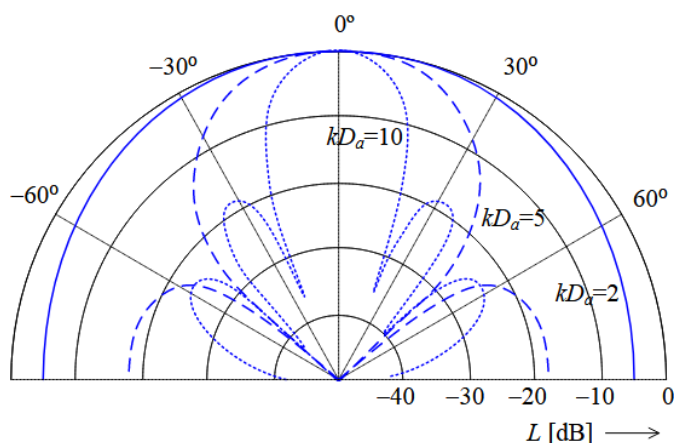
Měření směrové charakteristiky v elevaci je pro tuto práci zásadní, jelikož se zde nejvíce projevuje funkce konfigurace D'Appolito.

## 1.4 Směrová charakteristika reproduktoru

Směrová charakteristika reproduktoru popisuje, jak se reproduktor chová při šíření zvukových vln v různých směrech. Tato charakteristika ukazuje, jak se mění úroveň akustického tlaku při buzení daným kmitočtem a příkonem, v závislosti na odklonu bodu ve kterém měříme vůči akustické ose reproduktoru, přičemž se zachovává stálá vzdálenost bodu měření od referenčního bodu reproduktoru.

Vlny vysílané z reproduktorové membrány se šíří do okolního prostoru jako sfé-

rické vlny. Při nízkých kmitočtech jsou vlny velmi dlouhé v porovnání s velikostí reproduktorové membrány, což znamená, že vlny jsou emitovány ve velmi širokém úhlu. Naopak při vysokých kmitočtech jsou vlny mnohem kratší a mohou být emitovány v užším úhlu. Pokud se totiž vlnová délka stává menší než rozměr samotné membrány, dochází k tzv. lobingu ve směrové charakteristice. Membrána zdroje zvuku začne fungovat jako více malých zdrojů blízko sebe a zvukové vlny z těchto různých zdrojů mezi sebou začnou interferovat. [1] [2]



Obr. 1.5: Zobrazení směrové charakteristiky osově souměrné, pístově kmitající membrány v nekonečné ozvučnici (Tato charakteristika je shodná jak při měření v elevaci, tak v azimutu) [1]

Bezrozměrné číslo  $kD$ , které je v diagramu značí podíl obvodu s vlnovou délkou. Tedy pokud zvětšujeme rozměr membrány nebo kmitočet signálu, zvyšuje se i hodnota  $kD$  a tak je reproduktor více směrový. [1]

Směrovost reproduktorů se může také lišit v závislosti na konstrukci reproduktoru a jeho umístění v reproduktorové skříni. V praxi se tedy mohou vyskytnout situace, kdy reproduktor s vysokou směrovostí při vysokých kmitočtech nevykazuje takovou směrovost v reálných podmínkách použití. [2]

## 1.5 Směrová charakteristika reproduktorové soustavy

Pokud více reproduktorů v reproduktorové soustavě vyzářuje současně, dochází k interferencím zvukových signálů v akustickém prostoru, což ovlivňuje výslednou směrovou charakteristiku vyzářování reproduktorové soustavy. Pokud jsou referenční body jednotlivých reproduktorů v různých vzdálenostech od posluchače, vznikají fázové rozdíly mezi jednotlivými zvukovými signály. Tyto fázové rozdíly mohou způsobovat problémy zejména v oblasti kmitočtů blízkých meznímu kmitočtu výhybky



a jsou nejvíce patrné právě na směrové charakteristice reproduktorové soustavy.

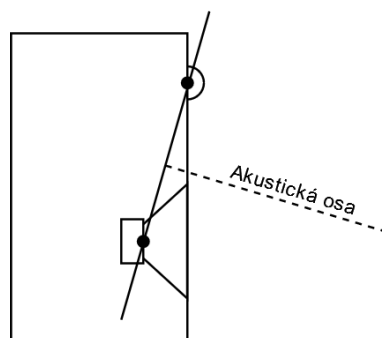
Nežádoucí interference se dají minimalizovat pomocí vhodných aproximací filtrů výhybky, které rozdělují signál na jednotlivá pásma. Ideální by také bylo dosáhnout nulové vzdálenosti mezi jednotlivými reproduktory, aby vznikl dojem, že signál vychází z jediného místa. Takové uspořádání je často využíváno například u koaxiálních dvoupásmových reproduktorů, které se používají například v automobilech.

Při volbě dělicích kmitočtů výhybek reproduktorových soustav se berou v úvahu i požadované směrové charakteristiky v okolí těchto dělicích kmitočtů. Tyto charakteristiky mají vliv právě i na výslednou směrovou charakteristiku soustavy.[3]

### 1.5.1 Vliv vzájemné polohy reproduktorů v dvoupásmové reproduktorové soustavě

Dvoupásmová reproduktorová soustava obvykle sestává z jednoho hlubokotónového (HR) a jednoho vysokotónového reproduktoru (VR). Stejně jako u samotných reproduktorů, i u reproduktorových soustav existují referenční prvky důležité pro měření jejich charakteristik.

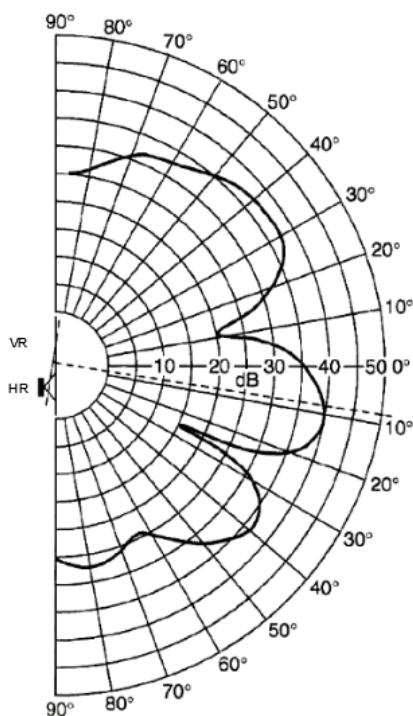
Na obrázku 1.6 je znázorněn příklad umístění reproduktorů v konvenční ozvučnici a vliv jejich různé hloubky zapuštění na orientaci akustické osy soustavy. Akustická osa je kolmicí na spojnici referenčních bodů jednotlivých reproduktorů soustavy, a vychází ze středu této spojnice, který je zároveň referenčním bodem soustavy. V akustické ose reproduktorové soustavy nedochází k fázovým rozdílům mezi signály z jednotlivých reproduktorů a předpokládá se zde nejvyrovnanější charakteristika soustavy jako celku, stejně jako tomu je v případě samotných reproduktorů a jejich akustických os. Znalost této osy je důležité pro správné provedení měření kmitočtové charakteristiky. [3]



Obr. 1.6: Referenční osa reproduktorové soustavy

Obrázek 1.7 znázorňuje graf vyzařovací charakteristiky reproduktorové soustavy měřené na mezním kmitočtu soustavy. Přerušovaná čára znázorňuje referenční osu

soustavy, kde jsou fázové rozdíly mezi vyzařovanými signály nulové, značky HR a VR označují vysokotónový a hlubokotónový reproduktor. Tato charakteristika odpovídá měření na mezním kmitočtu soustavy, ale tyto charakteristiky nejsou pro všechny kmitočty stejné.



Obr. 1.7: Elevační směrová charakteristika reproduktorové soustavy odpovídající měření na mezním kmitočtu[3]

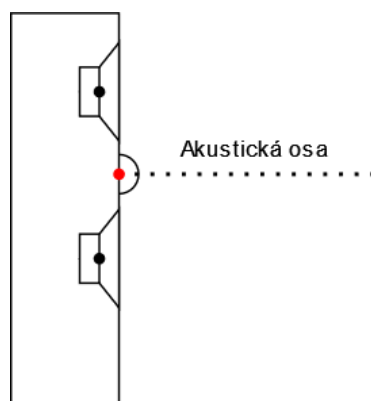
S rostoucími rozměry reproduktoru je jeho referenční bod obecně dále od úchytů reproduktoru a tak musí být zapuštěn v ozvučnici hlouběji, než referenční bod vysokotónového reproduktoru. Zvukový signál v okolí mezního kmitočtu tak vychází ze dvou časově posunutých zdrojů a vzniká rozdíl fáze mezi jednotlivými reproduktory, což ovlivňuje jak akustickou osu soustavy, tak přenos v okolí mezního kmitočtu.

Dále je důležité, aby akustické osy obou reproduktoru byly co nejblíže k sobě. V ideálním případě by se tyto osy měly překrývat, ovšem toho z konstrukčních důvodů není možné vždy dosáhnout. Tak se volí vzdálenost mezi osami reproduktorů  $\frac{1}{4}$  nebo pak  $\frac{5}{4}$  vlnové délky dělicího kmitočtu. Zvyšování vzdálenosti reproduktorů má vliv hlavně na směrovou charakteristiku soustavy, kdy s rostoucí vzdáleností roste i počet vzniklých laloků ve směrové charakteristice. [3]

## 1.5.2 Uspořádání D'Appolito

Uspořádání D'Appolito je konfigurace reproduktorové soustavy, která má zásadní vliv na elevační směrovou charakteristiku reproduktorové soustavy a minimalizuje problém spojený s chybou lobingu. Tento jev lze pozorovat na obrázku 1.7, kde hlavní lalok není souběžný s horizontální rovinou, ale je vychýlen o určitý úhel směrem k hlubokotónovému reproduktoru.

U běžných dvoupásmových reproduktorových soustav se referenční osa soustavy naklání a není tak stálá na všech kmitočtech. Podstata uspořádání D'Appolito spočívá v symetrickém použití dvou hlubokotónových reproduktorů umístěných ve stejné vzdálenosti pod a nad jedním vysokotónovým reproduktorem. Referenční osa soustavy je díky tomu na všech kmitočtech ve stejné poloze a kolmo na středu spojnice referenčních bodů dvou hlubokotónových reproduktorů. Interference vlnění jednotlivých reproduktorů vzniká symetricky podle akustické osy soustavy a hlavní lalok se tedy nenaklání k žádné ze hlubokotónových jednotek. Díky tomuto uspořádání je i výsledná směrová charakteristika souměrná podle referenční osy soustavy a nevzniká problém odklonu hlavního laloku směrem k hlubokotónovému reproduktoru. [7]



Obr. 1.8: Zobrazení akustické osy soustavy s uspořádáním D'Appolito, tato osa je pro všechny kmitočty shodná

Přidáním dalšího hlubokotónového reproduktoru ovšem začnou vznikat další podstatné interference vlnění na nízkých kmitočtech. K takové interferenci u běžných soustav nedochází, protože nízké kmitočty vychází pouze z jednoho zdroje vlnění. Toto má velký vliv na směrovou charakteristiku reproduktorové soustavy, a to konkrétně vznikem velkých poklesů modulu v určitých úhlech odklonu od referenční osy v elevaci.

Konfigurace D'Appolito má tedy sice tu výhodu, že referenční osa soustavy je na všech kmitočtech stejná, musí se ale brát v úvahu vznik nových interferencí a tak zkreslení směrové charakteristiky. [7] [8]



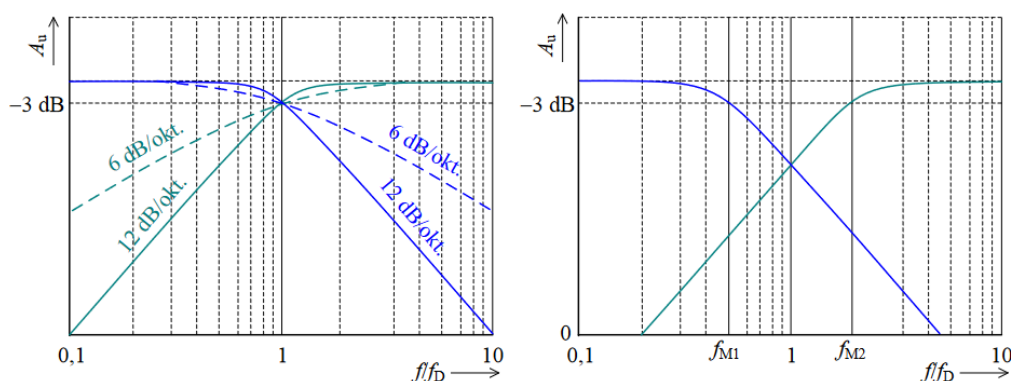
## 2 Pasivní dvoupásmová kmitočtová výhybka

Hlavním účelem reproduktorové výhybky je dělení spektra signálu tak, aby každý reproduktor fungoval pouze v té části spektra, ve které je schopen nejlépe reprodukovat akustický signál, což vede k minimalizaci jak lineárního, tak nelineárního zkreslení signálu. Díky správně navržené kmitočtové výhybce lze dosáhnout dobrého zvuku i s nekvalitním reproduktorem. Na druhé straně může nesprávně navržená výhybka způsobit nejen špatný zvuk, ale také poškození reproduktorů.

V kmitočtové výhybce se využívá filtrů typu dolní a horní propust pro hlubokotónový, respektive vysokotónový reproduktor. Pokud je součástí soustavy i středotónový reproduktor, používá se filtr typu pásmová propust. Kromě toho, že dělí spektrum signálu mezi reproduktory, reproduktorová výhybka také chrání jednotlivé reproduktory před poškozením, zejména středotónový a vysokotónový reproduktor. Výhybka zajišťuje, aby jednotlivé reproduktory nebyly zbytečně výkonově přetíženy nízkými kmitočty, jenž nejsou schopny reprodukovat a mohli by zapříčinit jejich zničení. [1]

Dělicí kmitočet výhybky nemusí být pro oba reproduktory stejný. Reproduktory v okolí mezního kmitočtu již nemusejí mít vyrovnanou kmitočtovou modulovou charakteristiku, a tak se musí mezní kmitočet volit v závislosti na konkrétně použitých reproduktorech. Výsledný reálný mezní kmitočet tak vzniká průnikem obou průběhu kmitočtových modulových charakteristik samotných reproduktorů. [5]

Na obrázku 2.2 jsou dva příklady rozdělení pásem - vlevo se shodným mezním kmitočtem a vpravo s různými hodnotami dělicích kmitočtů za použití stejného typu filtru. [1]



Obr. 2.1: Kmitočtové charakteristiky filtrů dvoupásmové výhybky [1]

Pro správný návrh výhybky je nejprve potřeba znát charakteristiky jednotlivých reproduktorů změřených v ozvučnici a zároveň musí již být navrženy všechny korekční a kompenzační obvody ve všech kmitočtových pásmech. Obvody jednotlivých

propustí samotné výhybky jsou tak až posledním bodem návrhu celého obvodu. Je důležité si uvědomit, že na výsledné charakteristiky soustavy mají zásadní vliv fázové charakteristiky jednotlivých pásem v okolí mezního kmitočtu. Tyto fázové charakteristiky jsou ovlivněny velkým množstvím vlivů, a to jak fázovými rozdíly jednotlivých filtrů výhybky, tak i zbytkem kompenzačních a korekčních obvodů, nebo i rozdílem vzdáleností referenčních bodů reproduktorů od sebe a rozdílnou hloubkou zapuštění těchto bodů v přední stěně ozvučnice. Návrh kmitočtové výhybky je tak značně náročný a je třeba se řídit analyzováním výsledných změřených charakteristik, jelikož všechny tyto vlivy není možné simulovat. Výhybku je pak na základě průběžného měření možné postupně podle potřeby upravovat. Popřípadě se podle známých vzorců navrhne prvotní podoba výhybky, která se poté též postupně upravuje. [1] [4]

Dosažený dokonale vyrovnané modulové charakteristiky není principiálně možné, a tak se výsledný průběh popisuje tolerančním polem, mimo které by se hodnoty modulové charakteristiky neměly dostat. Toleranční pole  $\pm 1$  dB se dá považovat za ideální, avšak to je obvykle těžko dosažitelné. Chceme-li dosáhnout tolerančního pole  $\pm 2$  dB, je zapotřebí použít minimálně 10 obvodových prvků, a to pro každé pásmo výhybky v dvoupásmové soustavě. S narůstajícím počtem pásem narůstá i počet použitých prvků a to rychleji než jen se zvyšováním počtu pásem. U některých pásem bude zapotřebí použít i dvě propusti pro dvě přechodová pásma.

Za účelem dodržení tolerančního pole je často zapotřebí zvyšovat počet korekčních obvodů, a tím značně roste jak složitost obvodu, tak výsledná cena výhybky. Pokud se jako obvod výhybky použijí jen samotné propusti, případně přizpůsobení citlivosti reproduktorů, není většinou možné dosáhnout tolerančního pole ani  $\pm 5$  dB. [1] [5]

## 2.1 Obvody použité v konkrétní kmitočtové výhybce

Pokud je modulová kmitočtová charakteristika samotného reproduktoru v ozvučnici vyrovnaná, může být výsledný obvod výhybky navržen bez nutnosti použití velkého množství korekčních obvodů. Umístění reproduktorů v ozvučnici a tvar samotné ozvučnice mění výsledné charakteristiky reproduktorů, a proto je vždycky potřeba tyto charakteristiky měřit s reproduktorem v ozvučnici v dané topologii. Dále je potřeba znát závislost impedance na kmitočtu jednotlivých reproduktorů pro návrh obvodů jejich kompenzace, tak aby měla hodnotu jmenovité impedance v užitečném pásmu každého reproduktoru. V této práci bylo použito několik typů obvodů, které jsou zde následně vysvětleny.

### 2.1.1 Kompenzace impedančních charakteristik

Jak již bylo zmíněno, je třeba aby každý reproduktor měl ve svém užitečném pásmu vyrovnaný průběh závislosti impedance na kmitočtu s hodnotou jmenovité impedance  $Z_j$ .

Filtr kompenzující průběh závislosti impedance na kmitočtu hlubokotónového reproduktoru se nazývá Zobelův filtr. Ten se realizuje sériovým zapojením RC článku v paralelní topologii s reproduktorem. S narůstajícím kmitočtem narůstá impedance cívky reproduktoru a tento nárůst Zobelův filtr kompenzuje.

Výpočty hodnot součástek jsou následující:

$$R = 1,25 \cdot R_e, \quad C = \frac{L_e}{R^2}. \quad (2.1)$$

Hodnota  $R_e$  je stejnosměrný odpor reproduktoru a hodnota  $L_e$  je indukčnost cívky reproduktoru.

Pro kompenzaci nárůstu hodnoty impedance na ojedinělém kmitočtu je vhodný antirezonanční peak filtr. Ten je tvořen sériovým RLC článkem paralelně připojeným k reproduktoru. Obvod zde slouží pro kompenzaci rezonance vysokotónového reproduktoru. Tento rezonanční kmitočet se totiž často vyskytuje v okolí mezního kmitočtu výhybky, a jeho použití je tak důležité pro správný návrh výhybky.[5]

Pro výpočet hodnot součástek tohoto obvodu jsou dány následující vztahy:

$$R = \frac{R_e |Z|}{|Z| - R_e}, \quad C = \frac{1}{2\pi f_r Q_{Es} R_e}, \quad L = \frac{Q_{Es} R_e}{2\pi f_r}. \quad (2.2)$$

Hodnota  $f_r$  je zde kmitočet rezonance, hodnota  $Z$  je impedance reproduktoru v jeho rezonanci a  $Q_{Es}$  je elektrický činitel jakosti reproduktoru.[5]

### 2.1.2 Obvody pro korekci a kompenzaci kmitočtových charakteristik jednotlivých reproduktorů

Po změření kmitočtové charakteristiky jednotlivých reproduktorů v ozvučnici a návrhu kompenzačních obvodů jejich průběhů závislosti impedance na kmitočtu je provedena analýza jednotlivých kmitočtů a stanoví se, jaké obvody korekce a kompenzace budou zapotřebí. Vždy se uvažuje pouze užitečné pásmo reproduktoru, tedy artefakty mimo tento rozsah není zapotřebí nijak řešit, jelikož budou potlačeny samotným filtrem výhybky. Pokud se některé artefakty nachází v okolí mezního kmitočtu, dají se někdy řešit použitím určitého typu a aproximace filtru výhybky. Citlivost reproduktoru se přizpůsobuje až po navržení všech ostatních korekčních a kompenzačních obvodů, protože ty sami mohou měnit výslednou citlivost reproduktoru.

Pokud jsou obvody navrženy správně, měly by výsledné kmitočtové charakteristiky všech reproduktorů mít stejné zvlnění a citlivost. [5]

### Pasivní high shelving filtr pro korekci kmitočtové charakteristiky

Tento typ filtru nedefinuje mezní kmitočet, jako tomu je u běžných filtrů, které dělí kmitočtové charakteristiky na propustná a nepropustná pásma. Místo toho jsou definovány dvěma parametry a to bodem inflexe a rozdílem přenosu na začátku a konci přechodového pásma. U pasivních výhybek má obvykle jedno pásmo přenos 0 dB a druhé se dá nastavit, je ale ovšem vždy menší než 0 dB. Hodnoty rezistoru a cívky pro tento typ filtru se vypočítají pomocí vztahů:

$$a_f = 10^{\frac{A_{BS}}{20}}, \quad R = |Z| \frac{1 - a_f}{a_f}, \quad L = \frac{R}{2\pi f_{BS}} \sqrt{\frac{|Z|}{(R + |Z|)}}. \quad (2.3)$$

$A_{BS}$  je rozdíl přenosů filtru a  $f_{BS}$  je pak kmitočet inflexe. Hodnota  $Z$  je velikost impedance reproduktoru na kmitočtu inflexe filtru a lze ji získat z průběhu závislosti impedance na kmitočtu reproduktoru. [5]

### Rezonanční a antirezonanční peak filtr pro korekci citlivosti

Pokud dochází v kmitočtové charakteristice k nárůstu nebo poklesu modulu na určitém kmitočtu, lze použít antirezonanční, respektive rezonanční peak filtr. Jako u všech pasivních obvodů, ani tento nemůže mít přenos větší, než 0 dB. Každý filtr má tři parametry popisující jeho chování. Rezonanční kmitočet  $f_r$  udává, na jakém kmitočtu bude mít filtr největší, respektive nejmenší přenos. Přenos  $A_f$ , který udává přenos na rezonančním kmitočtu a šířku pásma filtru  $f_b$ , která udává rozsah mezi kmitočty, kde přenos  $A_f$  nabývá poloviny. Tento obvod se jako sériový RLC článek zapojuje paralelně k reproduktoru. V případě antirezonančního filtru jsou cívka i kondenzátor zapojeny v sérii, naproti tomu u rezonančního peak filtru jsou tyto prvky zapojeny paralelně. [4]

Pro výpočet hodnot součástek tohoto filtru je nejprve potřeba získat hodnoty pomocných veličin podle vztahů:

$$a_f = 10^{\frac{A_f}{20}}, \quad b_f = 10^{\frac{0,5A_f}{20}}, \quad Q_b = \frac{f_r}{b_f f_b}. \quad (2.4)$$

Pro rezonanční peak filtr jsou pak hodnoty vypočteny podle následujících vztahů:

$$R = |Z| \frac{a_f}{1 - a_f}, \quad L = \frac{R}{2\pi f_r a_f Q_b}, \quad C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L}. \quad (2.5)$$



A pro antirezonanční peak filtr podle vztahů:

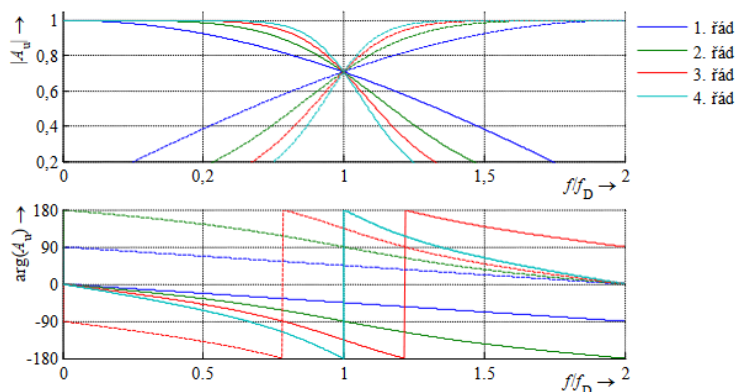
$$R = |Z| \frac{a_f}{1 - a_f}, \quad L = \frac{RQ_b}{2\pi f_r}, \quad C = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L}. \quad (2.6)$$

Hodnoty  $Z$  lze získat z impedanční charakteristiky reproduktoru a je shodná s hodnotou impedance na kmitočtu  $f_r$ . [5]

### 2.1.3 Použité typy aproximací filtrů kmitočtové výhybky

V pasivních kmitočtových výhybkách se setkáme převážně s filtry typu prvního, druhého a třetího řádu. Čím se zvyšuje řád výhybky, tím i počet použitých prvků a tím jsou také významnější tolerance součástek. Také fázové charakteristiky se liší v závislosti na typu filtru. Tím se dá ovlivnit nejen kmitočtová charakteristika v referenční ose soustavy, ale zároveň i směrové charakteristika soustavy v okolí dělicího kmitočtu.

Filtr typu 1. řádu se používá pouze v dolním pásmu pro basové reproduktory, které musí sami o sobě mít vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku, a to hlavně ve vyšších kmitočtech. V této práci bylo použito filtrů typu 2. řád pro hlubokotónový reproduktor a filtr typu 3. řádu pro vysokotónový reproduktor. [1]



Obr. 2.2: Modulové a fázové kmitočtové charakteristiky filtrů různých řádů. [1]

#### Linkwitz-Riley 2. řádu

Filtru typu Linkwitz-Riley druhého řádu (LR2) je jeden z nejběžněji používaných v kmitočtových výhybkách. Strmost modulové kmitočtové charakteristiky za mezním kmitočtem při použití tohoto typu filtru je 12dB/okt. Fázový posun mezi horní a dolní propustí při stejném mezním kmitočtu je pak  $180^\circ$  mezi výstupy obou kanálů.

Výhodou těchto filtrů je fakt, že se dá snadno změnit jejich kvalita a tím i přenos na mezním kmitočtu. Kmitočtové charakteristiky jednotlivých reproduktorů nemusejí být v okolí mezního kmitočtu vyrovnané a změnou kvality filtru výhybky lze do jisté míry kompenzovat toto zvlnění. [3]

Výpočty hodnot prvků pro dolní pásmo:

$$C = \frac{1}{4\pi \cdot f_m \cdot R_{HR}}, \quad L = \frac{R_{HR}}{\pi \cdot f_m}. \quad (2.7)$$

Pro horní pásmo jsou výpočty následující:[3]

$$C = \frac{1}{4\pi \cdot f_m \cdot R_{VR}}, \quad L = \frac{R_{VR}}{\pi \cdot f_m}. \quad (2.8)$$

### Buterworth 3. řádu

Použitím filtru typu Butterworth třetího řádu (BW3) dosáhneme strmosti 12dB/okt. Fázový posun je pak 90° mezi kanály dvou filtrů typu horní a dolní propust na stejném kmitočtu. Mezní kmitočet je dán poklesem modulové kmitočtové charakteristiky na -3 dB. [3]

Výpočty hodnot prvků pro dolní pásmo:

$$C = \frac{2}{3\pi \cdot f_m \cdot R_{HR}}, \quad L_1 = \frac{3 \cdot R_{HR}}{4\pi \cdot f_m}, \quad L_2 = \frac{R_{HR}}{4\pi \cdot f_m}. \quad (2.9)$$

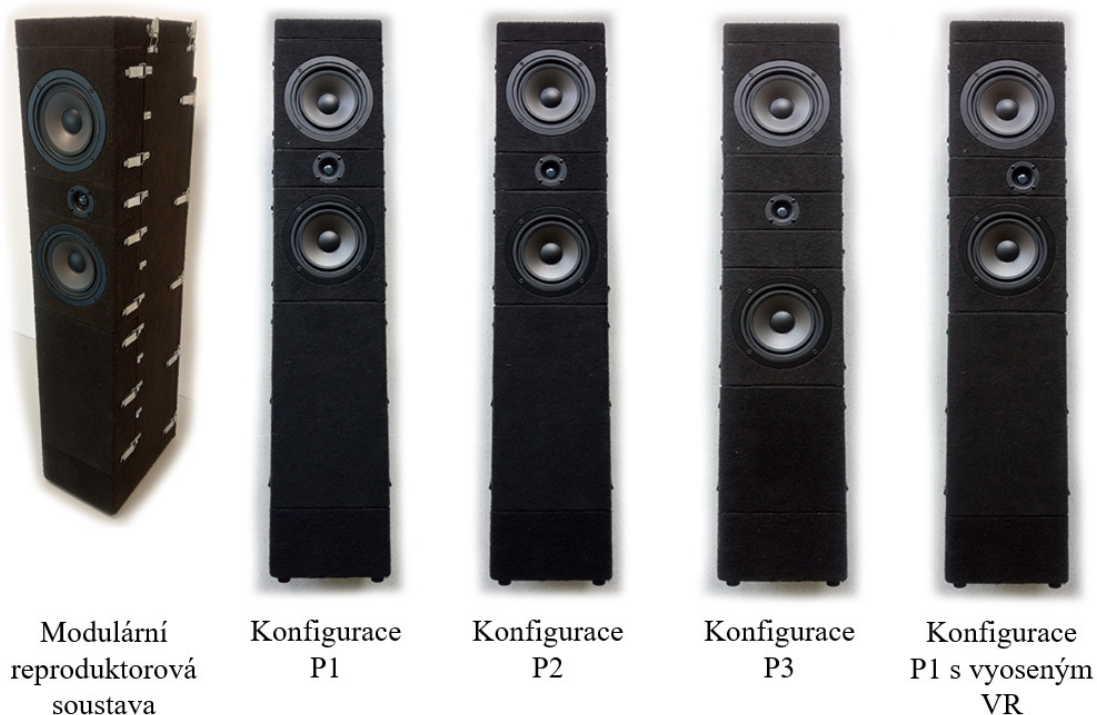
Pro horní pásmo jsou výpočty následující: [3]

$$C_1 = \frac{1}{3\pi \cdot f_m \cdot R_{VR}}, \quad C_2 = \frac{1}{\pi \cdot f_m \cdot R_{VR}}, \quad L = \frac{3 \cdot R_{VR}}{8\pi \cdot f_m}. \quad (2.10)$$

### 3 Modulární reproduktorová soustava pro testování konfigurace D'Appolito

Všechna měření v této práci byla provedena s použitím modulární reproduktorové soustavy, která umožňuje různé nastavení vzdálenosti jednotlivých reproduktorů jak od sebe navzájem, tak od hran ozvučnice. Tato ozvučnice je typu *transmission line*, avšak popis tohoto druhu ozvučnice je mimo rozsah této práce. Dále je dobré zmínit, že všechna měření byla provedena s tlumícím materiálem ve všech částech ozvučnice, jeho použití ale nemá zásadní vliv na měření provedená v této práci. Navržená kmitočtová výhybka byla externě připojena k této soustavě do signálové cesty, nebyla tedy uvnitř ozvučnice.

Pro účely této práce bylo vybráno několik konfigurací, na kterých je možné zkoumat vliv vzdáleností hlubokotónových reproduktorů (zkráceně HR) od sebe a zároveň vliv vyosení vysokotónového reproduktoru (zkratka VR) na charakteristikách soustavy. Tyto konfigurace jsou nazvány P1, P2 a P3 a popisují vzájemnou polohu HR. Tyto konfigurace pak mohly být měřeny buď s VR v geometrickém středu modulu a nebo mimo něj.



Obr. 3.1: Modulární reproduktorová soustava s různými konfiguracemi modulů

Na obrázku 3.1 je zobrazena modulární soustava a jednotlivé konfigurace P1 až P3. Dále je zde ukázáno použití modulu s vyoseným VR v konfiguraci P1.

V konfiguraci P1 mají HR mezi sebou nejmenší vzdálenost, kterou modulární soustava umožňuje. Hlubokotónové reproduktory nejsou v geometrickém středu modulu, ve kterém jsou umístěny, a tak jejich otočením vzniká nová konfigurace P2, kdy jsou od sebe vzdálenější než v konfiguraci P1. Největší vzdálenost mezi HR je pak v konfiguraci P3, kde je orientace HR stejná, jako v konfiguraci P1, avšak je mezi ně a VR ještě vložen jednotkový modul. Rozměry ozvučnice a vzdálenosti mezi jednotlivými reproduktory jsou pak v tabulce 3.1.

Tab. 3.1: Vzdálenosti mezi reproduktory a vzdálenosti reproduktorů od hran ozvučnice

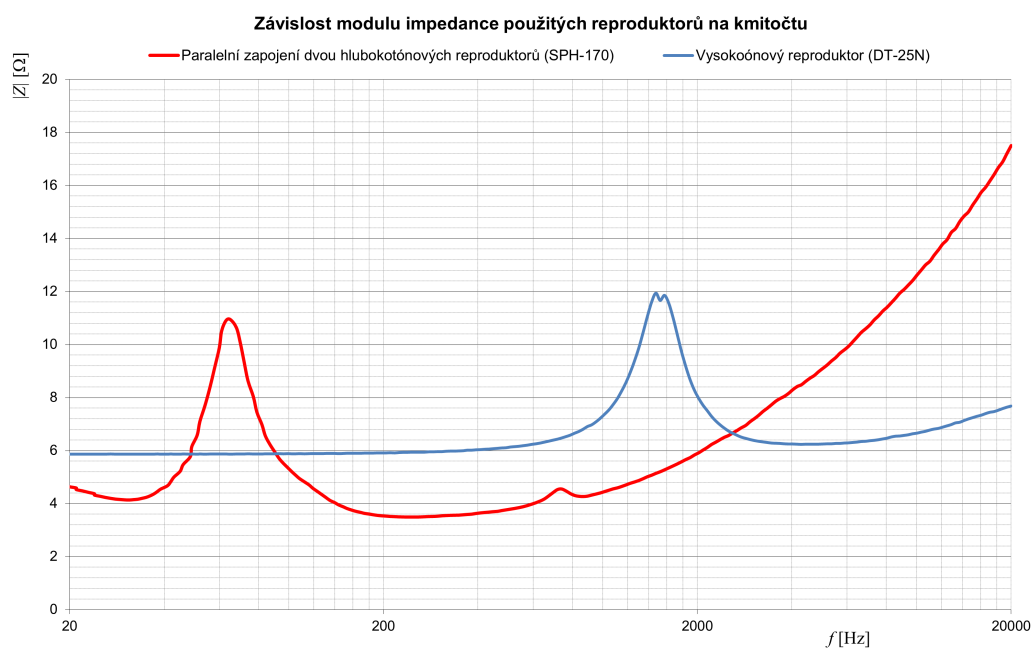
Vzdálenost (jednotky v mm)	P1	P2	P3	P1 (Vyosený VR)
Mezi HR	290	334	550	290
Mezi HR a VR	145	167	225	145
Vrchní HR od horní hrany	175	154	175	175
Spodní HR od spodní hrany	645	622	485	645
VR od svislých hran	112,5	112,5	112,5	150/80

## 4 Návrh a simulace výhybky pro konkrétní TL ozvučnici

Aby vůbec bylo možné začít s jakýmkoliv měřením reproduktorové soustavy jako celku, je nejprve nutné aby všechny její součásti fungovaly podle svých předpokladů. Proto bylo nezbytné nejprve navrhnout kmitočtovou výhybku pro konkrétní ozvučnici a reproduktory v ní použité.

Pro návrh kmitočtové výhybky a všech jejích obvodů bylo nejprve zapotřebí získat modulové kmitočtové charakteristiky a závislost impedance na kmitočtu jednotlivých reproduktorů měřené v konkrétní ozvučnici. Pak bylo možné začít s návrhem jednotlivých korekčních a kompenzačních obvodů.

První krok před návrhem jakýchkoliv obvodů je měření závislosti impedance na kmitočtu použitých reproduktorů. Impedance reproduktoru není na všech kmitočtech stejná a to by mělo zásadní vliv na chování kmitočtové výhybky. Impedanční charakteristika by tedy měla být co nejvyrovnanější, a to je důležité zejména v oblasti dělicího kmitočtu výhybky. [3]



Obr. 4.1: Závislost impedance použitých reproduktorů na kmitočtu

Na obrázku 4.1 jsou vidět dva průběhy hodnot impedance v závislosti na kmitočtu. Červený průběh znázorňuje závislost impedance na kmitočtu dvou paralelně zapojených hlubokotónových reproduktorů SPH-170 a modrý průběh byl změřen na

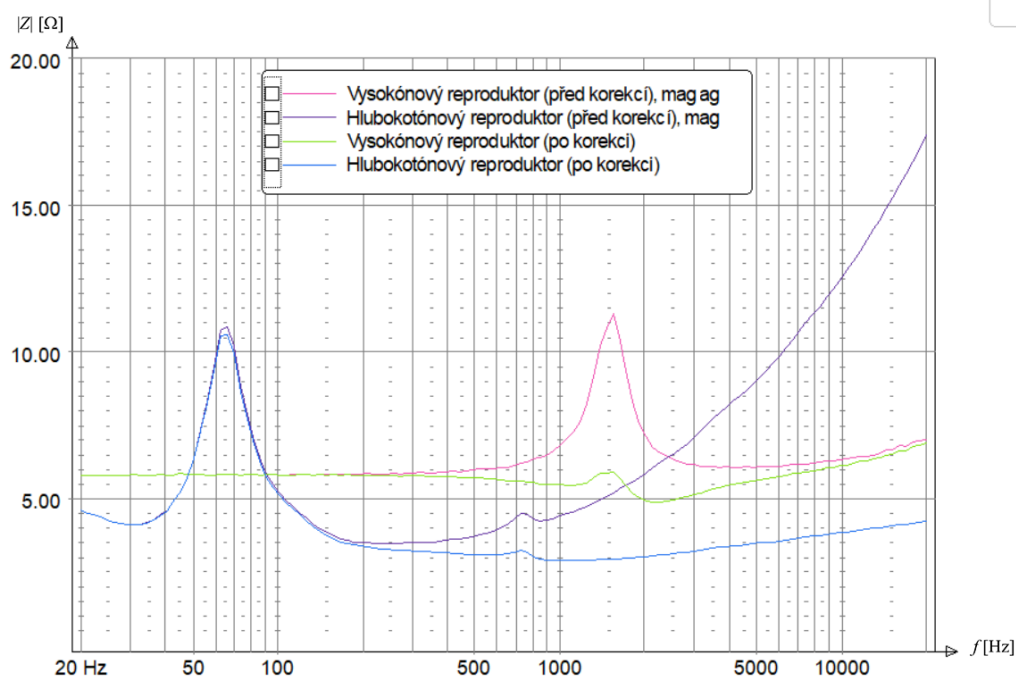
jednom vysokotónovém reproduktoru DT-25N. Jsou zde patrné rezonance na jednom kmitočtu a následného růstu impedance k vyšším kmitočtům za touto rezonancí.

## 4.1 Návrh kompenzací impedance charakteristiky

Aby impedance reproduktorů byla v jejich užitečném pásmu konstantní s hodnotou jejich jmenovité impedance, bylo nutné navrhnout obvody kompenzace těchto charakteristik.

U hlubokotónových reproduktorů byla kompenzována indukčnost kmitající cívky, tedy narůst impedance na vyšších kmitočtech, použitím Zobelova filtru, což jak již bylo zmíněno je sériový RC článek paralelně připojený k reproduktoru. Hodnoty součástek tohoto filtru byly nejprve vypočteny podle rovnice 2.1, v pozdějších fázích měření byly ovšem tyto hodnoty empiricky pozměněny v závislosti na výsledných charakteristikách změřených s prvotní verzí kmitočtové výhybky.

Kompenzace impedance charakteristiky vysokotónového reproduktoru spočívala v potlačení nárůstu impedance na rezonančním kmitočtu. Toto potlačení bylo dosaženo použitím antirezonančního filtru, který je tvořen sériovým RLC obvodem, paralelně připojeným k reproduktoru. Hodnoty prvků tohoto obvodu byly vypočteny podle rovnice 2.2.



Obr. 4.2: Závislost impedance použitých reproduktorů na kmitočtu před a po korekci

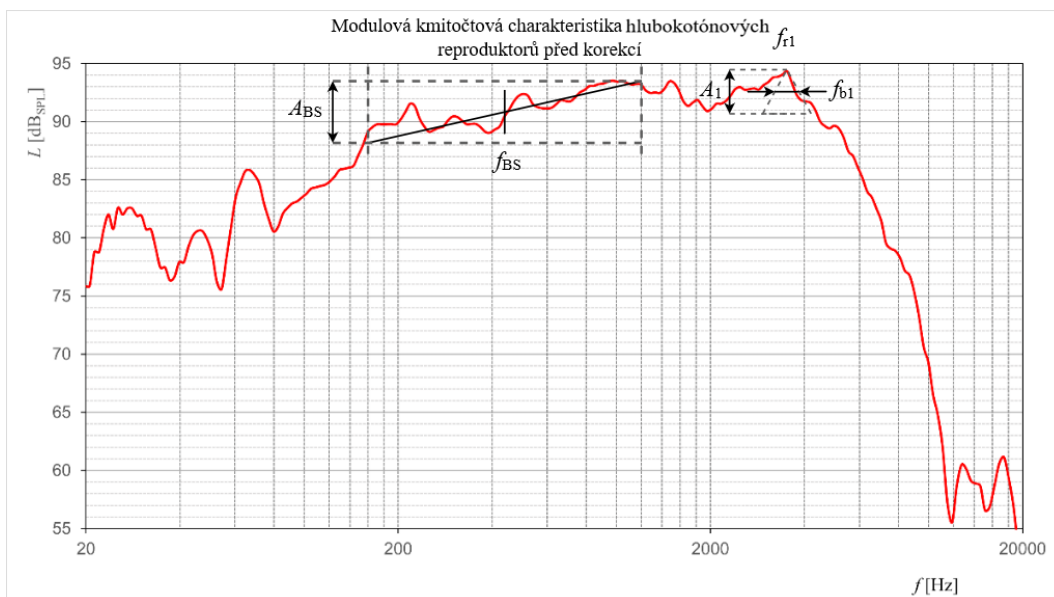
Obrázek 4.2 znázorňuje graf se čtyřmi průběhy závislosti impedance na kmitočtu

použitých reproduktorů. Fialovou a modrou křivkou je značen průběh impedance dvou paralelně zapojených hlubokotónových reproduktorů před a po kompenzaci. Červená a zelená křivka potom znázorňuje průběh impedance vysokotónového reproduktoru.

## 4.2 Měření reproduktorů v jednotlivých pásmech

Ke správnému návrhu kmitočtové výhybky je dále zapotřebí znát modulové kmitočtové charakteristiky dílčích reproduktorů. Pro věrnou reprodukci zvuku reproduktorové soustavy je důležité, aby samotná kmitočtová charakteristika dílčích reproduktorů byla co nejvyrovnanější, proto je před návrhem samotných obvodů výhybky potřeba navrhnout korekční a kompenzační obvody pro jednotlivé reproduktory a dosáhnout tak vyrovnanějších charakteristik samotných reproduktorů.

Na obrázku 4.3 je graf průběhu modulové kmitočtové charakteristiky hlubokotónových reproduktorů. Jsou zde označeny dva artefakty mající negativní vliv na modulovou kmitočtovou charakteristiku reproduktorů, a které byly korigovány.



Obr. 4.3: Modulová kmitočtová charakteristika hlubokotónových reproduktorů před korekcí

Pokles citlivosti mezi kmitočty 160 a 1200 Hz, neboli baffle-step, je zapříčiněn rozměry ozvučnice. Pro korekci tohoto artefaktu bylo použito high shelving filtru (označeno jako BSC na obrázku schématu 4.6), který tvoří paralelní zapojení RL článku, připojeného do série s reproduktorem. Kmitočet inflexe  $f_{BS}$  byl nastaven na 450 Hz a přenos  $A_{BS}$  na -5 dB. Hodnoty prvků byly pro prvotní návrh výhybky

vypočteny podle vztahu 2.3, poté však byly opět empiricky měněny na základně průběžného měření.

Nárůst citlivosti na kmitočtu  $f_{r1}$  (3500 Hz) byl kompenzován antireznoančním filtrem tvořeným sériovým RLC článkem paralelně připojeným k reproduktoru (označen jako PARPF na obrázku schématu 4.6). Hodnota přenosu  $A_1$  byla nastavena na -3 dB. Hodnoty prvků byly vypočteny podle vztahu 2.6. S tímto filtrem výsledná kmitočtová charakteristika přirozeně klesá směrem k vyšším kmitočtům, což bylo přínosné pro další návrh obvodů výhybky, a to z důvodu, že se tento artefakt nachází na kmitočtu blízkém meznímu kmitočtu.

Rezonance a propady v kmitočtové charakteristice na kmitočtech nižších, než zhruba 80 Hz jsou zapříčiněny konečnými rozměry komory, ve které byla charakteristika měřena. V měřící komoře vzniká při nízkých kmitočtech stojaté vlnění, které zkresluje výsledky měření a tyto údaje tak pro návrh korekčních a kompenzačních obvodů nejsou relevantní. Pokud bychom chtěli zjistit skutečný průběh modulové kmitočtové charakteristiky na velmi nízkých kmitočtech, bylo by nutné změnit metodu měření.

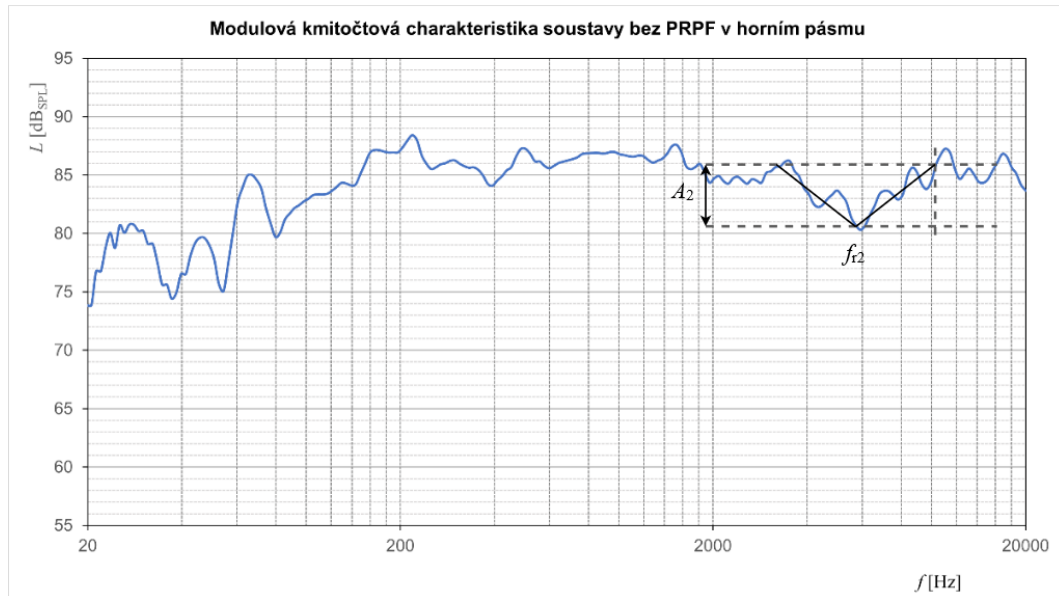


Obr. 4.4: Modulová kmitočtová charakteristika vysokotónového reproduktoru před korekcí

Vysokotónový reproduktor měl v původním návrhu výhybky pouze přizpůsobenou citlivost odporovým děličem, vytvořeného zapojením předřadného odporu, jelikož samotná charakteristika reproduktoru je poměrně vyrovnaná. Po změření kmitočtové charakteristiky celé soustavy byl ale zjištěn pokles citlivosti mezi kmitočty 3000 a 9000 Hz, jak je vidět na obrázku 4.5. Proto byl do horní větve přidán



rezonanční filtr, který je zapojen paralelně k reproduktoru a je tvořen sériovým spojením rezistoru a paralelního LC článku. Přenos tohoto filtru byl nastaven na -6 dB a hodnoty prvků byly nejprve vypočteny podle vztahu 2.5 a poté empiricky měněny v závislosti na změřených kmitočtových charakteristikách reproduktorové soustavy jako celku.

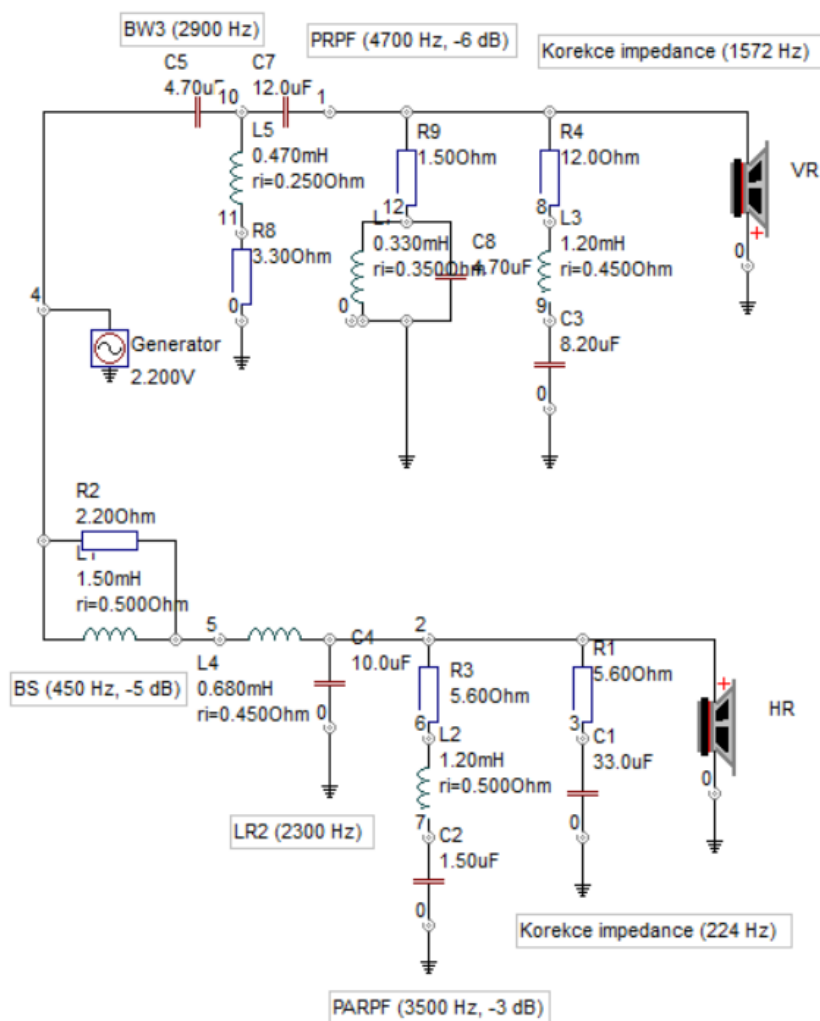


Obr. 4.5: Modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy před přidáním PRPF, měřeno v konfiguraci P1 s vyoseným VR a mikrofonem na středu modulu

V důsledku přidání rezonančního filtru do horního pásma byla citlivost reproduktoru značně snížena v celém užitečném pásmu, a tak byl úplně odebrán předřadný rezistor zajišťující širokopásmové přizpůsobení citlivosti. Toto ovšem není ideální krok při návrhu obvodů výhybky, jelikož výhybka nyní při vyšších kmitočtech funguje čistě jako proudový dělič a značná část energie vstupního signálu energie je přeměněna v teplo na rezistoru rezonančního kmitočtu, což by v některých případech mohlo mít i destruktivní následky na použitý rezistor.

#### 4.2.1 Návrh výhybky

Jedním z kritérií při návrhu výhybky bylo, aby na rezonančním kmitočtu vysokotónového reproduktoru (1500 Hz) byl již značný pokles modulu kmitočtové charakteristiky. Dalším kritériem bylo, aby výsledný reálný mezní kmitočet nebyl příliš vysoký, protože při vyšších kmitočtech začíná být hlubokotónový reproduktor značně směrový. Ideální reálný mezní kmitočet byl tak uvažován v okolí kmitočtu asi 2500 Hz.



Obr. 4.6: Schéma zapojení kmitočtové výhybky vytvořené v simulačním programu LspCAD

### Kmitočtová výhybka pro dolní pásmo

V dolním pásmu je pro obvod kmitočtové výhybky použit filtr typu Linkwitz-Riley druhého řádu, jehož mezní kmitočet byl nastaven na 2300 Hz, kde by tedy měl být pokles o 6 dB. Hodnoty součástek byly vypočteny podle vztahu 2.7. Mezní kmitočty obou filtrů jak pro dolní, tak pro horní propust nejsou stejné. Hodnota mezního kmitočtu byla záměrně vybrána nižší než požadovaný reálný mezní kmitočet. Z důvodu rozdílných fázových charakteristik obou pásem by tak v okolí mezního kmitočtu vznikalo nežádoucí zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky reproduktorové soustavy, a tak byla výhybka takto záměrně rozladěna.

## **Kmitočtová výhybka pro horní pásmo**

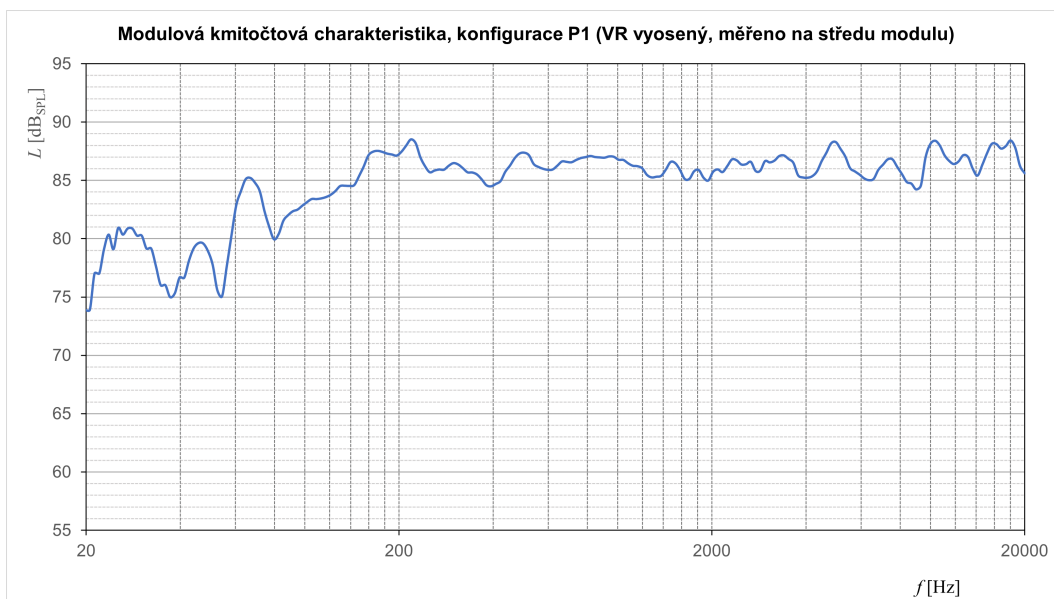
Pro horní pásmo byl použit filtr typu Butterworth třetího řádu, jehož mezní kmitočet byl uvažován na 2900 Hz. Tak bylo dosaženo poklesu o 12 dB na rezonančním kmitočtu vysokotónového reproduktoru. V původním návrhu výhybky bylo použito filtru typu Linkwitz-Riley druhého řádu. Po prvotním měření bylo ale zjištěno, že z důvodu rozdílných fází signálu mezi jednotlivými reproduktory vznikal pokles modulové kmitočtové charakteristiky soustavy v okolí kmitočtu 6000 Hz. Z tohoto důvodu byl nakonec použit filtr typu Butterworth třetího řádu, jehož strmost byla ještě upravena přidáním rezistoru do série s cívkou, takže výsledný průběh filtru je podobný filtru typu Linkwitz-Riley druhého řádu, ale ve fázové charakteristice je v okolí mezního kmitočtu rozdíl fáze zhruba  $130^\circ$  mezi jednotlivými výstupy výhybky. Touto změnou fázové charakteristiky horního pásma byl propadem v okolí kmitočtu 6000 Hz zmírněn. Tento pokles nakonec úplně vyřešilo přidání již zmíněného rezonančního filtru do horního pásma. Prvotní hodnoty součástí byly vypočteny podle vztahu 2.10 a poté upraveny na základě výsledných měření.



## 5 Měření charakteristik reproduktorové soustavy

První důležitý výsledek měření reproduktorové soustavy jako celku byla modulová kmitočtová charakteristika měřená v referenční ose soustavy ve vzdálenosti jednoho metru. Pro měření této charakteristiky bylo vybráno specifické místo v měřicí komoře, kde měl vznik stojatých vlnění nejmenší vliv na průběh kmitočtové charakteristiky. Obecně by charakteristika měřená v referenční ose reproduktorové soustavy měla být co nejvyrovnanější, což je základ věrné reprodukce zvukového signálu.

Na obrázku 5.1 je vidět změřená modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy v konfiguraci P1 s vyoseným vysokotónovým reproduktorem a mikrofonom umístěným v geometrické ose modulu vysokotónového reproduktoru. Výsledné hodnoty akustického tlaku se pohybují v okolí 86,5 dB<sub>SPL</sub> a splňují toleranční pásmo  $\pm 2$  dB na kmitočtech vyšších, než asi 140 Hz. Tato konfigurace se ukázala jako obecně nejlepší i u jiných měření, proto jsou v této práci zobrazovány primárně charakteristiky této konfigurace.



Obr. 5.1: Modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy s konfigurací P1, vyoseným VR měřena na středu modulu

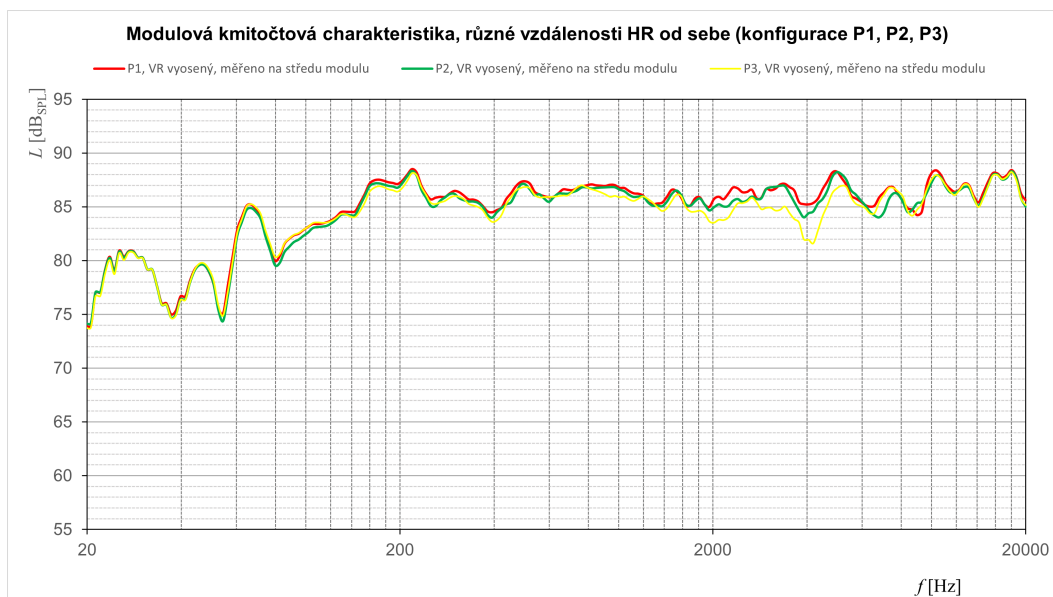
### 5.1 Porovnání měření v referenční ose

Měření v referenční ose bylo provedeno pro několik konfigurací modulární ozvučnice. Tak bylo možné zjistit, jaký má vliv různá vzdálenost hlubokotónových reproduktorů

torů od sebe a zároveň vliv polohy vysokotónového reproduktoru vzhledem k vertikální geometrické ose přední stěny ozvučnice. Všechna tato měření byla provedena ve vzdálenosti jednoho metru. Měření bylo značné množství a pro svůj rozsah nebyla zahrnuta v této práci. Tak bylo vybráno jen několik zajímavých měření s největšími rozdíly. Všechny výsledky lze nalézt v příloze (*BP\_Docekal\_přiloha > Měření soustavy > Měření on-axis*).

### 5.1.1 Vliv vzdálenosti hlubokotónových reproduktorů od sebe

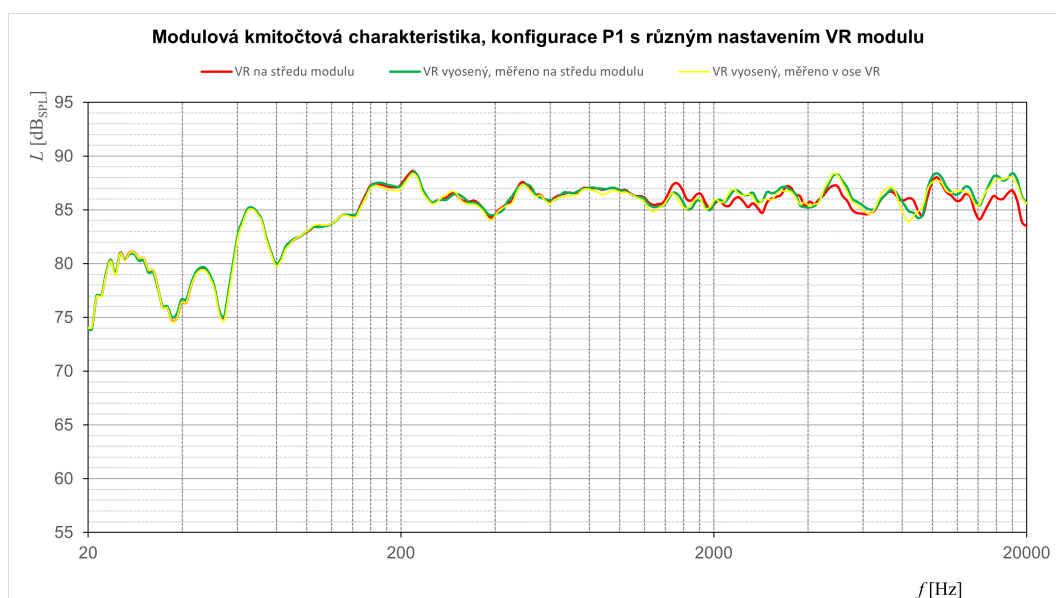
Postupným měřením modulové kmitočtové charakteristiky v referenční ose reproduktorové soustavy byly zjištěny tři průběhy této charakteristiky. Na obrázku 5.2 jsou všechny tyto tři průběhy zobrazeny v jednom grafu aby bylo možné snadno pozorovat jejich rozdíly. Je zde tak patrné, že změna vzdálenosti hlubokotónových reproduktorů má největší vliv na kmitočty mezi 1600 Hz a 8000 Hz. Měření samotných reproduktorů bylo zjištěno, že změna vzdálenosti hlubokotónových reproduktorů má totožný vliv i na charakteristiky samotného vysokotónového reproduktoru a tyto rozdíly se pak promítají i na výslednou charakteristiku celkové soustavy.



Obr. 5.2: Modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy s konfigurací P1, P2 a P3 s vyoseným vysokotónovým reproduktorem a mikrofonom měřena v geometrické ose modulu vysokotónového reproduktoru ve vzdálenosti jednoho metru

## 5.1.2 Vliv vyosení vysokotónového reproduktoru

Dále byl zkoumán i vliv posunu vysokotónového reproduktoru od geometrické osy modulu. Tato měření byla provedena pro všechny konfigurace, ale pro jejich velké množství je zde uveden příklad konfigurace P1, která měla obecně nejlepší výsledky. Modulová kmitočtová charakteristika soustavy byla tak změřena s vysokotónovým reproduktorem v geometrické ose modulu a poté s reproduktorem mimo tuto osu. V případě vyoseného modulu byla provedena dvě měření. Nejdříve byl mikrofon umístěn v geometrické ose modulu a poté v referenční ose vysokotónového reproduktoru. Lze zde pozorovat, že rozdíly mezi jednotlivými konfiguracemi v kmitočtové charakteristice nepřesahují ani 1 dB mimo kmitočty nad zhruba 14 000 Hz. Dá se říci, že měření s vyoseným vysokotónovým reproduktorem se mezi sebou prakticky neliší a poloha mikrofonu tak nemá žádný zásadní vliv na tuto charakteristiku.



Obr. 5.3: Modulová kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy s konfigurací P1 měřená s vysokotónovým reproduktorem v geometrické ose modulu, vyoseným reproduktorem a mikrofonem v geometrické ose modulu reproduktoru a vyoseným reproduktorem s mikrofonem v referenční ose reproduktoru e vzdálenosti jednoho metru

## 5.2 Měření směrové charakteristiky

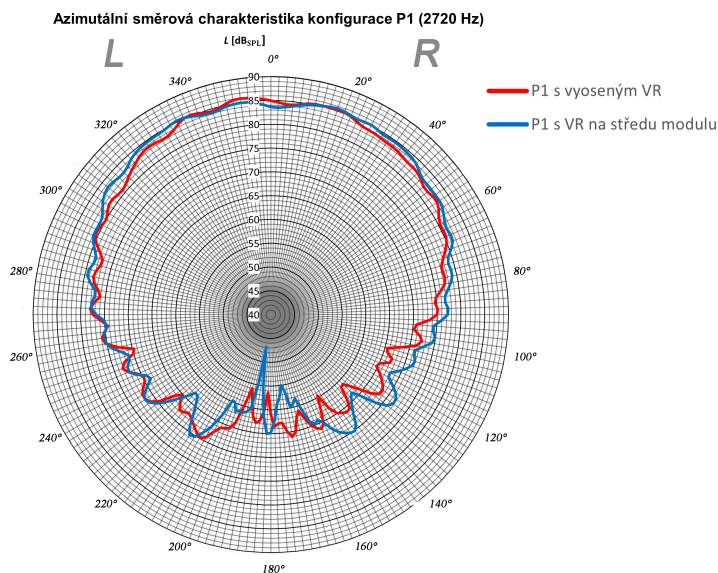
Směrové charakteristiky byly zásadní pro ověření principu uspořádání D'Appolito. Tak bylo provedeno několik měření reproduktorové soustavy a to jak v elevaci, tak v azimutu. Nejzajímavější měření je ovšem právě v elevaci, kde se projevuje symetrické

uspořádání dvou hlubokotónových reproduktorů pod a nad vysokotónovým reproduktorem na výsledné charakteristiky. Měření proběhlo s mikrofonem ve vzdálenosti jednoho metru od referenčního bodu soustavy nebo geometrického středu modulu s vysokotónovým reproduktorem. .

### 5.2.1 Měření azimutální směrové charakteristiky

Tato měření probíhala se soustavou stojící vertikálně na zemi a s mikrofonem rotujícím v horizontální rovině okolo ní. Tak byly získány výsledky azimutální směrové charakteristiky. Těchto měření bylo provedeno několik pro různé konfigurace a na různých kmitočtech. Azimutální směrové charakteristiky měly především ukázat vliv použití modulu s vyoseným vysokotónovým reproduktorem oproti modulu s reproduktorem v geometrickém středu. Měření na dalších kmitočtech a pro různé konfigurace lze nalézt v příloze (*BP\_Docekal\_priloha > Měření soustavy > Měření směrových charakteristik > Měření v azimutu*).

Na obrázku 5.4 je porovnání azimutálních směrových charakteristik konfigurace P1 pro dva různé moduly s vysokotónovým reproduktorem měřených na mezním kmitočtu 2720, kde hrají všechny reproduktory současně. Je zde vidět, že jsou oba průběhy velmi podobné. Největší rozdíly jsou při odklonu asi  $-50^\circ$  od geometrické osy soustavy.



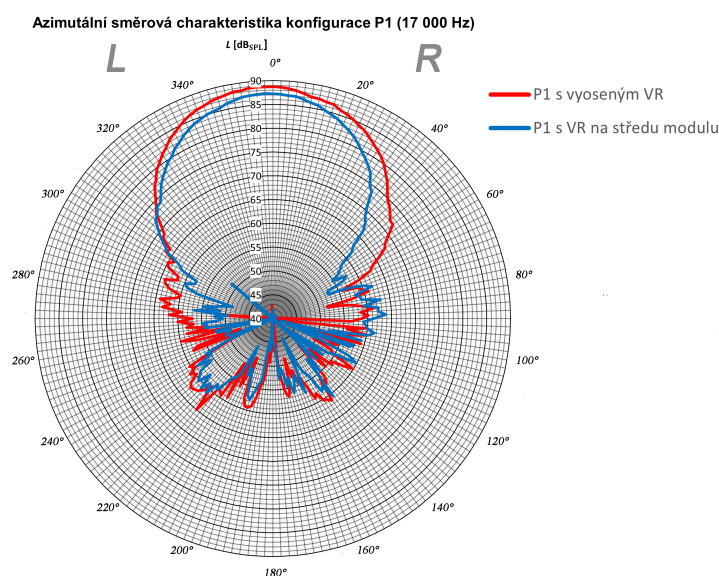
Obr. 5.4: Azimutální směrová charakteristika konfigurace P1 s VR na středu modulu a vyoseným VR (pohled shora), měřeno na mezním kmitočtu 2720 Hz

Na obrázku 5.5 je pak graf směrové charakteristiky měřený na kmitočtu 17 000 Hz, kde už funguje pouze vysokotónový reproduktor. Zde jsou velmi překvapující



výsledky, protože vyosený vysokotónový reproduktor má směrovou charakteristiku více souměrnou podle geometrické osou soustavy, než reproduktor umístěn v ose soustavy, který má svoji charakteristiku nakloněnou. Výsledky by totiž podle teoretických předpokladů měli vycházet obráceně. Tento jev se objevuje u všech měřených konfigurací. Výsledky měření byly zpětně překontrolovány, ale pro důkladnější přezkoumání této anomálie by bylo třeba provést další měření, s různou orientací reproduktorů.

V obou případech lze ale tvrdit, že je zde reproduktor už velice směrový a v odklonu zhruba  $\pm 22^\circ$  už má charakteristika pro vyosený reproduktor pokles -6 dB a pro reproduktor na středu modulu dokonce -8 dB.



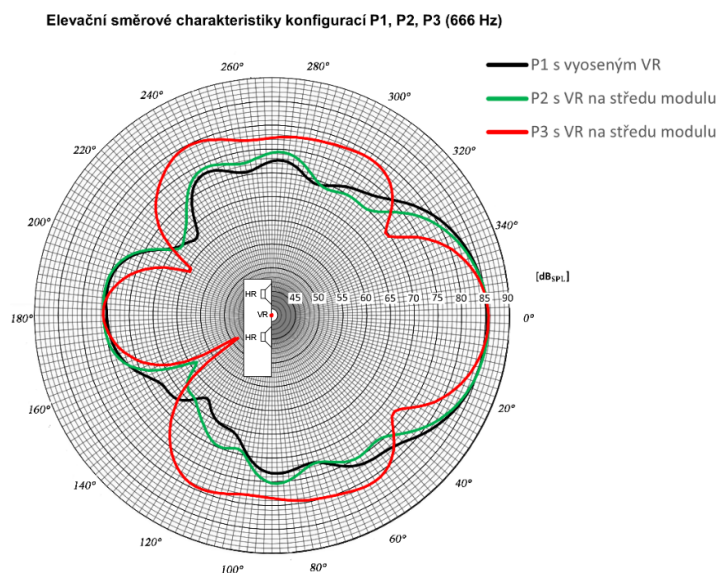
Obr. 5.5: Azimutální směrová charakteristika konfigurace P1 s VR na středu modulu a vyoseným VR (pohled shora), měřeno na kmitočtu 17 000 Hz

## 5.2.2 Měření elevační směrové charakteristiky

O něco zajímavější výsledky přineslo měření v elevaci. To probíhalo podobným způsobem jako měření v azimutu, avšak reproduktorová soustava byla v horizontální poloze na stojanech. Mikrofon byl opět umístěn ve vzdálenosti jednoho metru od geometrického středu mezi hlubokotónovými reproduktory. Mikrofon se postupně otáčel v horizontální rovině okolo soustavy. Ve výsledných charakteristikách lze sledovat funkci uspořádání D'Appolito, ale také negativní vliv použití dvou hlubokotónových reproduktorů. Všechny směrové charakteristiky mají na všech kmitočtech hlavní lalok v referenční ose soustavy a nedochází k žádným odklonům. Interferenci

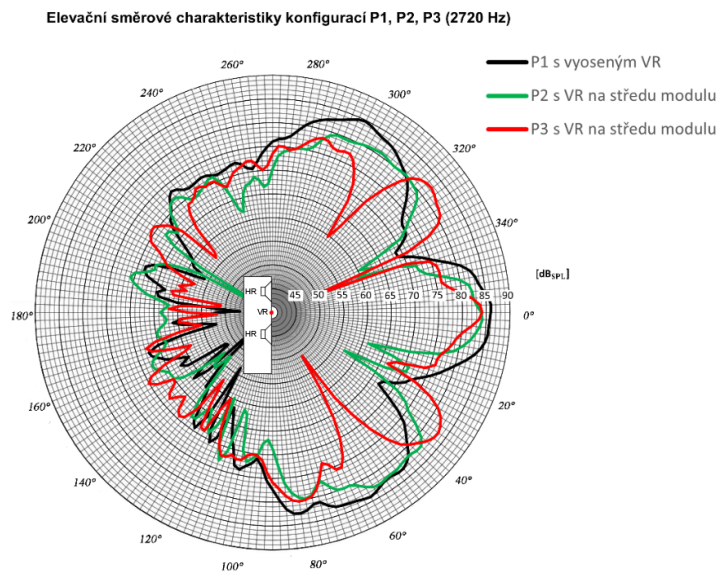
dvou hlubokotónových reproduktorů ovšem vznikají negativní interference na nižších kmitočtech. Nejnižší kmitočet, na kterém bylo měření provedeno je 250 Hz a směrové charakteristiky všech konfigurací jsou zde prakticky kulové. Pokud jsou u sebe reproduktory blíže, než je  $\frac{1}{4}$  vlnové délky daného kmitočtu, nemá použití dvou primárních zdrojů vlnění žádný zásadní vliv na směrovou charakteristiku. Toto měření a několik dalších pro různé konfigurace a různé kmitočty jsou dostupné v příloze této práce (*BP\_Docekal\_priloha > Měření soustavy > Měření směrových charakteristik > Měření v elevaci*).

První zobrazení průběhů je na obrázku 5.6. Kmitočet 666 Hz je relativně nízký a tak je většina výkonu vyzářena hlubokotónovými reproduktory. Zde už vznikají interference, které se projevují na výsledné směrové charakteristice jako už značné poklesy citlivosti nad úhlem odklonu  $\pm 40^\circ$ . U konfigurace P3 už přímo vznikají nové laloky s největším propadem právě na těchto úhlech odklonu.

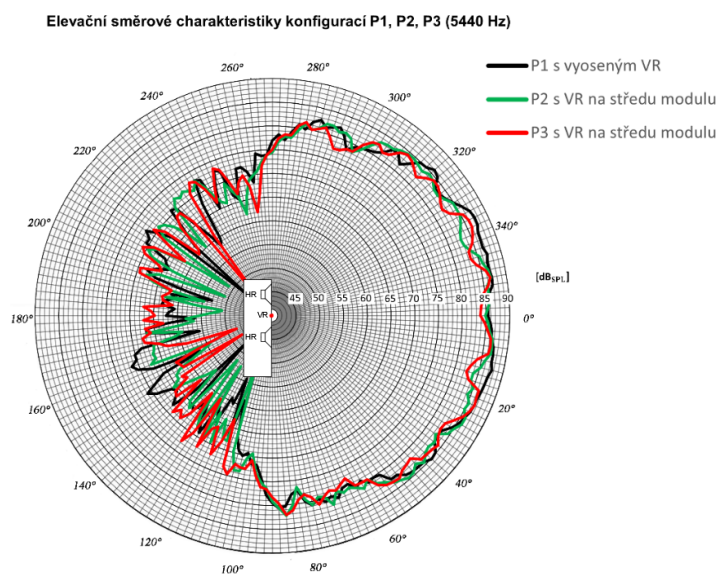


Obr. 5.6: Elevační směrová charakteristika konfigurací P1 s vyoseným VR a P2 a P3 s VR na středu modulu (s naznačením orientace reproduktorové soustavy), měřeno na kmitočtu 666 Hz

V grafu na obrázku 5.7 jsou vidět průběhy směrové charakteristiky změřené na mezním kmitočtu 2720 Hz. Zde už mezi sebou neinterferují pouze vlnění ze hlubokotónových reproduktorů, ale k tomu ještě vlnění z vysokotónového reproduktoru. Hlavní laloky v těchto charakteristikách jsou velmi úzké a největší propady jsou na úhlech  $\pm 20^\circ$ . Toto je velmi špatný výsledek, protože už při malém úhlu odklonu od referenční osy soustavy vzniká značné zkreslení signálu.



Obr. 5.7: Elevační směrová charakteristika konfigurací P1 s vyoseným VR a P2 a P3 s VR na středu modulu (s naznačením orientace reproduktorové soustavy), měřeno na mezním kmitočtu 2720 Hz

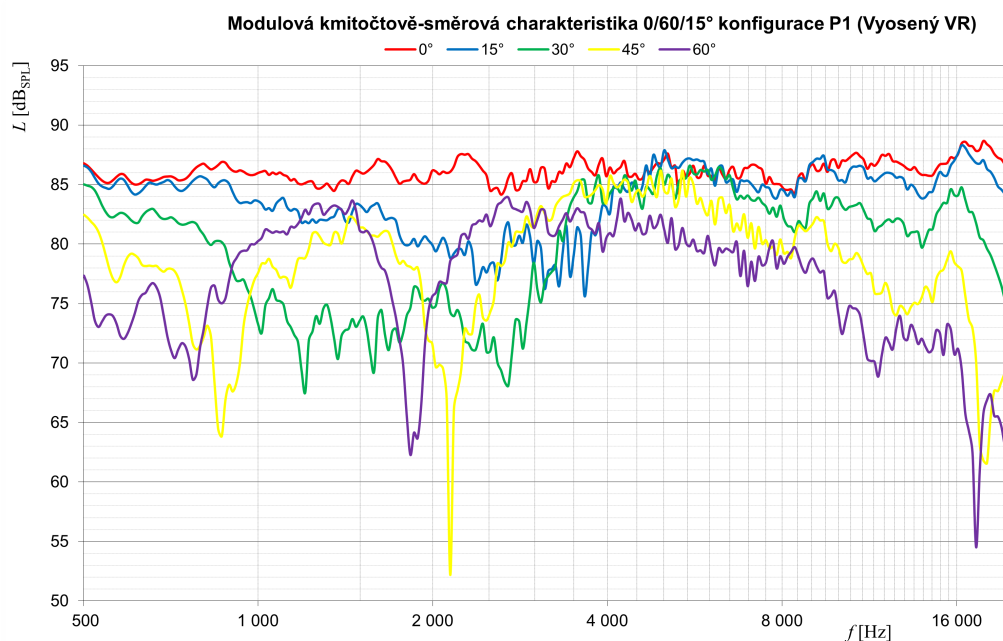


Obr. 5.8: Elevační směrová charakteristika konfigurací P1 s vyoseným VR a P2 a P3 s VR na středu modulu (s naznačením orientace reproduktorové soustavy), měřeno na kmitočtu 5440 Hz

Při kmitočtu 5440 Hz je na obrázku 5.8 vidět, že mezi jednotlivými konfiguracemi nejsou větší rozdíly. Na tomto kmitočtu už funguje převážně samotný vysokotónový reproduktor, a tak zde posun hlubokotónových reproduktorů nemá vliv.

### 5.3 Měření kmitočtově-směrové charakteristiky

Měření kmitočtově-směrové charakteristiky bylo pro tuto práci jedno z nejvíce přínosných. Ukazuje průběh modulové kmitočtové charakteristiky na různých úhlech odklonu od geometrické osy reproduktorové soustavy. Měření probíhalo podobně jako u směrových charakteristik, takže byl mikrofon umístěn ve fixní vzdálenosti jednoho metru od geometrického středu mezi hlubokotónovými reproduktory a postupně se po určitých krocích otáčel okolo reproduktorové soustavy. Tato měření byla provedena pro několik konfigurací v elevaci a zároveň pro konfiguraci P1 s vyoseným reproduktorem v azimutu. Azimutální kmitočtově-směrová charakteristika má podobnou charakteristiku jako u konvenční dvoupásmové reproduktorové soustavy a není nutné ji zahrnovat do této práce. Všechna měření jsou dostupná v příloze této práce (*BP\_Docekal\_priloha > Měření soustavy > Měření kmitočtově-směrových charakteristik*). Je důležité poznamenat, že průběhy změřené v úhlu 0° se neshodují s průběhy měřenými speciálně v referenční ose soustavy (on-axis). To je dáno faktem, že měření probíhala na dvou různých místech v měřicí komoře, takže výsledky ovlivnilo zejména stojaté vlnění v komoře.



Obr. 5.9: Elevační kmitočtově-směrová charakteristika konfigurace P1 s vyoseným VR, měřeno mezi úhly 0° a 60° (kroku 15°)

Na obrázku 5.9 je zobrazena kmitočtově směrová charakteristika konfigurace P1 s vyoseným vysokotónovým reproduktorem, která měla obecně nejlepší výsledky u jiných měření. Co je zde důležité je značné zvlnění charakteristiky, a to už při

odklonu  $15^\circ$ , kde vznikají propady až zhruba  $-7$  dB. Při odklonu  $30^\circ$  je zde už známý širokopásmový útlum mezi kmitočty 1000 Hz a 3000 Hz a to až  $-17$  dB. U vyšších úhlech odklonu už dosahují poklesy modulové charakteristiky ještě vyšších hodnot.

Z průběhů kmitočtově-směrových a směrových charakteristik lze říci, že uspořádání D'Appolito eliminuje problém naklánění hlavního laloku elevační směrové charakteristiky, který jinak vzniká u konvenční dvoupásmové reproduktorové soustavy. Použití dvou hlubokotónových reproduktorů ovšem přináší jiný negativní vliv na tyto charakteristiky. Hlavní lalok je sice na všech kmitočtech souměrný podle referenční osy soustavy, je ale velmi úzký a už na odklonu  $15^\circ$  od osy vzniká velké zkreslení výsledného signálu. Při vertikální orientaci soustavy by tak ideálně mělo být zajištěno, aby byli posluchači na úrovni referenční osy soustavy, kde je kmitočtová charakteristika nejvyrovnanější. Použití tohoto typu soustavy v horizontální orientaci bych pak nedoporučoval právě z důvodu velkého zkreslení signálu již při nízkém úhlu odklonu od osy soustavy.



## Závěr

V této práci jsem se seznámil s teorií reproduktorové soustavy, reproduktorů ozvučnice, měření směrových charakteristik, a také s teorií návrhu kmitočtových výhybek. Poté jsem se seznámil s modulární reproduktorovou soustavou pro testování konfigurace D'Appolito a provedl měření samotných reproduktorů v ozvučnici.

Se změřenými parametry reproduktorů jsem mohl pokračovat návrhem kmitočtové výhybky, s úmyslem dosažení co nejvyrovnanější kmitočtové charakteristiky v referenční ose soustavy, která byla zvolena jako geometrický střed mezi jednotlivými HR. Nejdříve jsem navrhl obvody kompenzace průběhu závislosti impedance na kmitočtu, poté obvody korekcí a kompenzací kmitočtových charakteristik jednotlivých reproduktorů. V poslední fázi jsem navrhl filtry propustí pro horní a dolní pásmo, kde bylo třeba několikrát změnit parametry a typ filtrů, aby nakonec bylo dosaženo mezního kmitočtu v okolí 2500 Hz a zároveň vyrovnané kmitočtové charakteristiky.

Následné měření azimutálních charakteristik dopadlo podle očekávání a soustava má zde podobné charakteristiky jako konvenční dvoupásmová reproduktorová soustava. S rostoucím kmitočtem se zužuje hlavní lalok azimutální směrové charakteristiky. Elevační směrová charakteristika se oproti azimutové směrové charakteristice na různých kmitočtech značně mění a nelze tak na základě pouze těchto měření určit, která konfigurace modulární reproduktorové soustavy je nejlepší.

Až teprve po změření kmitočtově-směrových charakteristik jsem mohl zjistit, jaká soustava má mimo svoji referenční osu nejlepší vlastnosti. Tak se ukázala konfigurace P1 s vyoseným vysokotónovým reproduktorem jako nejlepší. Takový výsledek jsem předpokládal, protože teorie říká, že čím jsou reproduktory blíže u sebe, tím jsou výsledné vlastnosti soustavy lepší a zároveň pokud jsou vzdálenosti od hran ozvučnice různé, měly by opět být výsledné charakteristiky reproduktorové soustavy lepší. Tato konfigurace splňuje oba předpoklady nejlépe ze všech ostatních konfigurací.

Měření, která jsem provedl v této práci ukázala dvě základní vlastnosti reproduktorové soustavy s uspořádáním D'Appolito. První je, že elevační směrová charakteristika je opravdu na všech kmitočtech souměrná podle referenční osy soustavy a nevzniká tak problém odklonu referenční osy v přechodovém pásmu kmitočtové výhybky. Druhou a negativní vlastností je fakt, že reproduktorová soustava s uspořádáním D'Appolito značně zkresluje vstupní signál mimo referenční osu této soustavy a to už na nízkých úhlech odklonu od této osy. Navíc je hlavní lalok v elevační směrové charakteristice velmi úzký, takže by musel být případný posluchač v úrovni referenční osy soustavy v případě, že by stála vertikálně na zemi. Pokud by ovšem byla orientace reproduktorové soustavy horizontální, její použití by nepřinášelo žádné výhody, protože už s malým odklonem od osy bude výsledný signál značně zkreslen.





# Literatura

- [1] SCHIMMEL, Jiří. Elektroakustika - skriptá. VUT v Brně FEKT UTKO, 2013 [cit. 2022-12-27]. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [2] MELLOR, Nyal. Speaker directivity / off axis response: theory and measurement techniques. Acoustic Frontiers LLC [online]. 7.12.2013 [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://acousticfrontiers.com/blogs/articles/speaker-directivity-off-axis-response-theory-and-measurement-techniques>
- [3] BALÍK, Miroslav. Reproduktorové soustavy - přednáška č. 3 [online]. VUT v Brně FEKT [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/386699/mod\\_resource/content/2/P03%20-%20Vliv%20tvaru%20ozvu%C4%8Dnice%2C%20%C3%BAvod%20ke%20kmito%C4%8Dtov%C3%BDm%20v%C3%BDhybk%C3%A1m%20-%20pracovn%C3%AD%20verze.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/386699/mod_resource/content/2/P03%20-%20Vliv%20tvaru%20ozvu%C4%8Dnice%2C%20%C3%BAvod%20ke%20kmito%C4%8Dtov%C3%BDm%20v%C3%BDhybk%C3%A1m%20-%20pracovn%C3%AD%20verze.pdf)
- [4] BALÍK, Miroslav. Reproduktorové soustavy - přednáška č. 4 [online]. VUT v Brně FEKT [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/416976/mod\\_resource/content/1/P04%20-%20Kmito%C4%8Dtov%C3%A9%20filtry%20s%20RC%2C%20RL%2C%20LC%20a%20RLC%20obvody%20-%20pracovn%C3%AD%20verze.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/416976/mod_resource/content/1/P04%20-%20Kmito%C4%8Dtov%C3%A9%20filtry%20s%20RC%2C%20RL%2C%20LC%20a%20RLC%20obvody%20-%20pracovn%C3%AD%20verze.pdf)
- [5] BALÍK, Miroslav. Reproduktorové soustavy - LABORATORNÍ ÚLOHA č. 3 [online]. VUT v Brně FEKT [cit. 2023-01-15]. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/386710/mod\\_resource/content/5/L03%20-%20N%C3%A1vrh%20kmito%C4%8Dtov%C3%A9%20v%C3%BDhybky%2C%20korek%C4%8Dn%C3%ADch%20a%20kompenza%C4%8Dn%C3%ADch%20obvod%C5%AF%20pro.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/386710/mod_resource/content/5/L03%20-%20N%C3%A1vrh%20kmito%C4%8Dtov%C3%A9%20v%C3%BDhybky%2C%20korek%C4%8Dn%C3%ADch%20a%20kompenza%C4%8Dn%C3%ADch%20obvod%C5%AF%20pro.pdf)
- [6] ELLIOTT, Rod. Baffle Step Compensation. Elliott Sound Products [online]. 2001 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://sound-au.com/bafflestep.htm>
- [7] D'APPOLITO, Joseph A. A GEOMETRIC APPROACH TO ELIMINATING LOBING ERROR IN MULTIWAY LOUDSPEAKERS. New York, 12.8.1983 [cit. 2023-04-16].
- [8] KONAR, MITHAT. Vertically Symmetric Two-Way Loudspeaker Arrays Reconsidered. Biro Technology [online]. 1995 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <http://www.birotechnology.com/articles/VSTWLA.html>



## Seznam symbolů a zkratek

<b>VR</b>	vysokotónový reproduktor
<b>HR</b>	hlubokotónový reproduktor
<b>PRPF</b>	pasivní rezonanční peak filtr
<b>PARPF</b>	pasivní antirezonanční peak filtr
<b>BSC</b>	korekce baffle-step (baffle-step correction)
<b>LR2</b>	filtr typu Linkwitz-Riley druhého řádu
<b>BW3</b>	filtr typu Butterworth třetího řádu
<b>R</b>	pravá strana při pohledu shora (right)
<b>L</b>	levá strana při pohledu shora (left)
	korekce baffle-step - baffle-step correction
<i>kD</i>	bezrozměrné číslo značící podíl obvodu membrány s vlnovou délkou
<i>f</i>	frekvence
<i>A</i>	velikost přenosu filtru v nepropustném pásmu
<i>L</i>	hladina akustického tlaku
<i>Z</i>	impedance reproduktoru