

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vliv různých typů ozvučnic na parametry kytarového
reproduktoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav VANC**

Osobní číslo: **E14B0125P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Vliv různých typů ozvučnic na parametry kytarového reproduktoru**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte používaná řešení ozvučnic pro kytarové reproduktory.
2. Zvolte důležité parametry reprosoustav, podle kterých bude posuzována vhodnost konstrukce.
3. Vybrané parametry změřte a zhodnoťte vhodnost konstrukce.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Stavíme reproduktorové soustavy, Sýkora Bohumil, A-Radio 10/97 - 9/2001
2. Sound System Engineering, Davis Don, ISBN-13: 978-0240818467
3. High Performance Loudspeakers, Colloms Martin, ISBN-13: 978-0470094303
4. Acoustics, Leo L. Beranek, ISBN-13: 978-0883184943

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Stanislav Bouzek


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Konzultant bakalářské práce: Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.


Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá použitím různých typů ozvučnic při realizaci kytarových reprosoustav a zkoumá, jakým způsobem jednotlivá konstrukční řešení ovlivní výslednou charakteristiku reprodukováného zvuku.

Klíčová slova

Ozvučnice, Elektrodynamický reproduktor, Uzavřená ozvučnice, Otevřená ozvučnice, Bassreflexová ozvučnice, Výkonové parametry, Frekvenční charakteristika, Směrová charakteristika, Impedanční charakteristika, Zkreslení, Budící signály

Abstract

The bachelor thesis deals with application of various types of acoustical enclosures when constructing a guitar amplifier and it examines the way each design solution affects the resulting sound characteristics.

Key words

Enclosure, Electrodynamic loudspeaker, Sealed loudspeaker enclosure, Open baffle loudspeaker enclosure, Bassreflex loudspeaker enclosure, Performance parameters, Frequency characteristics, Directional characteristics, Impedance characteristics, Distortion, Test signals

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Miroslav Vanc

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
1 REPRODUKCE ZVUKU	9
1.1 ELEKTRODYNAMICKÝ MĚNIČ	9
1.2 DĚLENÍ REPRODUKTORŮ	11
1.3 VÝKONOVÉ PARAMETRY REPRODUKTORU	13
1.4 GRAFICKÉ PARAMETRY REPRODUKTORU.....	14
1.4.1 Směrové charakteristiky	14
1.4.2 Frekvenční charakteristiky	15
1.4.3 Zkreslení	16
1.4.4 Impedanční charakteristiky	17
2 OZVUČNICE	18
2.1 VÝZNAM OZVUČNICE	19
2.2 UZAVŘENÁ OZVUČNICE.....	19
2.3 OTEVŘENÁ OZVUČNICE	20
2.4 BASSREFLEXOVÁ OZVUČNICE	20
2.4.1 <i>Transmission Line</i>	21
2.5 MATERIÁL OZVUČNICE.....	23
2.5.1 <i>Tlumící materiály</i>	24
2.6 POUŽITÉ TYPY OZVUČNIC	25
2.6.1 <i>Orange</i>	25
2.6.2 <i>Mesa</i>	26
2.6.3 <i>Thiele</i>	26
2.6.4 <i>Peavey</i>	27
3 MĚŘENÍ A HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	27
3.1 PODMÍNKY MĚŘENÍ	28
3.2 BUDÍCÍ SIGNÁL	29
3.3 POSTUP MĚŘENÍ.....	29
3.3.1 <i>Měření směrových charakteristik</i>	31
3.3.2 <i>Měření frekvenčních charakteristik</i>	31
3.4 GRAFICKÁ REPREZENTACE	32
3.5 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY	32
4 ZÁVĚR	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	48
PŘÍLOHY	1

Úvod

Jedním ze základních problémů, kterým je nutno se zabývat při zvukové nebo hudební produkci je výběr reproduktoru. Je potřeba znát prostředí a podmínky pro určenou produkci, stejně jako je nutné stanovit frekvenční pásmo, ve kterém má reproduktor hrát. S přihlédnutím k těmto okolnostem zvolíme vhodný reproduktor. Tím ale ještě problém nekončí. V případě, že vložíme reproduktor do pro něj nevhodné ozvučné skříně, můžeme tím radikálně změnit nebo znehodnotit jeho vyzařovací vlastnosti. Naopak při volbě vhodné ozvučnice je možno modifikovat parametry vyzařovaného zvuku tak, aby vyhovoval zamýšlenému účelu. Výběr vhodné ozvučnice je tedy stejně důležitý jako výběr samotného reproduktoru.

Cílem této bakalářské práce je zhodnotit a porovnat různá konstrukční provedení ozvučnic pro použití s kytarovým reproduktorem. Pro pochopení širších souvislostí v rámci této oblasti je zapotřebí seznámit čtenáře se samotným principem reprodukce zvuku a objasnit vlastnosti jednotlivých typů ozvučnic, které byly v práci použity. Dále je třeba stanovit a vysvětlit parametry reproduktoru, které hrají důležitou roli při porovnávání vlivu daného typu ozvučnice na zvuk z tohoto reproduktoru. Pro úplnost je v textu práce uveden postup a podmínky proběhlého měření, použité budící signály, dále pak popis programů pro grafické znázornění výsledných charakteristik. Pomocí naměřených dat se na závěr posuzuje vhodnost daných konstrukčních řešení pro určené podmínky reprodukce.

1 Reprodukce zvuku

Základní součástí kytarových reprosoustav a komb je reproduktor. Jedná se o elektroakustický měnič, který přeměňuje elektrickou energii na zvuk [1]. Naprostá většina těchto kytarových reproduktorů patří do skupiny elektrodynamických měničů, které pracují na principu kmitající cívky a permanentního magnetu [2]. Rovněž pro účely této bakalářské práce byl použit klasický elektrodynamický měnič značky Celestion.

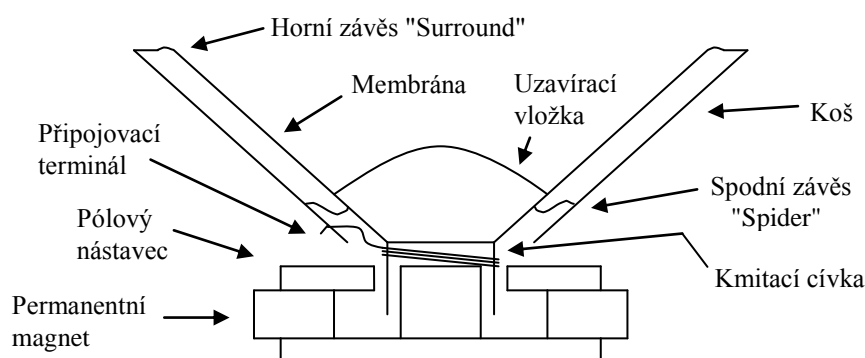
1.1 Elektrodynamický měnič

Princip funkce elektrodynamického měniče spočívá v silovém působení na vodič protékáný proudem, který je umístěn v magnetickém poli [1]. Toto pole je vytvářeno pomocí permanentního magnetu. Obvyklým materiálem pro výrobu těchto magnetů je ferit, slitina Al-Ni-Co, nebo zvláště silný neodym [3]. Vzniklý magnetický tok je veden přes pólové nástavce od magnetu až ke vzduchové mezeře [4], která by měla být co nejužší, z důvodu lepší koncentrace průchozího magnetického toku. Ve středu magnetického obvodu je často přítomen chladicí otvor, který slouží k efektivnějšímu odvodu tepla a zároveň zabraňuje stlačování vzduchu při kmitání membrány [4]. Takto je realizován základní magnetický obvod reproduktoru.

Kmitací cívka je navinutá na vrchol reproduktorového kuželu a je umístěná ve vzduchové mezeře mezi pólovými nástavci permanentního magnetu [2]. Když necháme kmitací cívku protékat střídavý proud (elektrický signál), pak se v souladu s Faradayovým zákonem elektromagnetické indukce vytvoří magnetické pole a na vinutí cívky v kolmém směru začne působit síla přímo úměrná magnetické indukci uvnitř vzduchové mezery [5]. To způsobí, že vinutí cívky v axiálním směru se vlivem této síly bude natahovat nebo smršťovat, podle průběhu střídavého proudu. Síla působící na vinutí je přímo úměrná nejen magnetické indukci, ale i výchylkám budícího proudu, jedná se tedy o lineární transformaci proudu na mechanickou energii [5]. V některých případech, zejména u reproduktorů určených pro reprodukci nižších frekvencí, mají kmitací cívky dvě i více vrstev navinutí [4].

Vinutí je pevně spojené s akustickou membránou [1], takže se kmity vinutí přenesou na celou plochu membrány. Na vnějším obvodu je membrána pružně spojena se samotným

košem reproduktoru [6]. Toto spojení se realizuje pomocí závěsů, které většinou bývají z tepelně tvarovaného, pružného, pryskiřicí impregnovaného materiálu [3] a dovolují tak membráně pístový pohyb, kdy se vychyluje z koše ven nebo dovnitř [2]. V případě větších reproduktorů je membrána okolo svého středu zavěšena ke koši pomocí spodního středícího závěsu, který zamezuje vychýlení membrány z osy kmitání, díky čemuž nedochází ke tření cívky o části magnetického obvodu [4]. Konstrukce celého systému je znázorněna na obrázku 1.1.



Obr. 1.1 - Schéma elektrodyynamického reproduktoru [2].

Interakcí membrány s okolním prostředím se vzniklé vibrace přeměňují na výsledné zvukové vlny [1]. Aby membrána výstupní zvukový signál nezkreslila, jsou na ni kladeny přísné nároky z hlediska materiálu. Ten musí být dostatečně tuhý, aby všechny body membrány kmitaly se stejnou výchylkou. Musí mít velké vnitřní tlumení, aby nedocházelo ke vzniku nežádoucích kmitů [1]. Zároveň nesmí být příliš těžký z důvodu úspory energie. V neposlední řadě by měl být dostatečně pohltivý, aby eliminoval nežádoucí špičky u vlastní rezonanční frekvence. Vhodnými materiály pro tento účel jsou například různé papírové hmoty, plasty, nebo některé kovy [1]. Bohužel ani použití sebevhodnějšího materiálu nemůže stoprocentně zaručit dostatečnou tuhost a dokonale pístový pohyb membrány.

Pro připojení reproduktoru do zvukového systému jsou vodiče cívek vyvedeny na připojovací terminál, který může být ve formě fastonových konektorů nebo je pojat jako dvojice pérkových svorek [4]. U samotných přívodů spojujících terminál a kmitací cívku nastává problém s mechanickým namáháním, kdy se v kritických místech díky rychlému kmitání vodičů snižuje jejich průřez. Následkem toho pak dojde k úbytku napětí, potažmo

pak ke ztrátě výkonu. Vodič se proto v těchto kritických místech obvykle vyztužuje speciálními materiály, které zabráňují přílišnému překlesávání [4].

1.2 Dělení reproduktorů

Reproduktory můžeme dále dělit podle jejich vlastního frekvenčního rozsahu. Pro různé frekvence je totiž reproduktor navrhován a realizován různými způsoby. Jednou z nejširších skupin reproduktorů jsou bezesporu reproduktory hlubokotónové, které bývají v angličtině nazývány jako woofery nebo sub-woofery a slouží pro reprodukci nízkých kmitočtů [4]. Ke správné funkci potřebují mít dostatečnou výchylku membrány [4]. Pro věrnou reprodukci nízkých kmitočtů by tyto reproduktory měly mít rozměry srovnatelné s vlnovou délkou nejnižší požadované frekvence. V praxi to ale není dost dobře realizovatelné, a pro dosažení nízkých frekvencí se proto používají jiné postupy, například použití vhodné ozvučnice. Nevýhodou těchto reproduktorů je vysoká směrovost při reprodukci vyšších frekvencí, které jsou takto slyšitelné pouze v ose reproduktoru [5].



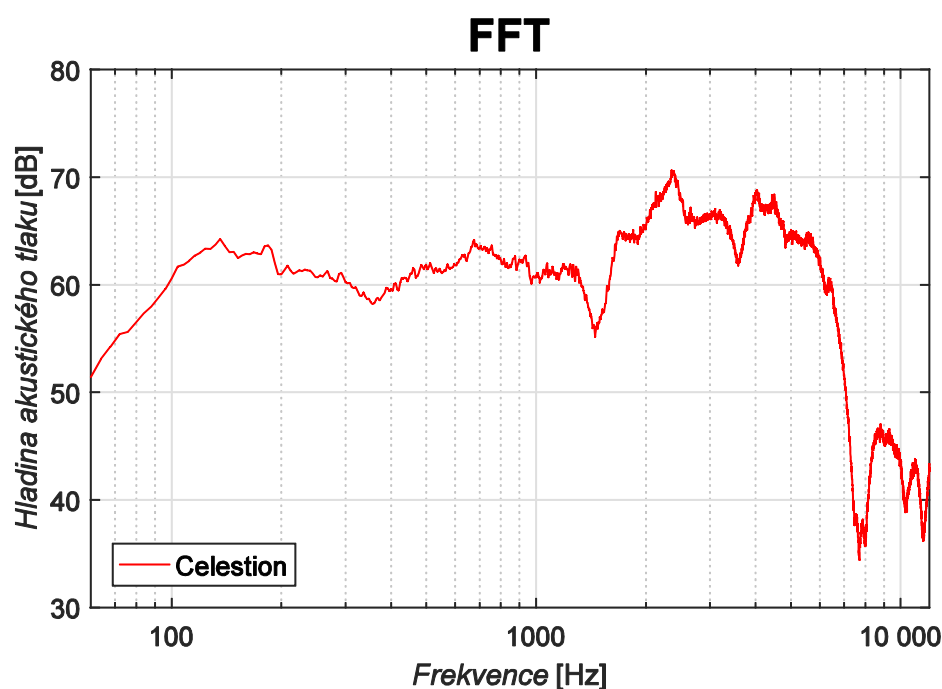
Obr. 1.2 Hlubokotónový reproduktor (převzato z [7]).

Další skupinou jsou reproduktory středotónové, které jsou využívány pro pásmo středních kmitočtů, zhruba v rozsahu 500 - 4000 Hz [4]. Mohou mít buď klasickou kuželovou membránu, která lépe reaguje na nižší frekvence, nebo membránu vrchlíkovou, která se naopak hodí pro reprodukci vyšších frekvencí a má v těchto pásmech menší zvlnění směrové charakteristiky. Čím menší je rozměr reproduktoru, tím se zpravidla zlepšují jeho dynamické vlastnosti [4].

Pro nejvyšší frekvence z rozmezí slyšitelného pásma se používají vysokotónové reproduktory neboli tweetyery. Tento typ reproduktorů má mnohonásobně vyšší

charakteristickou citlivostí, z toho důvodu se u něj musí provést tlumící opatření [4]. Existují i reproduktory širokopásmové, které se snaží pokrýt celý rozsah akustického pásma, od basů až po velmi vysoké frekvence. Používají se například jako reprosoustavy do automobilů, nebo jako stropní reproduktory [4]. Často v jejich konstrukci nacházíme takzvaný difuzor, který je připojen ke stejné kmitací cívce, ale jeho menší rozměr umožňuje vyšším frekvencím rovnoměrnější vyzáření a rozšiřuje tak jeho použitelné frekvenční pásmo [4]. Mimoto se vyrábějí reproduktory koaxiální, které mají v hlavní ose systému vestavěnou samostatnou vysokotónovou jednotku [4].

Pro všechna měření zkoumající vliv parametrů ozvučnic byl v této práci použit reproduktor Celestion Vintage 30, který je jedním z nejpoužívanějších typů reproduktorů napříč mnoha hudebními žánry, zejména v rockové a metalové hudbě. Jedná se o dvanáctipalcový reproduktor s keramickým magnetem se 60W zatížitelností. Jeho nominální impedance je 16 Ω , dostupná je i varianta s 8 Ω . Dosahuje hodnoty 100 dB charakteristické citlivosti a jeho rezonanční frekvence se nachází na 75 Hz. Tento typ reproduktoru můžeme z hlediska frekvenčního rozsahu považovat za širokopásmový reproduktor. Výrobce na svých stránkách uvádí frekvenční rozsah 70 - 5000 Hz, ale z frekvenční charakteristiky v grafu 1.3 je vidět, že na spodním krajním kmitočtu hladina jeho citlivosti klesá zhruba o 10 dB.



Graf 1.3 - Frekvenční charakteristika reproduktoru "Celestion Vintage 30".



Obr. 1.4 Reproduktr "Celestion Vintage 30" (převzato z [8]).

1.3 Výkonové parametry reproduktoru

Úvodem je potřeba zmínit, že naprostá většina elektrického výkonu přivedeného do reproduktoru se mění v teplo a jen minimální část se pomocí membrány transformuje na výslednou zvukovou energii [5]. Z definice vyplývá, že akustický výkon o hodnotě 1 W produkuje v metrové vzdálenosti od zdroje zvuku hladinu akustického tlaku 109 dB, za podmínky všesměrového šíření. To ale neznamená, že nám pro stejnou hladinu akustického tlaku stačí jednowattový elektrický příkon. Samotný údaj o elektrickém příkonu pouze určuje velikost výkonu, který je soustava schopna přenést do okolního prostředí, aniž by došlo k jejímu poškození [5].

Výkonová zatížitelnost reproduktoru je tedy limitována tepelnou odolností daného systému. Kromě ní je ale potřeba hledět i na mechanickou limitaci, tj. maximální výchylku membrány, která se při reprodukci nižších kmitočtů radikálně zvětšuje. Dále je nutno říci, že hodnota výkonové zatížitelnosti nevychází z reálného činného výkonu, ale z výkonu zdánlivého [5].

Vztah mezi dodaným příkonem a akustickým výkonem je dán celkovou účinností reproduktoru. Tato poskytuje informaci o tom, jaké procento elektrického výkonu se následně změní na zvuk [5]. Účinnost reproduktoru je, jak již bylo řečeno, velmi malá (řádově jednotky procent), ale její hodnota se může zvýšit použitím zúženého přenosového pásma. Účinnost je navíc velice dobře kompenzovatelná pomocí zvýšení výkonu zesilovače [1].

S účinností souvisí veličina zvaná charakteristická citlivost, která udává průměrnou velikost efektivního akustického tlaku ve formě hladiny v daném frekvenčním pásmu, v ose reproduktoru, který produkuje daná soustava ve vzdálenosti 1 m od zdroje zvuku a při budícím příkonu 1 VA [1]. Její velikost se pohybuje zhruba mezi 85 a 105 dB [5]. S citlivostí se někdy také pracuje při grafickém znázornění směrových nebo frekvenčních charakteristik.

1.4 Grafické parametry reproduktoru

Grafickými parametry reproduktoru se rozumí různé frekvenční, směrové, nebo impedanční charakteristiky, průběhy zkreslení a obecně parametry, pro které se nejvíce hodí grafický výstup. Tato práce se bude zabývat především směrovými charakteristikami a frekvenčními charakteristikami reproduktoru v závislosti na použité ozvučnici. Nejprve je ale potřeba popsat a shrnout takovéto grafické parametry pro samotný reproduktor.

1.4.1 Směrové charakteristiky

Na směrových charakteristikách reproduktoru se projeví, jak je vyzařování zvuku reproduktorem závislé na směru šíření a jakým způsobem se charakteristická citlivost reproduktoru mění v závislosti na poloze měřícího bodu [4]. Směrové charakteristiky jsou důležité při posuzování vhodnosti reprosoustavy z hlediska prostorového rozložení zvuku. Díky znalosti směrových charakteristik můžeme přesněji určit místo, kde bude chování reproboxu pro danou situaci nejvýhodnější (koncert, zkouška, atd.).

Podle normy se směrová charakteristika definuje jako funkce citlivosti reproduktoru v závislosti na úhlu mezi měřicí a referenční osou a zároveň v závislosti na frekvenci vyzařovaného zvuku, měřeného pod podmínkou volného akustického pole. Měřicí osa má spojitvat měřicí zařízení s referenčním bodem (deskou ozvučnice). Reprodukter je umístěn

do normou definovaných měřících podmínek do prostředí volného akustického pole. Měřící mikrofon se nachází v určené rovině, v měřící ose a v dané vzdálenosti od referenčního bodu, která musí být nesrovnatelně delší než vlnová délka měřené frekvence [9].

Když uvažujeme jakýkoli směrový zářič, jeho vyzářený výkon P_a je vždy menší než výkon P_i izotropního (nesměrového) zářiče. Poměrem těchto dvou výkonů, resp. rozdílem v decibelech, získáme pro jednotlivé frekvence tzv. index směrovosti:

$$I_D = 10 \cdot \log \frac{P_a}{P_i} \quad (1.1)$$

Při reálném měření nám velikost indexu směrovosti může napovědět, jak velká bude hladina akustického tlaku v ose oproti hladině v bočních směrech. Čím tedy bude index směrovosti reproduktoru na dané frekvenci vyšší, tím více se zde projeví jeho směrovost [4]. Při ozvučování otevřených prostor je požadavek na co největší index směrovosti, tj. aby většina energie zvukového signálu byla obsažena v hlavním směru [4].

1.4.2 Frekvenční charakteristiky

Grafy frekvenčních charakteristik nám dávají informaci o tom, jakým způsobem reproduktor vyzáří na jednotlivých frekvencích. Takto snadno zjistíme, přibližně jaký zvuk můžeme od reproduktoru očekávat. U kytarových reproduktorů nám záleží nejvíc na vyrovnanosti pásma středních frekvencí, na kterých kytara hraje nejvíc. Podle tvaru frekvenčních křivek si následně můžeme volit, o jakou polohu chceme kytarový tón rozšířit.

Ideální frekvenční charakteristika by měla být co možná nejvyrovnanější [4], tedy by měla obsahovat všechny frekvence ve stejné míře charakteristické citlivosti. Podle frekvenční charakteristiky se snadno určí frekvenční rozsah. Jedná se v podstatě o šířku frekvenční oblasti, kde se křivka frekvenční charakteristiky nachází uvnitř stanoveného tolerančního pole citlivosti (například ± 3 dB od dané jmenovité citlivosti) [5]. Pro kvalitní reprodukci hudby by se měl tento rozsah pohybovat v rozmezí od 30 Hz až do 15 kHz [1].

Dolní mezní kmitočet je dán celkovou plochou membrány, kde platí, že čím větší je membrána, tím hlubší tóny mohou být reprodukovány. Na druhé straně za horní mezní kmitočet můžeme považovat takový, při němž se frekvenční charakteristika začne vlnit a reproduktor začíná směřovat [4]. V praxi se ale běžně setkáváme se situacemi, kdy je horní mezní kmitočet překračován a používají se frekvence často i dvojnásobné [4].

Dalším důležitým parametrem, který se v menší nebo ve větší míře projeví ve výsledné frekvenční charakteristice, je rezonanční kmitočet. Jedná se o frekvenci, kdy reproduktor, vlivem vlastní hmotnosti a tuhosti, kmitá s největší výchylkou membrány [4]. Hraje zde také roli hmotnost sloupce vzduchu po obou stranách membrány, který kmitá společně s ní [4]. Rezonanční frekvence se u reproduktorů obvykle nachází ve spodních kmitočtových pásmech, proto ve většině případů lze tvrdit, že právě tato frekvence tvoří dolní kmitočtovou mez [4]. Když vložíme reproduktor do ozvučnice, tj. zvýšíme akustickou zátěž reproduktoru, jeho rezonanční kmitočet se změní v závislosti na typu a parametrech použité ozvučnice [1].

Podle normy se před měřením frekvenčních charakteristik stanoví frekvenční rozsah, pro který bude měřený reproduktor používán. Při měření se nejprve specifikuje frekvence, kde velikost elektrické impedance dosahuje svého prvního maxima. Tato frekvence se nazve jako rezonanční. K této frekvenci se připojí informace o okolním akustickém prostředí, jakožto i o charakteristice ozvučnice, do které byl měřený reproduktor zasazen. V případě měření bassreflexového systému se dále specifikuje frekvence, na které velikost elektrické impedance po překročení prvního maxima dosahuje svého prvního minima. Tato frekvence se nazve jako ladící [9].

1.4.3 Zkreslení

Dále je nutné podotknout, že při reálné reprodukci je vždy nutno počítat se zkreslením zvukové informace. Mluvíme o dvou typech zkreslení, lineárním a nelineárním. Informaci o lineárním zkreslení reproduktoru nám poskytuje jeho frekvenční charakteristika, přičemž ideálně vyrovnaná charakteristika zde představuje nulové lineární zkreslení [1]. Rovnou charakteristiku však nemá žádný reproduktor, proto můžeme bezpečně tvrdit, že všechny reproduktory lineárně zkreslují.

Zajímavější je situace, kdy reprodukováný signál obsahuje zkreslení nelineární. Znamená to, že v reprodukováném zvuku jsou přítomny kmitočty, které v budícím signálu obsaženy nejsou [1]. Toto nelineární zkreslení se může projevit v různých formách. Typicky se jedná o harmonické zkreslení, kdy nově vzniklé frekvence jsou celočíselným násobkem nebo podílem frekvencí původních [1]. Velikost harmonického zkreslení se udává pomocí činitele THD v procentech [4]. Dále můžeme mluvit o zkreslení intermodulárním, které se objevuje při reprodukci více kmitočtů najednou. Zde mohou vzniknout různé součtové nebo rozdílové frekvence, které jsou často vůči původním tónům neharmonické [1].

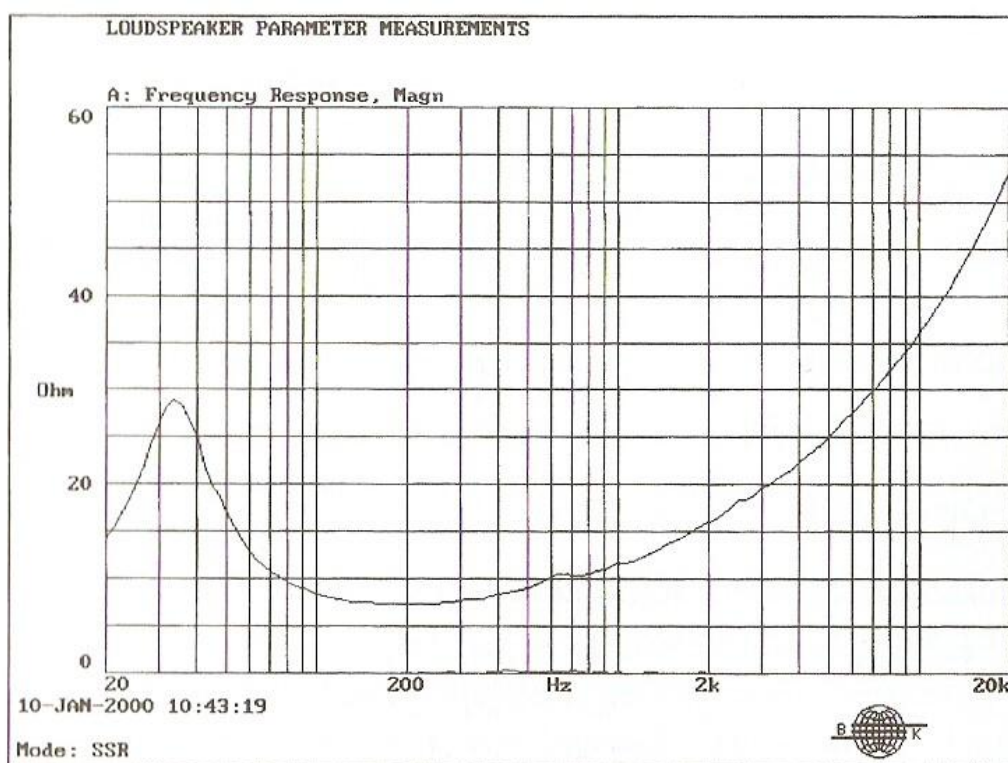
Obecně je nelineární zkreslení úměrné velikosti zatížení reproduktoru [1], tedy s rostoucí amplitudou signálu je zkreslení větší [5]. Mnohdy je způsobeno deformací membrány, nebo nelineárním chováním závěsů kmitací cívky. K tomu dochází při takovém buzení, kdy mechanická roztažitelnost závěsu nepovolí membráně větší výchylku [4]. Často je také na vině nedokonalé rozložení magnetického pole uvnitř vzduchové mezery nebo vznik vířivých proudů [4]. Zkreslení můžeme částečně odstranit použitím vhodné technologie výroby reproduktoru, ale můžeme ho potlačit i vložením reproduktoru do vhodně zvolené ozvučnice [4].

1.4.4 Impedanční charakteristiky

Je také nutné si uvědomit, že impedance reproduktoru není pouze odporového charakteru, nýbrž je značně závislá na frekvenci [4]. Běžná impedanční charakteristika reproduktoru v ozvučnici je znázorněna na obrázku 1.5. Na nulové frekvenci velikost impedance odpovídá odporu vodiče cívky [4]. Na nízkých frekvencích je zřetelný nárůst impedanční křivky, zátěž je zde induktivní, zejména díky indukčnosti kmitací cívky [4]. Následuje oblast již zmiňované rezonanční frekvence reproduktoru, kde velikost impedance reproduktoru dosahuje svého prvního maxima. Tato frekvence je určena mechanickými vlastnostmi reproduktoru, způsobem jeho nasazení a typem použité ozvučnice [6].

Poté impedanční křivka klesá a nad rezonančním kmitočtem tvoří minimum, podle kterého se stanoví výrobci udávaná jmenovitá impedance reproduktoru, pod kterou zde nesmí impedanční křivka poklesnout. Jedná se v podstatě o minimální zatěžovací hodnotu reproduktoru pro jeho pracovní frekvenční pásmo [1]. Obvyklé hodnoty jmenovité (nebo

také nominální) impedance jsou 4 Ω , 8 Ω , nebo i 16 Ω . V závislosti na použité ozvučnici se samozřejmě impedanční charakteristika reproduktoru změní.



Obr. 1.5 - Impedanční charakteristika elektrodynamickeho reproduktoru (převzato z [4]).

2 Ozvučnice

Reproduktory jsou typicky vsazovány do ozvučnic, tj. skříní ve tvaru kvádrů, často vyráběné z březové překližky, ale i z jiných materiálů. Pro umístění reproduktoru slouží otvor vyříznutý do přední stěny ozvučnice. Ozvučnice pro kytarové reprosoustavy jsou navrhovány nejčastěji pro jeden až dva reproduktory v závislosti na velikosti skříně a velmi často mívají polootevřenou zadní stěnu. Do běžného kytarového komba určeného k hudební produkci se umísťují typicky dvanáctipalcové, méně často pak desetipalcové reproduktory. Existují i menší reproboxy s osmipalcovými nebo ještě menšími reproduktory, tyto typy se však na pódiích objevují jen málokdy a slouží spíše k domácímu použití. Mimo běžná kytarová komba se dále můžeme setkat s konstrukcemi, do kterých nejsou integrovány kytarové hlavy obsahující zesilovač. Tyto se pořizují zvlášť a připojují se k reproboxu externě.

2.1 Význam ozvučnice

Význam ozvučnice není pouze v možnosti mechanického upevnění reproduktoru, daleko důležitější je její schopnost zamezení akustických zkratů [6]. Dynamický reproduktor bez ozvučnice se při hraní chová jako dvojice zářičů v protifázi. Když se membrána pohybuje směrem ven z koše, v blízkosti přední plochy se částice vzduchu stlačují, u zadní plochy dochází naopak ke zředování, na obou stranách membrány jsou tlakové změny vždy opačné. Tak vzniknou dvě vlny s opačnou fází. Kdykoli se tyto dvě vlny v prostoru setkají, vzájemně se vyruší [6]. Tento problém se tedy týká pouze nízkofrekvenčních signálů, tj. signálů, jejichž vlnová délka je větší než rozměry samotného reproduktoru. Pro tyto signály už reproduktor není překážkou v prostoru, jejich vlny ho obtékají a nevyhnou se tak vzájemnému setkání. Na těchto frekvencích tedy dochází k tzv. akustickému zkratu [6], který odbouráme právě použitím ozvučnice.

V nejšířším slova smyslu existují dva druhy ozvučnice. Ozvučnice desková dělí prostor před a za membránou na dva stejné poloprostory. Velikostí použité desky se určí nejnižší reprodukovatelný kmitočet. Tato varianta je konstrukčně jednoduchá a nedochází zde k rezonancím vlivem stojatého vlnění [4]. Tyto ozvučnice mají však jen velmi omezené pole působnosti (používají se zejména na měřicí účely). O dost běžnější je ozvučnice skříňová, která rozděluje prostor před a za membránou na vnějšek a vnitřek skříně [6]. Skříňová ozvučnice může být buď uzavřená, otevřená, polootevřená nebo bassreflexová a právě těmito typy ozvučnic se zabývá tato práce.

2.2 Uzavřená ozvučnice

V případě uzavřené ozvučnice zadní vlna putuje do vnitřku skříně a je-li skříň opravdu dokonale uzavřena a zvuk nemůže přes její stěny projít, energie vlny se přemění v teplo [6]. Principem uzavřené ozvučnice je tedy naprosté pohlcení vlny vzniklé za membránou, zde však musíme vzít na vědomí, že takto dále snižujeme již tak dosti malou účinnost reproduktoru. U tohoto typu dochází k výraznému snížení hladiny akustického tlaku, oproti situaci s ideální deskovou ozvučnicí [4].

Při pohybu membrány ven se vzduch v ozvučnici roztahuje a při pohybu membrány dovnitř se naopak stlačuje. K tomu je ovšem zapotřebí přídavné síly a díky tomu se reproduktor začne chovat tak, jako by byl závěs membrány o něco tužší [6]. Jinými slovy

dochází k superpozici akustické tuhosti ozvučnice k vlastní tuhosti reproduktoru, čímž se zvyšuje rezonanční frekvence celého systému. Křivka citlivosti v důsledku instalace ozvučnice mění svůj tvar tak, že pod jistým kmitočtem dochází ke snížení citlivosti a nad ním se citlivost zvýší [5].

2.3 Otevřená ozvučnice

Kromě ozvučnic uzavřených se také používají i ozvučnice otevřené či polootevřené, které mají zadní stěnu částečně nebo úplně odstraněnou. Tyto otevřené ozvučnice jsou principiálně na půl cesty mezi deskovou a klasickou skříňovou ozvučnicí. Bočními stěnami prodlužují dráhu zadní vlny, ale pro správnou funkčnost musí mít reproduktor velice pevné uchycení, aby mohl poskytnout dostatečnou středící sílu [6]. Právě tyto typy ozvučnic se používají nejvíce pro kytarová komba [4].

2.4 Bassreflexová ozvučnice

Speciálním, ale dnes hojně využívaným řešením, je ozvučnice bassreflexová. Tento typ ozvučnice má v jedné ze svých stěn vytvořen druhý otvor, do kterého je zasazen bassreflexový nátrubek [5]. Ve srovnání s klasickou uzavřenou ozvučnicí má bassreflexová ozvučnice větší účinnost, díky využití energie zadní vlny [4]. Další podstatnou výhodou je, že na jejím rezonančním kmitočtu nedochází k velké výchylce membrány, místo reproduktoru zde rezonuje právě onen bassreflexový nátrubek [5]. Oproti uzavřené ozvučnici má ale složitější návrh, který je o dost citlivější na nepřesnosti ve výpočtech a parametrech reproduktoru [4]. Jeho frekvenční charakteristika navíc směrem dolů od rezonančního kmitočtu klesá daleko strměji [4].

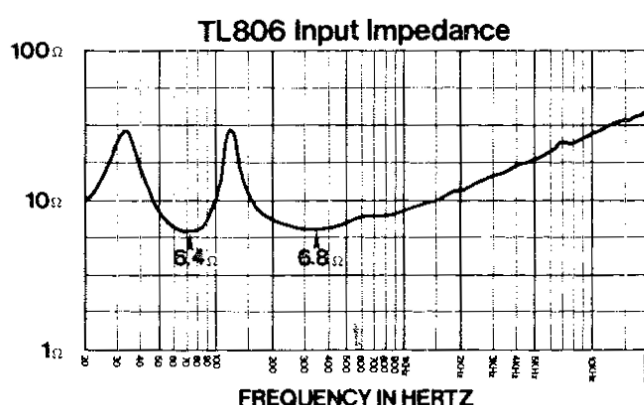
Celá ozvučnice se vestavěním bassreflexu chová jako rezonátor naladěný na určitou frekvenci, která je dána vztahem

$$f_B = \frac{c_0}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}} \quad (2.1)$$

kde l je délka bassreflexového nátrubku navýšená o délku spolukmitajícího sloupce vzduchu, S je průřez nátrubku a V je objem ozvučnice. Na tomto kmitočtu potom vzduch v nátrubku kmitá se stejnou fází jako vzduch obklopující membránu [4]. Vyzářený výkon

může na nižších kmitočtech dosahovat až čtyřnásobně vyšší hodnoty než u ozvučnice uzavřené [5].

Použití bassreflexu je ale také v mnoha ohledech nevýhodné. Kromě strmějšího poklesu citlivosti pod rezonančním kmitočtem dochází rovněž v této frekvenční oblasti k prudkému zvětšování výchylky membrány. Důsledky tohoto jevu jsou zvláště nežádoucí pro bassreflexové reproboxy větších výkonů. Před vstupem na svorky reproduktoru je proto elektrický signál filtrován horní propustí, ve které je ochuzen o problémové nižší kmitočty [5]. Aplikace bassreflexu se nadto projeví i na impedanční charakteristice, u které se na frekvenci f_B objeví sedlo. Z jednoho maxima se tedy vytvoří dva podobně velké vrcholy obklopující bassreflexem zvýrazněný kmitočet f_B [4]. Na obrázku 2.1 je pro ilustraci zobrazena impedanční charakteristika reproboxu *TL806* od firmy *Electro Voice*, jehož ozvučnice obsahuje bassreflexový systém. Tento typ ozvučnice je jedním ze tří, podle kterých byly v rámci této práce zhotoveny modely, a jejichž popis je uveden v podkapitole 2.5.



Obrázek 2.1 - Impedanční charakteristika ozvučnice typu *TL806* (převzato z [10]).

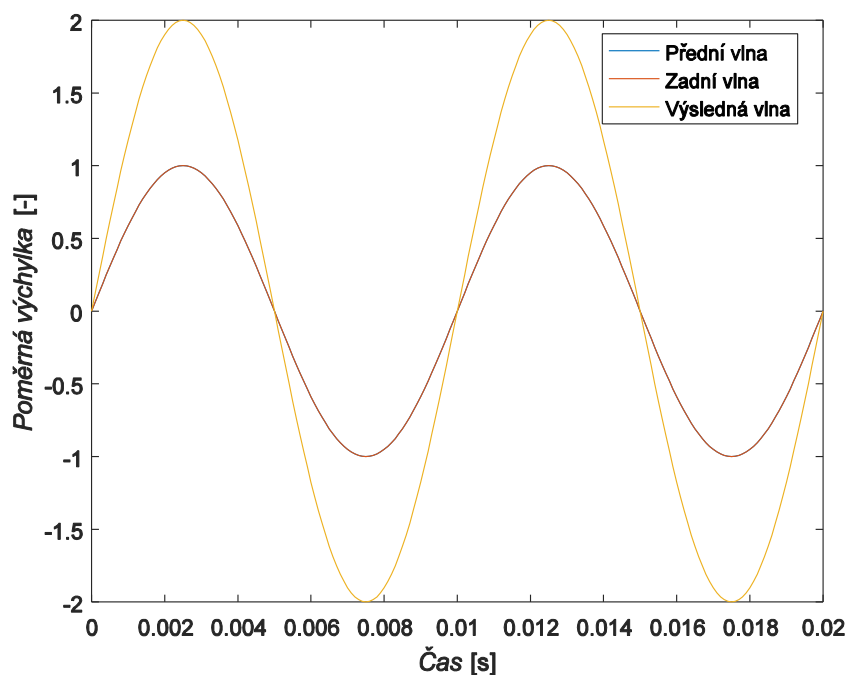
2.4.1 Transmission Line

Dalším řešením, při kterém se využívá energie ze zadní strany membrány je ozvučnice typu *transmission line*. Signál se však narozdíl od bassreflexu zde zpracovává pomocí fázového posunu zadní vlny. Jde o to, že když se přední vlna setká se zadní vlnou posunutou o 180° její fáze, výchylky obou vln se vzájemně nevyruší, nýbrž se sečtou. Zadní vlnu je tedy nutno časově zpozdít. Posun fáze zadní vlny se realizuje vytvořením příslušně dlouhého zvukovodu. Délka zvukovodu by měla odpovídat polovině vlnové

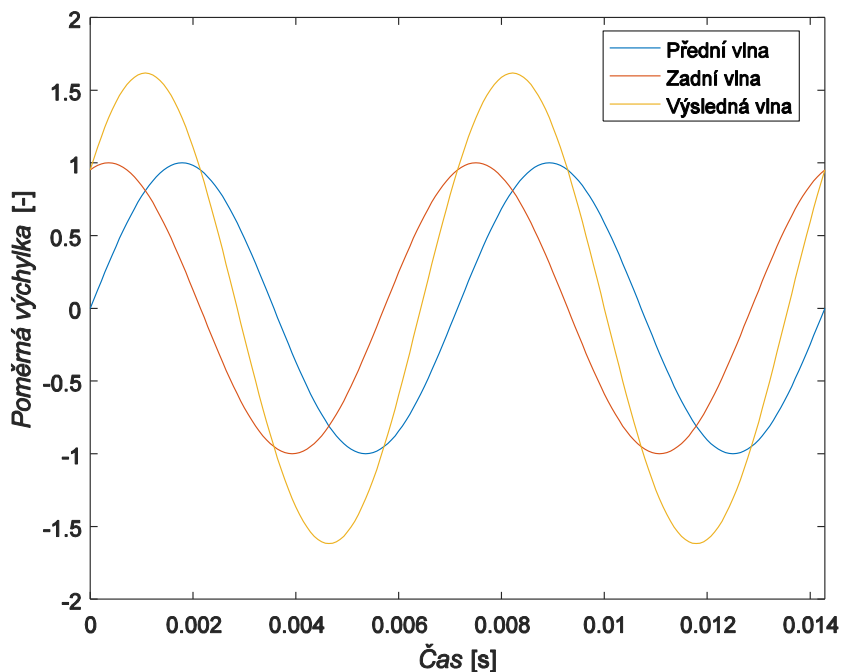
délky zesilovaného kmitočtu [6]. Pro nejlepší výsledky by měl být průřez zvukovodu konstantní [5].

Jako příklad udejme zvukovod koncipovaný na zesílení frekvenční oblasti kolem 100 Hz. Vlnová délka tohoto kmitočtu ve vzduchu při 20°C by měla být zhruba 3,44 m. Daný zvukovod tudíž bude 1,72 m dlouhý (nemusí být rovný). V grafech 2.2, 2.3 a 2.4 je znázorněna výchylka výsledné zvukové vlny při různých kmitočtech.

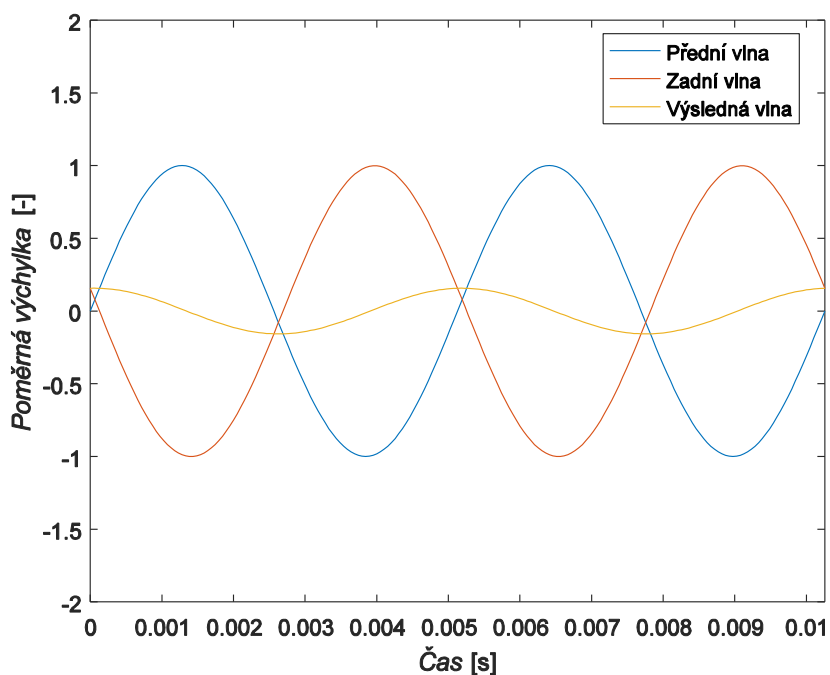
V prvním grafu vidíme, že signál o frekvenci 100 Hz dosahuje při použití zvukovodu až dvojnásobně větší výchylky, než kdyby byla využita pouze vlna z přední strany reproduktoru. Takto se zvukové vlny překrývají a amplituda výsledného signálu je při tomto kmitočtu maximální. Druhý graf popisuje průběh signálu o frekvenci 140 Hz. Při použití stejně dlouhého zvukovodu dosahuje výsledný signál již výrazně menší výchylky a na třetím grafu je jeho amplituda dokonce menší než amplituda vlny z jedné strany reproduktoru.



Graf 2.2 - Průběh signálu o frekvenci 100 Hz.



Graf 2.3 - Průběh signálu o frekvenci 140 Hz.



Graf 2.4 - Průběh signálu o frekvenci 195 Hz.

2.5 Materiál ozvučnice

Další důležitou otázkou v problematice ozvučnic je to, z jakého materiálu by měla být skříň vyrobena. Na začátku kapitoly je zmínka o březové překližce, která má své první

místo zajištěno dostatečnou pevností a tuhostí. Navíc je relativně lehká, proto se využívá při konstrukci mobilních reprosoustav, kde umožňuje jejich snazší stěhování. Díky své pevnosti může být používána i ve venkovních prostorech [4]. Ozvučnice testované v této práci byly zhotoveny z osmnáctimilimetrové březové překližky.

Pro nejlepší vlastnosti reprodukce zvuku musí být materiál ozvučnice pevný, tuhý, těžký a musí mít velké vnitřní tlumení. Mezi další používané materiály k výrobě ozvučnic můžeme zařadit překližku z topolu, která je o něco levnější než březová překližka, je silná a lehká. Tento druh překližky v sobě však mívá výdutě, které ve výsledném zvuku působí nežádoucí rezonance a zvonivost. V poslední době bývá topolová překližka nahrazována vícejádrovým materiálem MULTI-CORE [4].

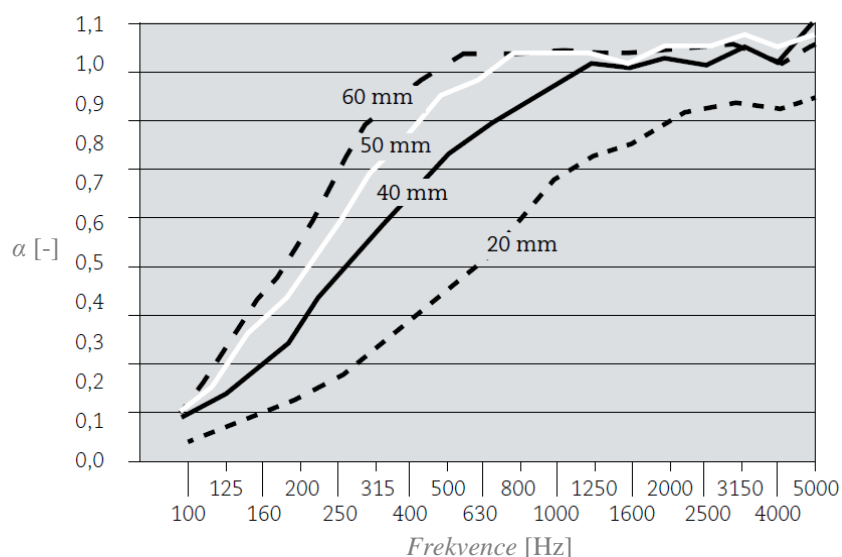
Pro lepší vnitřní tlumění se používají dřevovláknité desky MDF nebo dřevotřískové DTD. Deska MDF je oproti DTD dražší, ale je pevnější a těžší. Kvůli své hmotnosti se hodí spíše pro stacionární typy reprosoustav s velkými výkony. Má také více homogenní strukturu, proto se snadněji provádí úprava jejího povrchu. Obě tyto desky jsou velice náchylné na přítomnost vody a nemůžou tedy být použity na místech se zvýšenou vlhkostí [4]. Méně často se setkáme s ozvučnicemi z laminátu, plastu, kamene nebo betonu.

Velmi důležitou roli hraje i vzduchová těsnost celé skříně a tuhost spojů mezi jednotlivými deskami. Pro zajištění dostatečné těsnosti se všechny kouty stěn a spáry mezi spoji vylíjí akrylovým tmelem. Přídavné těsnění by mělo být přítomné i pod úchyty reproduktoru a pod připojovacím terminálem, který se obvykle nachází na zadní straně ozvučnice [4].

2.5.1 Tlumící materiály

Ozvučnice často bývají z vnitřní strany potaženy různými tlumícími materiály s porézní pěnovitou strukturou z důvodu tlumení stojatého vlnění. Stojaté vlny uvnitř ozvučnice vznikají při dostatečné odrazivosti jejích vnitřních stěn. Vlna putuje od zadní strany membrány reproduktoru k zadní stěně ozvučnice a v případě, že zvuk obsahuje frekvence o vlnových délkách, které odpovídají celočíselnému podílu vnitřních rozměrů skříně, vznikne na těchto frekvencích stojaté vlnění [4].

V této práci byla pro tento účel použita tlumící pěna Basotect od rakouského výrobce Greiner PURtec. Obecně platí, že čím větší je tloušťka použité pěny, tím lépe se eliminuje stojaté vlnění. Tloušťka pěny použité pro účely této práce je 40 mm. Na obrázku 2.5 je znázorněna funkce pohltivosti pěny pro dané frekvence při použití různých tlouštěk pěny.



Obr. 2.5 - Funkce pohltivosti pěny Basotect (převzato z [11]).

2.6 Použité typy ozvučnic

Pro tři reproduktorové skříně z březové překližky. Tyto vyrobené skříně nebyly potaženy žádným povlakovým materiálem, ani k nim nebyl instalován přídatný hardware (nožičky, madla). Všechny typy byly měřeny v různých variantách, které jsou popsány dále v textu. Kromě těchto tří ručně vyrobených ozvučnic byla pro porovnání měřena ozvučnice komba od výrobce kytarových aparátů Peavey.

2.6.1 Orange

První konstrukce byla vyrobena tak, aby odpovídala parametrům ozvučnice *Orange PPC112*. Tato je jednou z nejrozšířenějších skříní pro dvanáctipalcový reproduktor. Jedná se o uzavřenou ozvučnici, jejíž stěny jsou (stejně jako stěny námi použitého modelu) vyrobeny z březové překližky. Je o něco větší než typická skříň 1×12, tím pádem má i větší vnitřní objem a na nízkých kmitočtech se díky tomu projevuje kvalitním hutným tónem. Ozvučnice je standardně osazena právě reproduktorem *Celestion Vintage 30*.

Oproti originálu je námi použitý model ochuzen o kluzné lyžiny, které jsou zesponu připevněné ke konstrukci. To má zajistit lepší akustické spojení s pódiem za účelem rozšíření frekvenčního rozsahu do nižších kmitočtů. Naše měření však s žádným pódiem nepočítá, tudíž je pro nás tato přidaná funkce zbytečná. Vnitřní objem této ozvučnice je 42,76 litrů. Z hlediska rozměrů se *Orange PPC112* podobá modelu *Mesa Boogie: Widebody*, která je vyráběna s polootevřenou zadní stěnou. Pro získání přibližné představy o tom, jakým způsobem se chová tento model, je druhá varianta konstrukce realizována s polovičním zadním víkem.

2.6.2 Mesa

Další konstrukce přejímá rozměry ozvučnice značky *Mesa*, typu *The Rectifier 1x12*. Tato skříň je hlubší a o něco vyšší než předchozí model, zato však nedosahuje stejné šířky. Stejně jako originální *Orange* je i tato ozvučnice uzavřená. Je laděná pro přednes renomovaného zvuku vícereproduktorových ozvučnic značky *Rectifier* při použití kompaktnějšího formátu 1×12. Tento formát má přitom stejnou hloubku skříně jako zmíněné větší verze *Rectifieru*. Podle výrobce je zvuk z této ozvučnice díky tomu na nízkých kmitočtech velmi důrazný, což z ní dělá výbornou volbu pro tvrdší hudební styly. Ozvučnice značky *Mesa* jsou obecně vyráběny z kvalitních baltských březových překližek. Na krajích jsou opatřeny odolnými krytkami a využívají silnější vyztuženou konstrukci obsahující systém drážkových spojů.

Námi použitá verze je stejně jako předchozí *Orange* vyrobena z klasické březové překližky a v předchozím odstavci zmíněná vyztužující a krytová opatření byla zanedbána. Právě tato ozvučnice byla měřena ve variantě s vnitřním úchytem reproduktoru k přední stěně a ve variantě s vnitřním vylumením pěnou Basotect. Vnitřní objem této ozvučnice je 48,4 litrů.

2.6.3 Thiele

Poslední z vyrobených konstrukcí využívá jako předlohu model ozvučné skříně od značky *Electro Voice* s označením *TL806*. Upravenou verzi vyrábí firma *Mesa* pod názvem *1×12 Thiele Front Ported Compact Cabinet*. Tyto relativně malé skříně jsou určeny pro nízké frekvence a mají do přední desky vestavěný bassreflexový systém se stočeným zvukovodem. Na nižších frekvencích je spektrum poměrně vyrovnané a neobsahuje

nežádoucí špičky. Vzduch proudící z předních otvorů poskytuje výslednému zvuku dodatečný důraz. Skříň je navržena pro použití s dvanáctipalcovým reproduktorem typu *EVM12L*, kytaristé ji ale často používají i v kombinaci s reproduktory radikálně odlišných vlastností a parametrů. Toto pak vede k nesprávné funkci celého bassreflexového systému. Frekvenční rozsah této soustavy by podle výrobce měl zahrnovat pásmo 60 - 1600 Hz a její účinnost by se měla pohybovat okolo 6 %.

Návrh této skříně poskytuje dvě varianty použití bassreflexového systému. Uprostřed dvou bassreflexových zvukovodů je totiž přítomen snímatelný kryt, který svou nepřítomností vytvoří delší a širší zvukovod po straně přední desky. V našem měření jsou použity obě tyto varianty a pro porovnání navíc i varianta s kompletně uzavřeným bassreflexovým zvukovodem. Celkový vnitřní objem skříně je 33,67 litrů včetně objemu bassreflexových tunelů. V otevřené variantě s nasazeným krytem je objem bassreflexu 0,68 l a ve variantě bez krytu je jeho objem 1,48 l.

2.6.4 Peavey

Jediný typ ozvučnice, u které byly měřeny charakteristiky její originální konstrukce byla ozvučnice z kytarového komba Peavey Express 112. Tento typ v dnešní době již firma Peavey nevyrábí. Byl standardně osazován reproduktorem Peavey Sheffield 1230 se zatížitelností 65 W a s 8 Ω jmenovité impedance. Ozvučnice má rozměry 50 cm na výšku, 41 cm na šířku a 24 cm střední hloubky. Její vnitřní objem dosahuje zhruba 27,41 litrů.

3 Měření a hodnocení výsledků

Měření směrových a frekvenčních charakteristik reproduktorů v různých ozvučnicích probíhalo v souladu s normou IEC 60268-5. *Sound System Equipment - Part 5: Loudspeakers*. Pro měření byla použita bezodrazová komora ve sklepních prostorách Fakulty elektrotechnické v areálu Západočeské univerzity na Borech.



Obrázek 3.1 - Pracoviště v laboratorních prostorách.

3.1 Podmínky měření

Pro zjednodušení ve specifikaci způsobu, jakým mají být reproduktory nastaveny pro měření, jsou stanoveny obecné měřicí podmínky. Pro získání správných podmínek měření je vhodné použít hodnoty, které výrobce stanoví ve specifikaci reproduktoru, zvané jako jmenovité podmínky. Tyto hodnoty samy o sobě nejsou subjektem měření, ale připravují půdu pro měření ostatních charakteristik. Mezi tyto jmenovité podmínky patří jmenovitá impedance, jmenovité sinusové napětí, jmenovité napětí šumu, jmenovitý frekvenční rozsah, referenční plocha, referenční rovina a referenční osa [9].

Reproduktor je měřený za obecných měřicích podmínek tehdy, když jsou splněny následující požadavky. Měřený reproduktor by za prvé měl být uchycen způsobem, který stanoví norma. Akustické prostředí, ve kterém má být reproduktor měřen, je vybrané z těch, které stanoví norma. Reproduktor je vůči měřicímu mikrofonu a zdem umístěn způsobem, který stanoví norma. Reproduktor je buzen specifikovaným signálem o daném napětí v mezích frekvenčního pásma, pro které je reproduktor určen. Pro stanovení příkonu reproduktoru se může použít vztah:

$$P = U^2 / Z \quad (3.1)$$

kde Z je hodnota jmenovité impedance reproduktoru. Měřící vybavení použité při měření reproduktoru by mělo odpovídat bodům, které stanoví norma [9].

3.2 Budící signál

Pro akustické měření reproduktoru může být použit sinusový signál nebo některý z druhů šumu. Sinusový signál by na žádné frekvenci neměl překročit jmenovité sinusové napětí definované výrobcem reproduktoru. Vstupní napětí se před začátkem měření nastaví na takovou hodnotu, aby hladina tlaku v předem určeném bodě byla konstantní, nebo předem stanovená [9].

Při použití širokopásmového šumového signálu by se jeho činitel výkyvu (podíl špičky vůči efektivní hodnotě) měl pohybovat mezi hodnotami 3 a 4, čímž se eliminuje ořezávání zesilovačů. Pro měření výchylky šumu se použije voltmetr s nastavenou konstantou "slow". Pro měření s použitím úzkopásmového šumu se aplikuje generátor růžového šumu s vhodně zvolenými filtry nastavenými na propouštění po třetinooktávových pásmech [9].

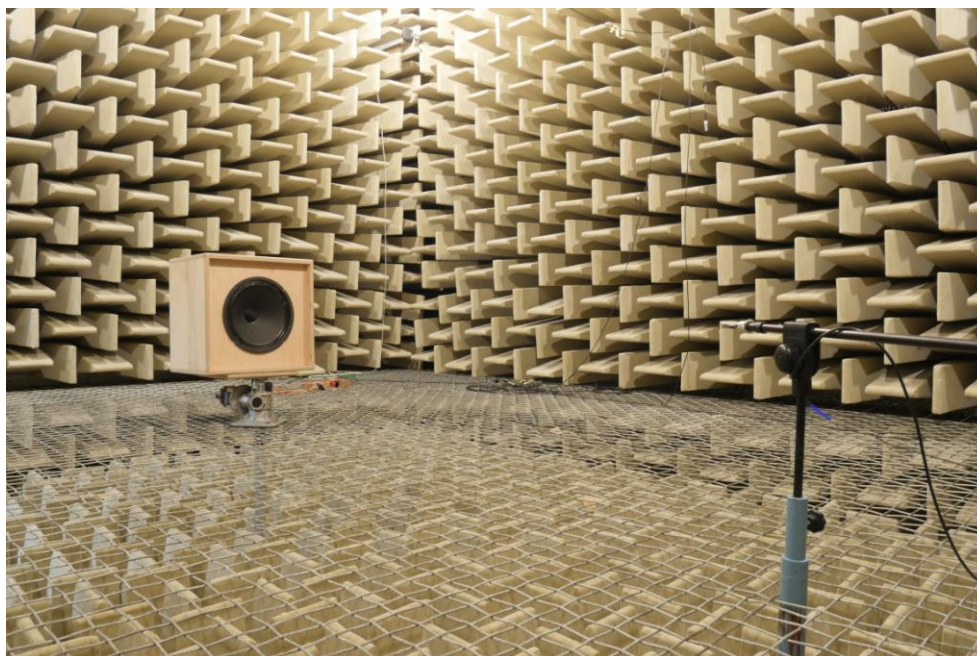
Dále je možno použít krátký signálový puls s konstantním výkonem na frekvencích spektra, o které se při měření jedná. Takový signál v sobě nese malé množství energie v poměru k energii své špičkové amplitudy [9].

3.3 Postup měření

Do přední stěny testované ozvučnice je vsazen reproduktor, načež je zajištěn přišroubováním. Úchyt reproduktoru je proveden z vnější strany přední desky, až na jediný případ, kdy je testován vliv rozdílu v úchytech, a reproduktor je zde uchycen k vnitřní straně přední desky. Při testování vlivu tlumícího materiálu je ozvučnice před zasazením reproduktoru navíc z vnitřních stran vyložena tlumící pěnou Basotect. Pro všechna měření směrových i frekvenčních charakteristik byl v této práci použit reproduktor *Celestion 30 Vintage*.

Celý systém je umístěn do bezodrazové komory, jejíž všechny stěny jsou vyloženy tvarově uzpůsobeným pohltivým materiálem v konstelaci, která zaručuje maximální možnou pohltivost zvukové energie, tím pádem v prostoru nejsou přítomny odrazy a dozvuk komory má nulovou hodnotu. Komora takto simuluje vlastnosti volného

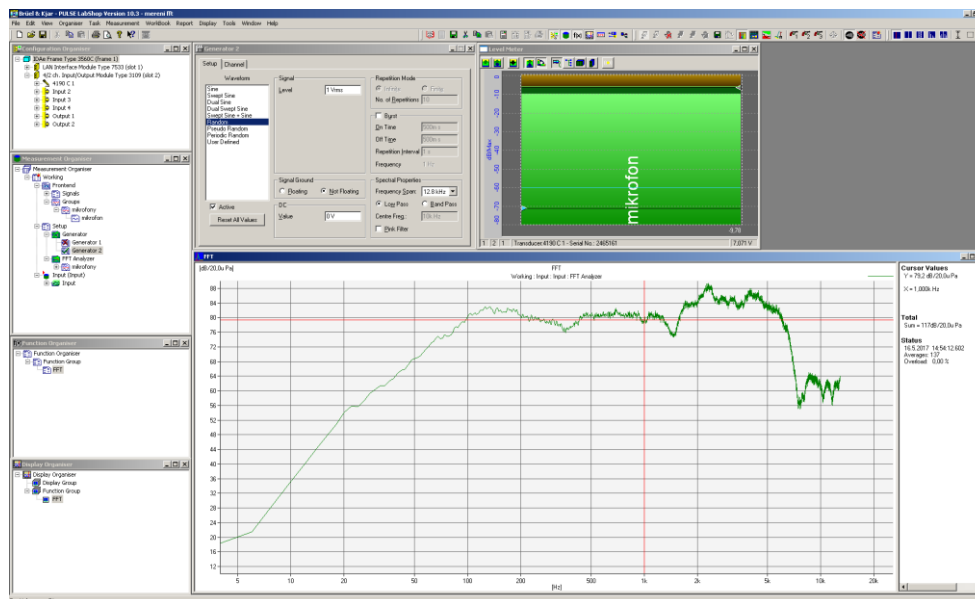
akustického pole. Skříň s reproduktorem se při měření nachází ve třetině délky komory a v další třetině je umístěn měřící mikrofón. Celková vzdálenost mezi přední deskou ozvučnice a měřícím mikrofónem jsou 2 m. Měřící mikrofón je nastaven do stejné výšky, v jaké se nachází střed ozvučnice.



Obrázek 3.2 - Bezodrazová komora

Ozvučnice je postavena na automatizovanou točnu, ovládanou z vedlejší místnosti. Tato točna se uplatňuje při měření směrových charakteristik, pro které zde představuje zásadní zjednodušení. Ideální způsob měření směrových charakteristik by vyžadoval použití většího množství mikrofónů, které by pro náležitou důvěryhodnost měření měly mít stejné vlastnosti. Toto řešení je však velmi nákladné, proto je zvolena varianta s točnou, která využívá vlastností odpovídajících volnému akustickému poli a výsledky měření mohou být takto považovány za správné.

Mikrofón je propojený s počítačem ve vedlejší místnosti a jím naměřená data putují do programu *Pulse* od firmy *Brüel & Kjær*. Toto rozhraní nabízí elementární grafický výstup naměřených hodnot a umožňuje různými způsoby pracovat s výsledky. Je například možné naměřená data průměrovat, čehož se využije při měření frekvenční odezvy reproduktoru.



Obr. 3.3 - Obrazovka s rozhraním měřicího programu "Pulse".

3.3.1 Měření směrových charakteristik

Při uskutečněném měření směrových charakteristik byla pro každé třetinooktávové pásmo zvolena střední frekvence, jejichž hodnoty jsou 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1 kHz, 1.25 kHz, 1.6 kHz, 2 kHz, 2.5 kHz, 3.15 kHz, 4 kHz a 5 kHz. Pro buzení reproduktoru byl použit vícenásobný sinusový signál, který simultánně generoval signály o těchto středních frekvencích. Všechny frekvence jsou tímto způsobem změřeny najednou. Jak již bylo výše v textu zmíněno, měření bylo prováděno s použitím pouze jednoho měřicího mikrofону, proto byla bedna usazena na automatizovanou točnu a mikrofon snímal hodnoty hladin citlivosti reproduktoru po třech stupních otočení. Směrové charakteristiky všech typů ozvučnic a jejich variant byly měřeny pro dva výkony. Poprvé byl reproduktor napájen napětím o hodnotě 4 V, napodruhé jím procházelo 7,4 V.

3.3.2 Měření frekvenčních charakteristik

Pro měření frekvenčních charakteristik reproduktoru byl jako budící signál použit bílý šum, ve kterém jsou všechny frekvence zastoupeny stejnou měrou. Použitá frekvenční analýza je typu FFT, která využívá upravenou Fourierovu transformaci. Ta ze získaného časového signálu vytvoří celistvé frekvenční spektrum, ve kterém jsou zastoupeny všechny naměřené frekvence. Podle toho se určí, s jakou citlivostí reproduktor vyzářuje signály jednotlivých frekvencí. Stejně jako směrové charakteristiky i hodnoty frekvenční odezvy

byly měřeny pro dva výkony reproduktoru. Pro buzení šumem jsou zde použity větší hodnoty napájecího napětí, 40 V a 26 V.

3.4 Grafická reprezentace

Naměřené křivky směrových charakteristik reproduktoru pro dané frekvence se dále zobrazují v polárních grafech. V grafu by měly být uvedeny všechny stupně na kterých byly hodnoty měřeny. Pro referenční osu je vyhrazen nultý stupeň [9].

Zobrazování polárních grafů bylo realizováno pomocí programu MATLAB. Samotné grafy byl generovány skriptem "dirplot", který byl vytvořen Stevem Rickmanem a je volně dostupný na společenském fóru internetových stránek MATLABu [12]. Pro inicializaci tohoto skriptu je použit vlastní startovací program, ve kterém je možno zvolit typ grafu, má-li zobrazovat více frekvencí jednoho systému, nebo více systémů na stejné frekvenci. Dále umožňuje stanovit počet polárních křivek (maximálně 4), nebo šířku čáry v grafu.

V těle skriptu je zajištěna automatizace pojmenování grafů a tvoření legend ke grafům. Dále je použit autoscaling, tedy samonastavení měřítka, které se takto přizpůsobí největší a nejmenší hodnotě hladiny akustického tlaku přítomné v daném grafu.

Pro zobrazení frekvenčních charakteristik je použit vlastní skript do programu MATLAB. Stejně jako u skriptu pro zobrazení směrových charakteristik, i zde je možno zobrazit více křivek do jednoho grafu a je zde obsažena funkce automatického pojmenování.

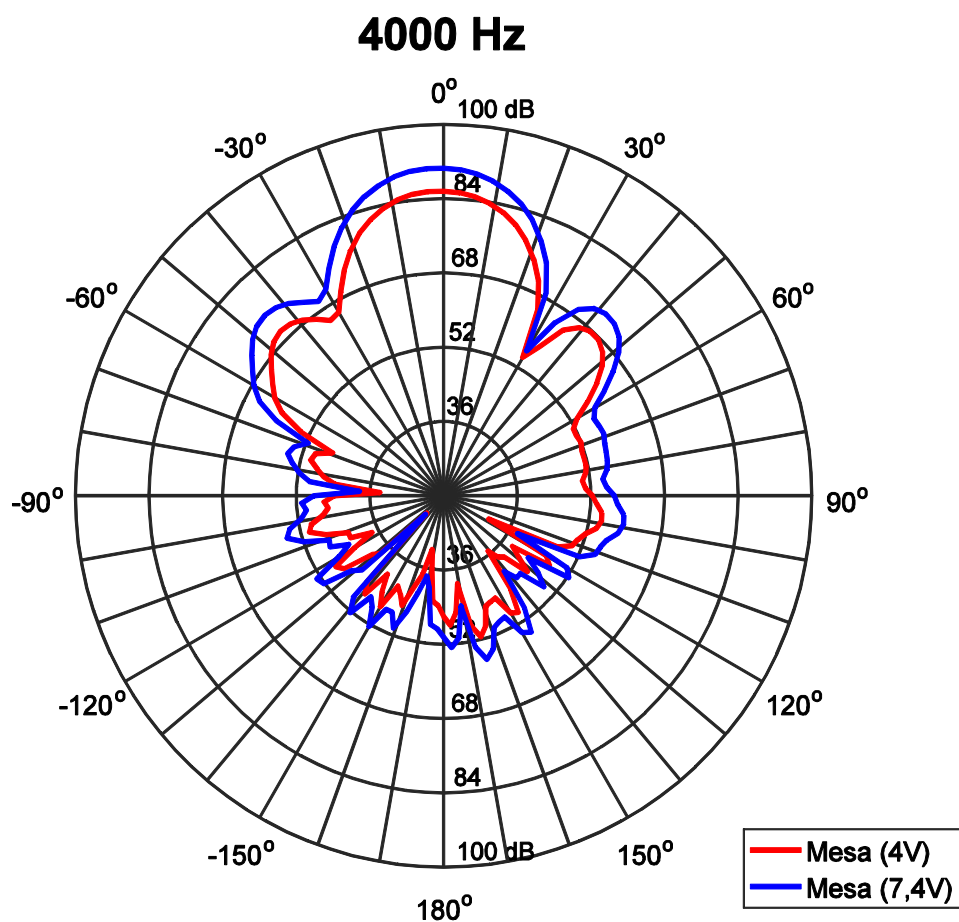
3.5 Naměřené výsledky

Následující podkapitola se bude zabývat porovnáváním a hodnocením naměřených výsledků směrových a frekvenčních charakteristik pro všechny typy ozvučnic a jejich varianty použitých v této práci.

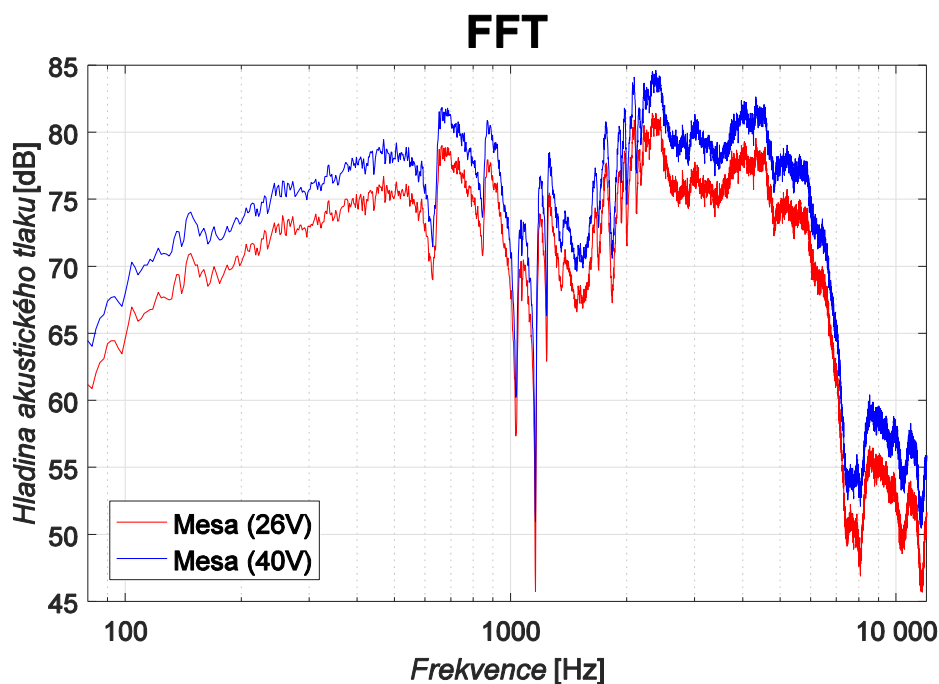
Jako výchozí bod pro ověření správnosti měření je nutno porovnat směrové i frekvenční charakteristiky z hlediska výkonu reproduktoru. Pro toto porovnání byla vybrána varianta s ozvučnicí typu Mesa. Graf 3.1 zobrazuje směrovou charakteristiku na

frekvenci 4 kHz pro obě napájecí napětí, 4 V a 7.4 V. V grafu 3.2 je zobrazena frekvenční odezva reproduktoru pro obě napájecí napětí 40 V a 26 V.

Z grafu směrové charakteristiky na 4 kHz je vidět, že až na několik drobnějších odchylek u nižších hladin se křivka menšího výkonu liší o konstantní úroveň od křivky vyššího výkonu a tvar směrové charakteristiky zůstává zachován. Graf frekvenční charakteristiky zobrazuje křivky stejného tvaru opět pouze posunuté o konstantní hladinu. Z těchto poznatků můžeme usuzovat, že měření pro oba výkony lze považovat za správné. V dalším grafech se tedy pro jednoduchost bude pracovat pouze s vyššími hodnotami napájecích napětí, se 7,4 V pro směrové charakteristiky a se 40 V pro frekvenční charakteristiky.



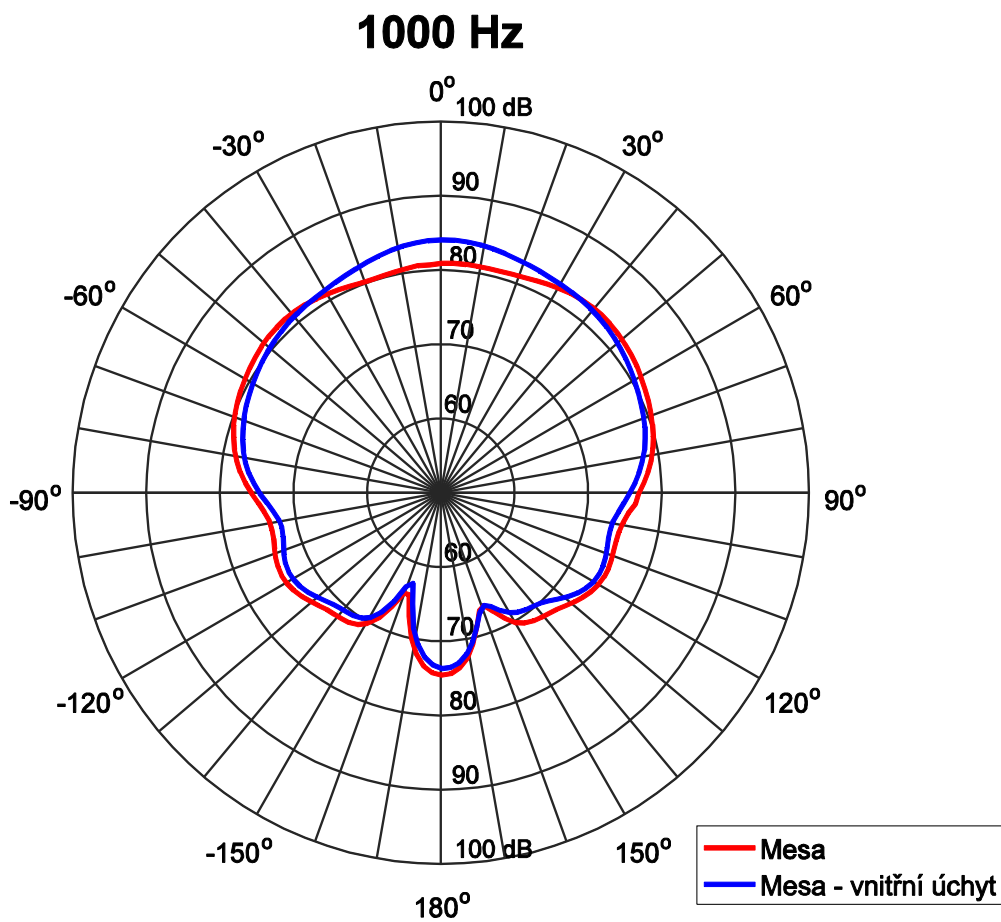
Graf 3.4 - typ Mesa, porovnání výkonů na 4 kHz



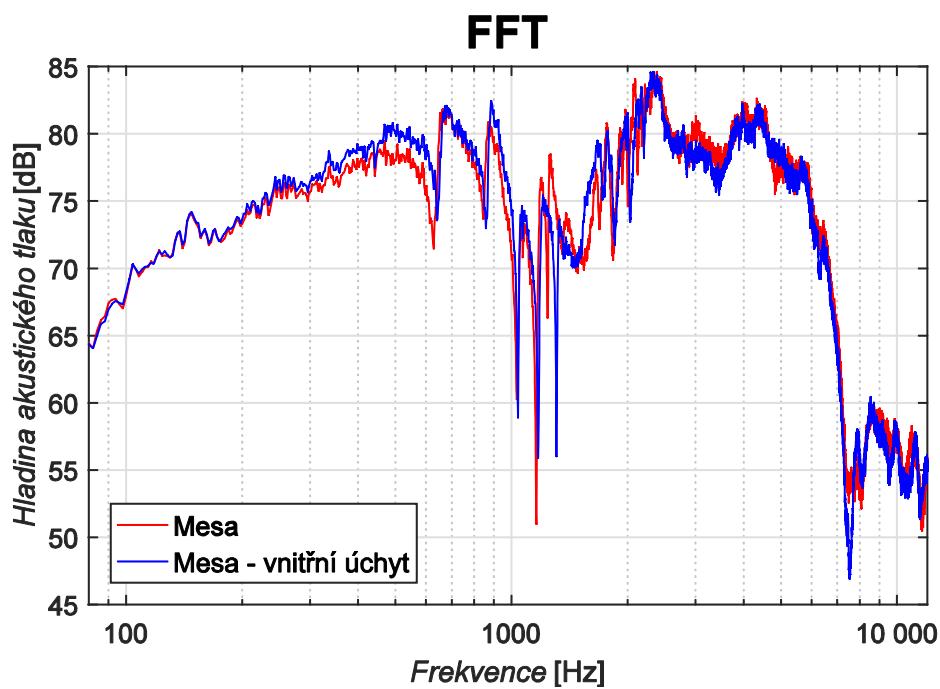
Graf 3.5 - typ Mesa, porovnání výkonů (FFT)

Jako další je zkoumán vliv stylu reproduktorového úchytu na výsledné charakteristiky. Na grafech 3.6 a 3.7 jsou vyobrazeny směrové a frekvenční charakteristiky pro ozvučnici typu Mesa s vnějším a s vnitřním úchyttem.

Z grafu směrové charakteristiky pro 1 kHz lze poznat, že pokud realizujeme úchyt na vnitřní straně přední desky ozvučnice, dosáhneme tím o něco větší směrovosti. Je tomu tak proto, že zvukovým vlnám z přední strany membrány, které směřují do stran, je do cesty postavena překážka v podobě hrany otvoru pro reproduktor. Některé zvukové vlny, které mají vlnovou délku srovnatelnou s šířkou této hrany, se od ní mohou odrazit do přímého směru vyzařování systému. Na frekvenční charakteristice se to projeví tak, že například v oblasti 1 kHz má vnitřně uchycený reproduktor zřetelný nárůst citlivosti. Na vyšších frekvencích okolo 6 nebo 7 kHz se jeho citlivost naopak trochu zmenšuje. Významně kratší vlnové délky se totiž na vystouplé hraně pohltí a přemění v tepelnou energii.



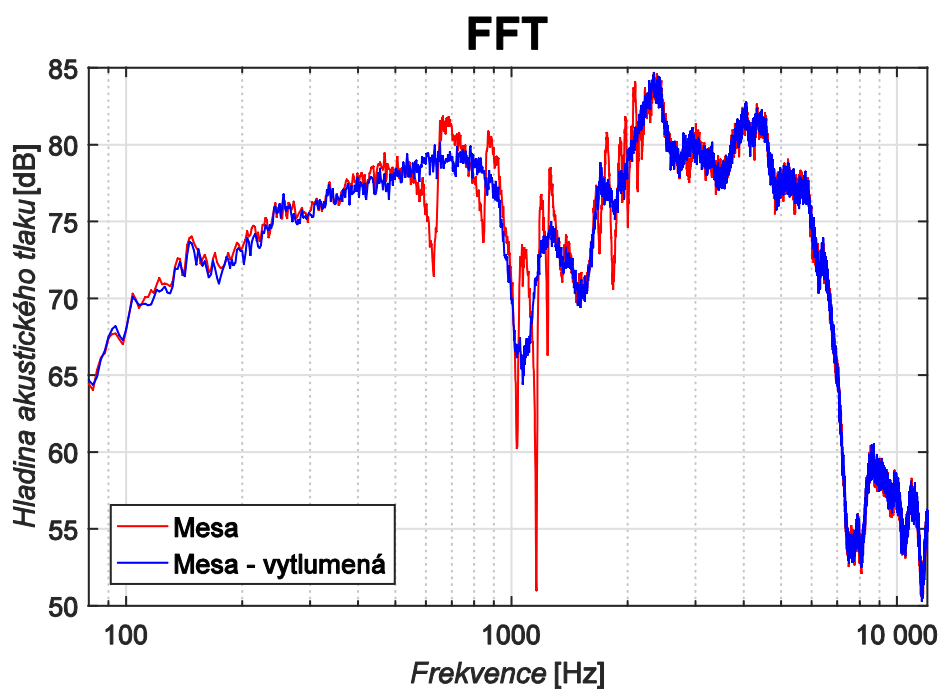
Graf 3.6 - typ Mesa, vliv úchytu na 1 kHz



Graf 3.7 - typ Mesa, vliv úchytu (FFT)

Posledním experimentem, který se týká ozvučnice typu Mesa, je její vytlumení pěnou Basotect. V grafu 3.8 je znázorněna frekvenční odezva ozvučnice s variantami bez vytlumení a s vytlumením.

Na frekvenci zhruba kolem 2 kHz je patrný propad citlivosti nevytlučené ozvučnice. Ten je nejspíše zapříčiněn špatnou těsností zadního připojovacího terminálu. Tlumicí materiál zde působí jako těsnění a propad křivky vytlučené ozvučnice proto není tak markantní, charakteristika takto neklesá na příliš nízké hladiny. Další výhodou je, že průběh frekvenční charakteristiky vytlučené ozvučnice je celkově více vyrovnaný a v oblasti mezi 1 a 5 kHz má oproti křivce nevytlučené ozvučnice daleko hladší průběh s minimem lokálních výkyvů.

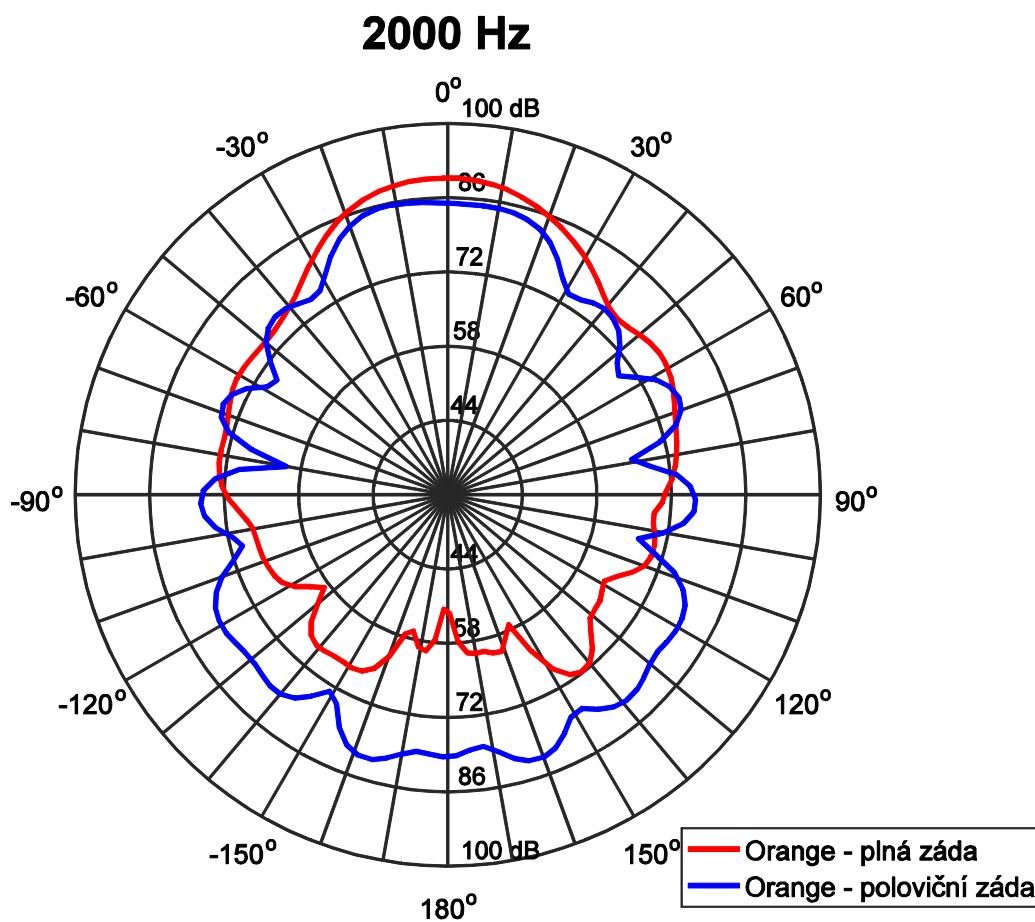


Graf 3.8 - typ Mesa, vliv vytlumení (FFT)

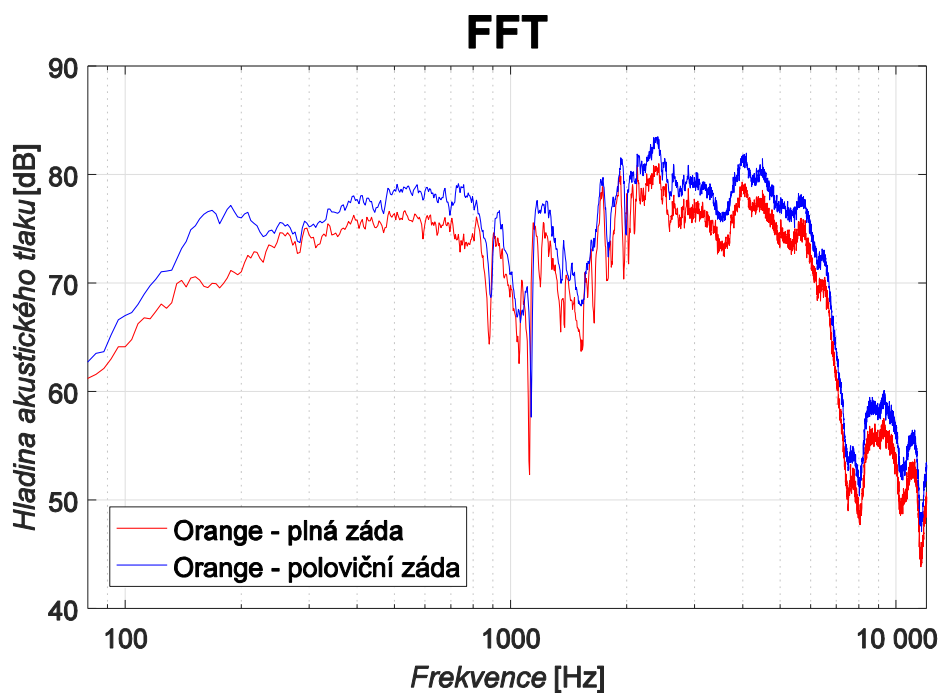
U ozvučnice typu Orange bude předmětem zájmu to, jak se na výsledných charakteristikách projeví typ zadního víka. Grafy 3.9 a 3.10 zobrazují směrové a frekvenční charakteristiky pro varianty s uzavřenou nebo polootevřenou zadní částí.

Rozdíl mezi uzavřenou a polootevřenou ozvučnicí je nejvíce patrný při vyšších frekvencích zhruba okolo 2 kHz. V tomto frekvenčním pásmu se většina vyzářeného výkonu ozvučnice s polootevřenými zády rozptýlí především do zadních směrů. Na

frekvenční charakteristice je vidět, že reproduktor s otevřenou ozvučnicí má o něco vyšší citlivost v celém frekvenčním pásmu, nejvíc v nízkofrekvenční oblasti kolem 200 Hz.



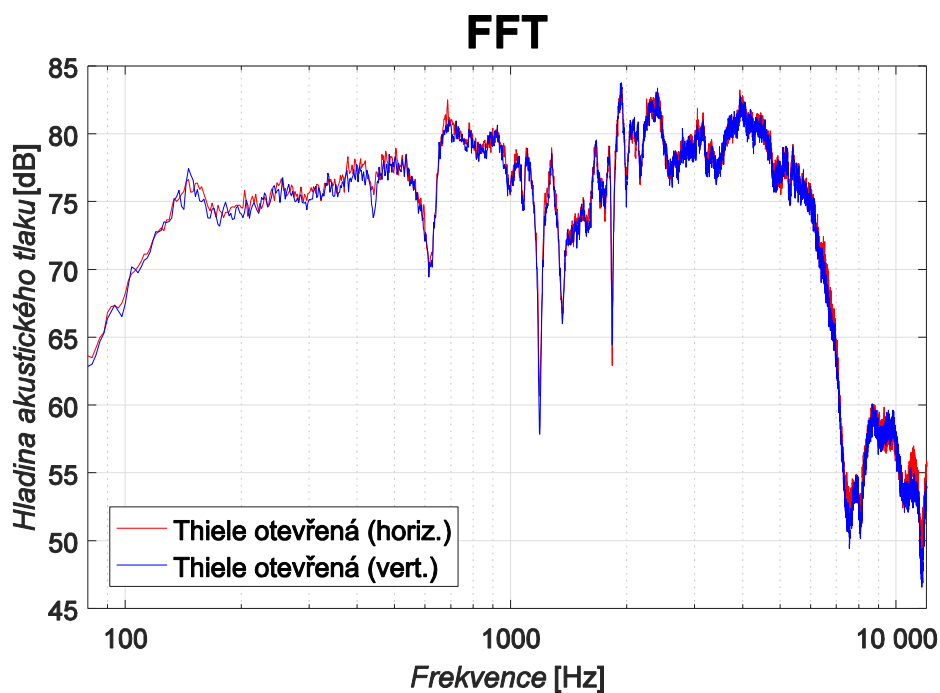
Graf 3.9 - typ Orange, vliv zadního víka na 2 kHz



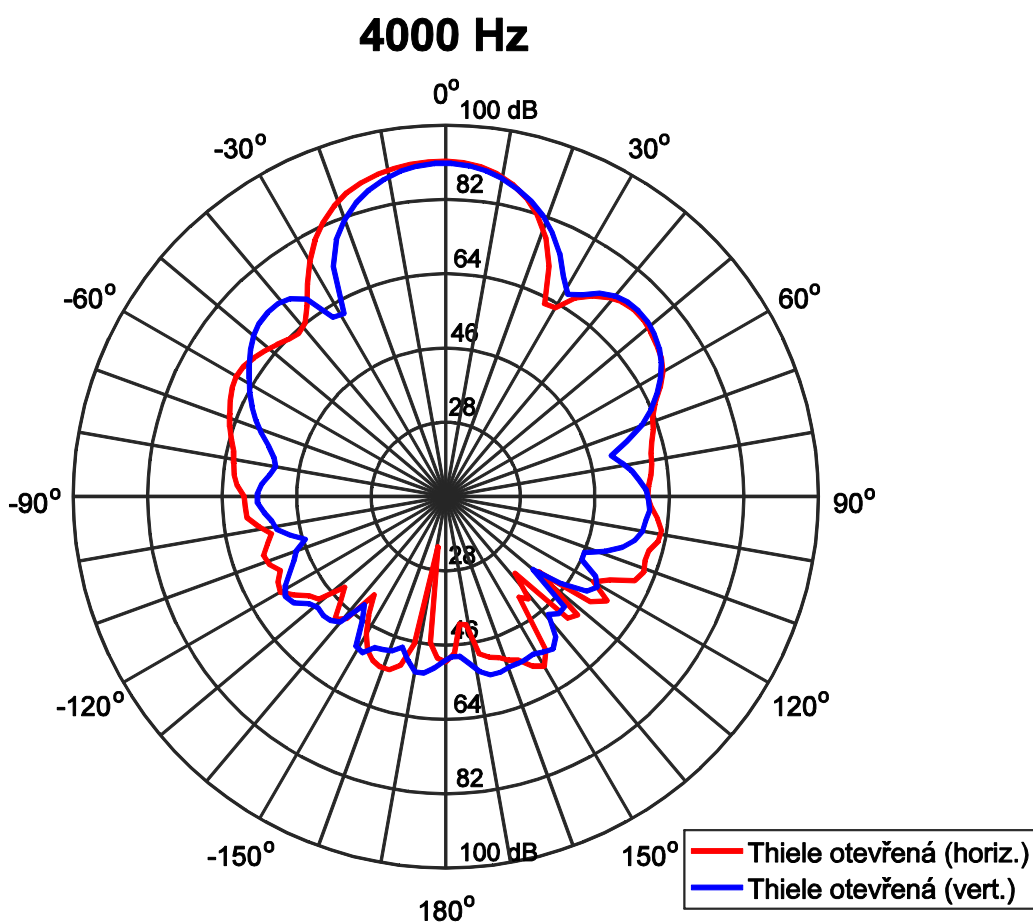
Graf 3.10 - typ Orange, vliv zadního víka (FFT)

Při měření směrových a frekvenčních charakteristik ozvučnice typu Thiele bylo využito dvou variant orientace skříně. Při prvním měření byla ozvučnice položena tak, aby bassreflexový tunel zaujal pozici (z pohledu od místa měřícího mikrofonu) po pravé straně od reproduktoru (horizontální orientace). Napodruhé byla ozvučnice postavena a její bassreflexový tunel byl takto umístěn pod reproduktorem (vertikální orientace). Všechny grafické reprezentace týkající se této ozvučnice proto počítají s oběma orientacemi skříně. Rozdíl mezi frekvenčními odezvami ozvučnice typu Thiele s rozdílnou orientací ve variantě s kompletně otevřeným bassreflexovým tunelem je znázorněn v následujícím grafu 3.11. Rozdíl ve směrových charakteristikách je zobrazen pro frekvenci 4 kHz v grafu 3.12 a pro frekvenci 500 Hz v grafu 3.13.

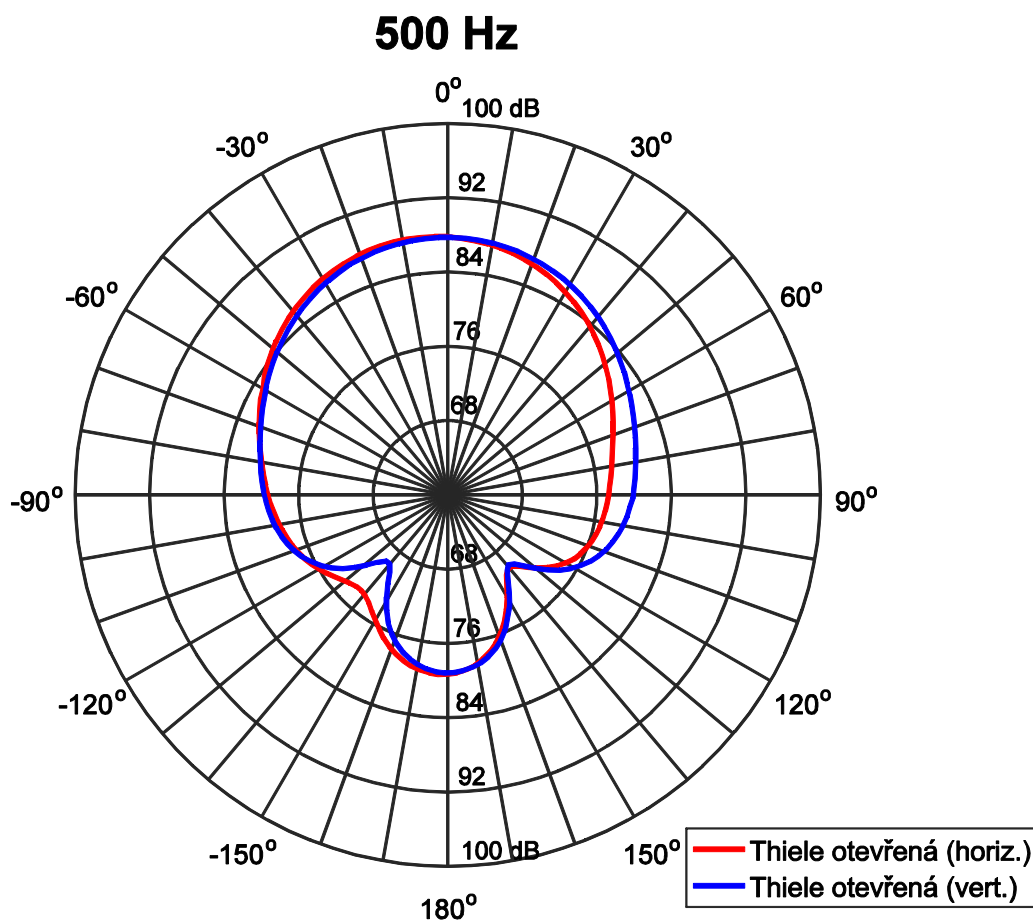
Mezi oběma frekvenčními křivkami je pouze málo patrný rozdíl, který vynikne až na velmi vysokých frekvencích, při vyšší směrovosti vyzáření. Na těchto frekvencích už stačí jen malé vychýlení ozvučnice z osy měřícího mikrofonu pro to, aby se tato drobná odchylka projevila na frekvenční charakteristice. Z hlediska citlivosti v tomto případě vítězí ozvučnice s horizontální orientací z důvodu lepšího namíření reproduktoru do osy měřícího mikrofonu. Na směrových charakteristikách pro obě frekvence je poznat, že signály u horizontálně orientované ozvučnice mají díky otevřenému bassreflexovému tunelu tendenci stáčet se do směru jeho vyzáření.



Graf 3.11 - typ Thiele, vliv orientace (FFT)



Graf 3.12 - typ Thiele, vliv orientace na 4 kHz

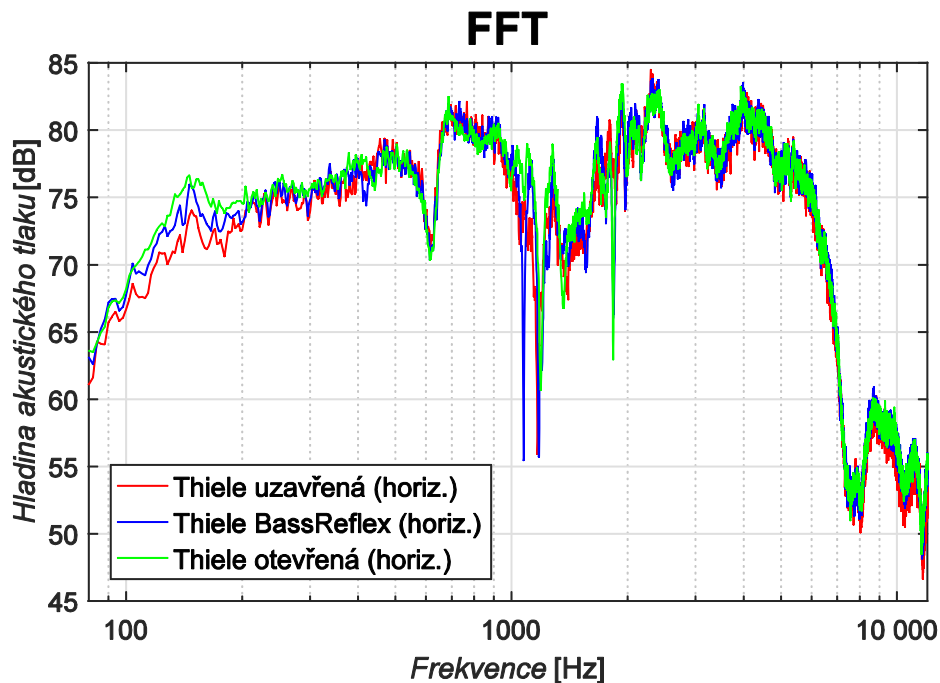


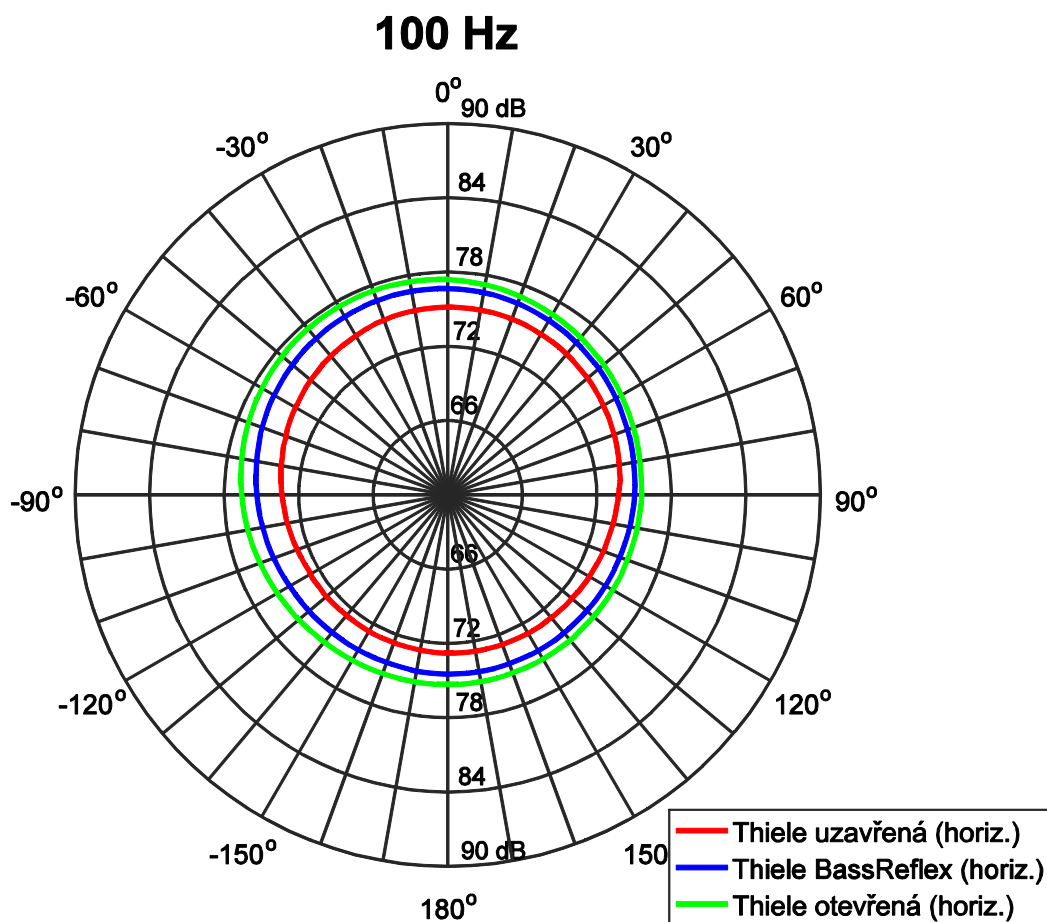
Graf 3.13 - typ Thiele, vliv orientace na 500 Hz

U této ozvučnice je dále třeba zaměřit se na porovnání všech výše zmíněných variant využití bassreflexového tunelu. Poprvé je celá délka tunelu úplně zakryta a ozvučnice při tomto nastavení bassreflexový systém nevyužívá. Podruhé je zakryta pouze prostřední část bassreflexového tunelu, třetí varianta potom počítá s jeho úplným otevřením. Frekvenční a směrové charakteristiky pro tyto tři varianty s horizontální orientací jsou znázorněny v grafu 3.14 a 3.15, s vertikální orientací pak v grafu 3.16 a 3.17.

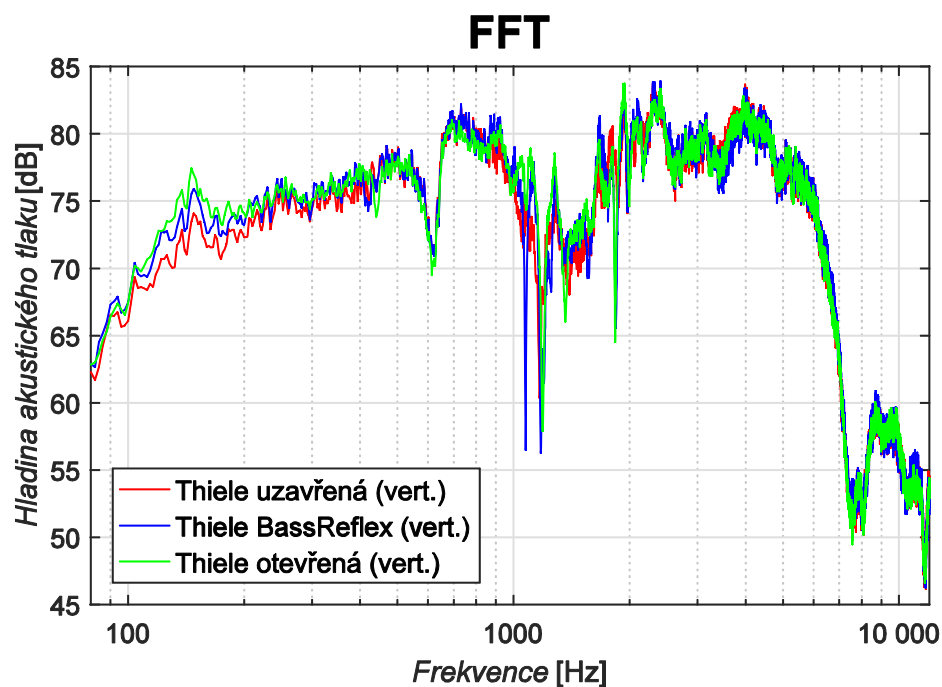
Frekvenční charakteristiky ukazují, že chování bassreflexového systému se nejvíce projeví na nízkých frekvencích v oblasti okolo 100 Hz. Směrové charakteristiky všech variant využití bassreflexu jsou proto vyobrazeny právě pro tuto frekvenci. Z obou grafů je patrné, že v tomto pásmu je hladina citlivosti reproduktoru v ozvučnici s otevřeným nebo částečně otevřeným bassreflexem o několik decibelů větší než v ozvučnici uzavřené. Tohoto jevu je dosaženo pomocí vhodného návrhu bassreflexových tunelů. Směrové charakteristiky otevřených variant ozvučnice se při její horizontální orientaci stáčí poněkud více doleva. Je tomu tak proto, že bassreflexový tunel je v této orientaci ozvučnice na její

levé straně a jeho vyzařování se tak projeví hlavně do levého směru. Na frekvenční charakteristice se dále projeví netěsnosti neuzavřených variant v oblasti mezi 1 a 2 kHz, kde na některých místech dochází k propadům citlivosti.

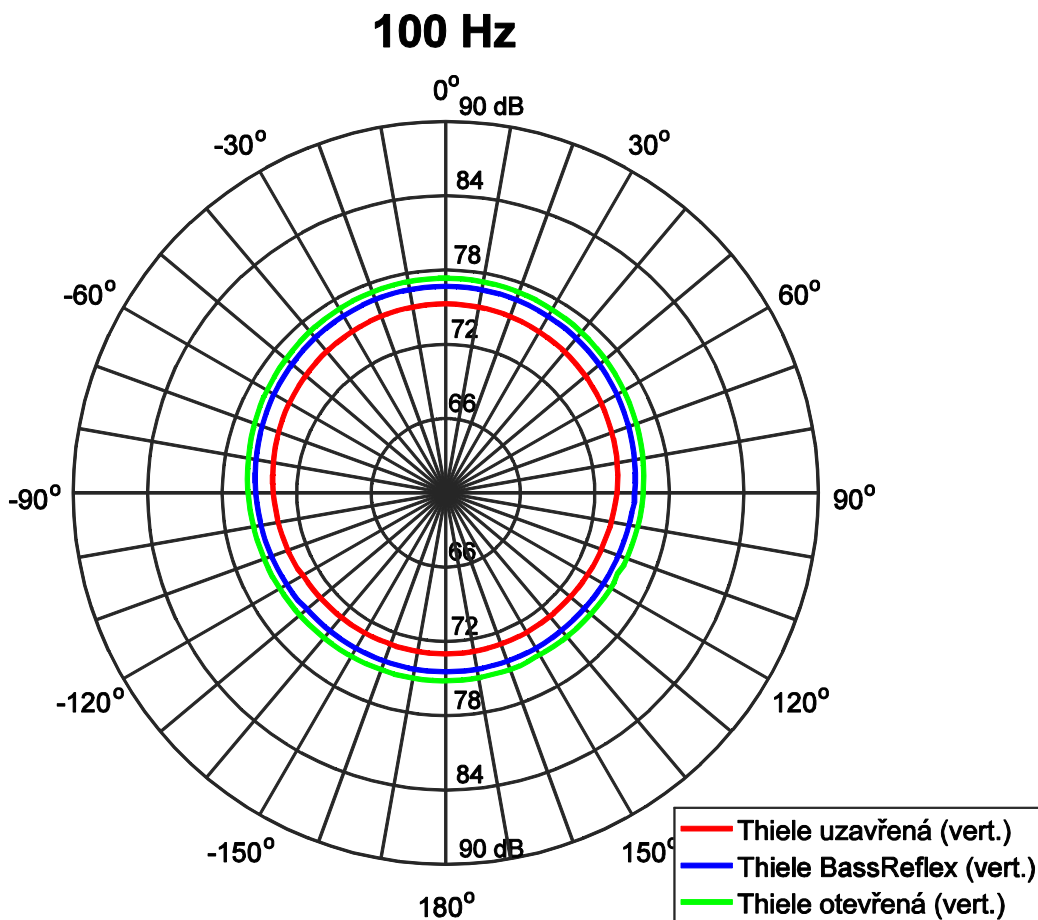




Graf 3.15 - typ Thiele horizontálně, vliv bassreflexu na 100 Hz



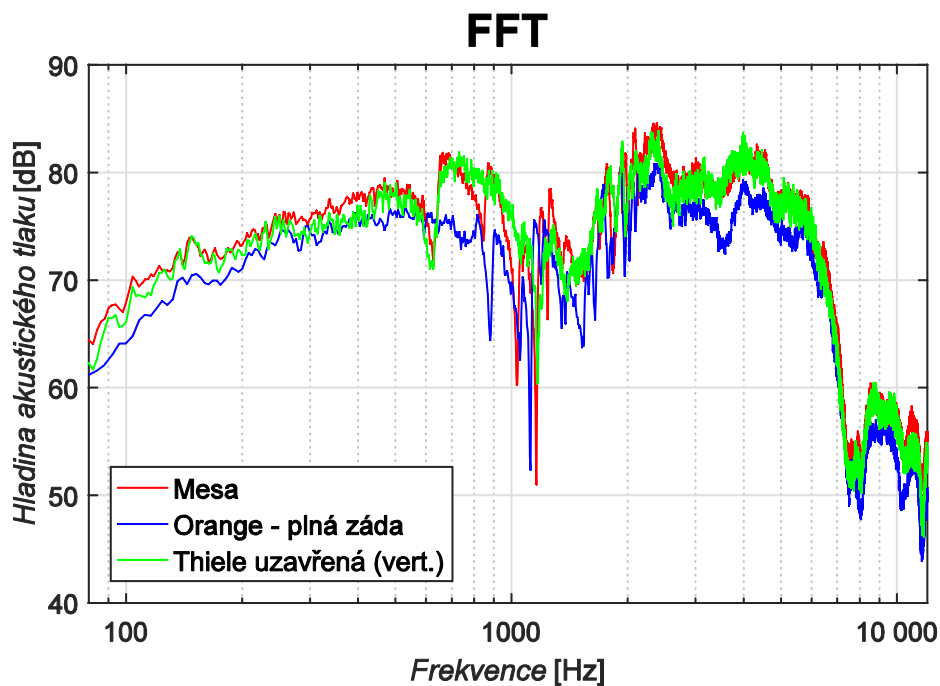
Obrázek 3.16 - typ Thiele vertikálně, vliv bassreflexu (FFT)



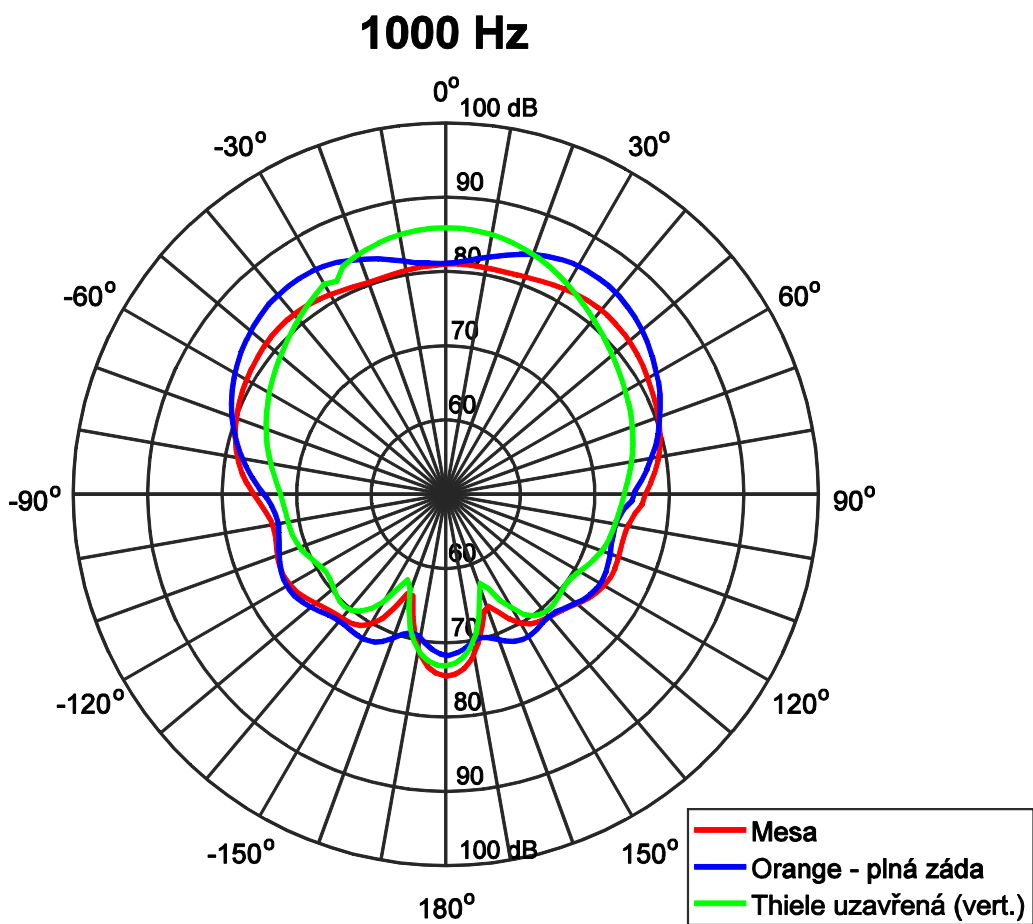
Obrázek 3.17 - typ Thiele vertikálně, vliv bassreflexu na 100 Hz

Pro objektivní posouzení vhodnosti daných konstrukcí je dále třeba zhodnotit a porovnat všechny jejich varianty s uzavřenou ozvučnicí. Jedná se tedy o typ Mesa bez vnitřního vylumení a s klasickým vnějším úchytem, typ Orange s celouzavřenou zadní stěnou a typ Thiele s uzavřeným bassreflexovým tunelem a s vertikální orientací.

Z grafu frekvenčních charakteristik je zřejmé, že uzavřená ozvučnice typu Orange má ze všech tří variant uzavřených ozvučnic nejmenší citlivost. Tento rozdíl citlivostí je nejvíce znatelný ve frekvenčním pásmu od 700 Hz do 1 kHz. Vlnová délka je na těchto frekvencích kratší než půl metru a odpovídá rozměrům skříně. Nárůst hladiny citlivosti u ostatních dvou ozvučnic může souviset s jejich rozdílnou vnitřní rezonancí. Jejich frekvenční křivky mají v tomto pásmu celkově větší výkyvy a propad v oblasti kolem 600 Hz. Směrové charakteristiky ukazují, že nejmenší ozvučnice typu Thiele má největší index směrovosti, zatímco nejméně směrově se chová nejširší ozvučnice typu Orange.



Graf 3.18 - Frekvenční charakteristiky uzavřených ozvučnic

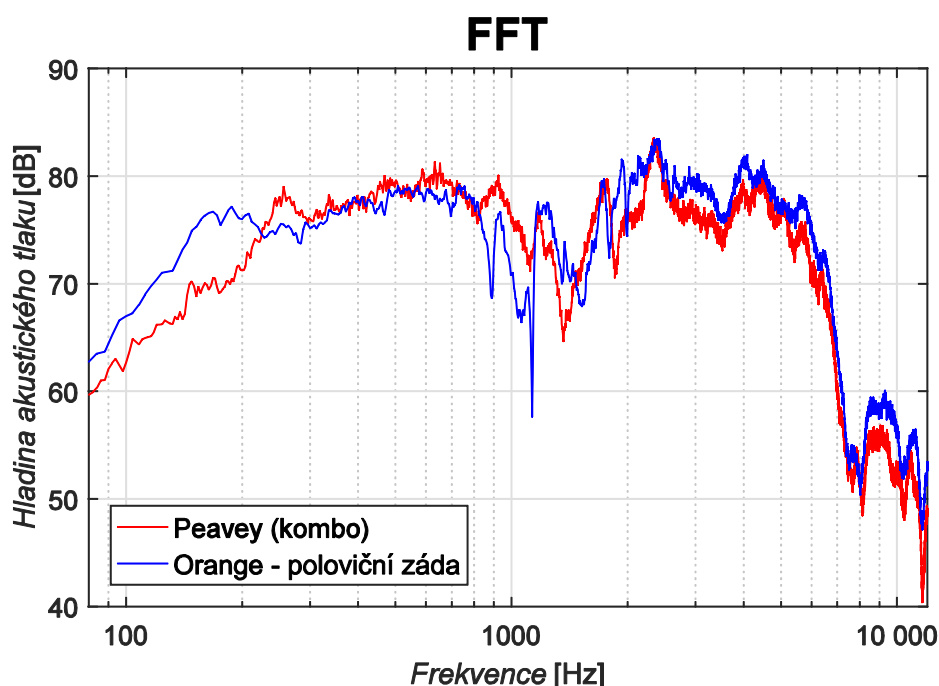


Graf 3.19 - Směrové charakteristiky uzavřených ozvučnic na frekvenci 1 kHz

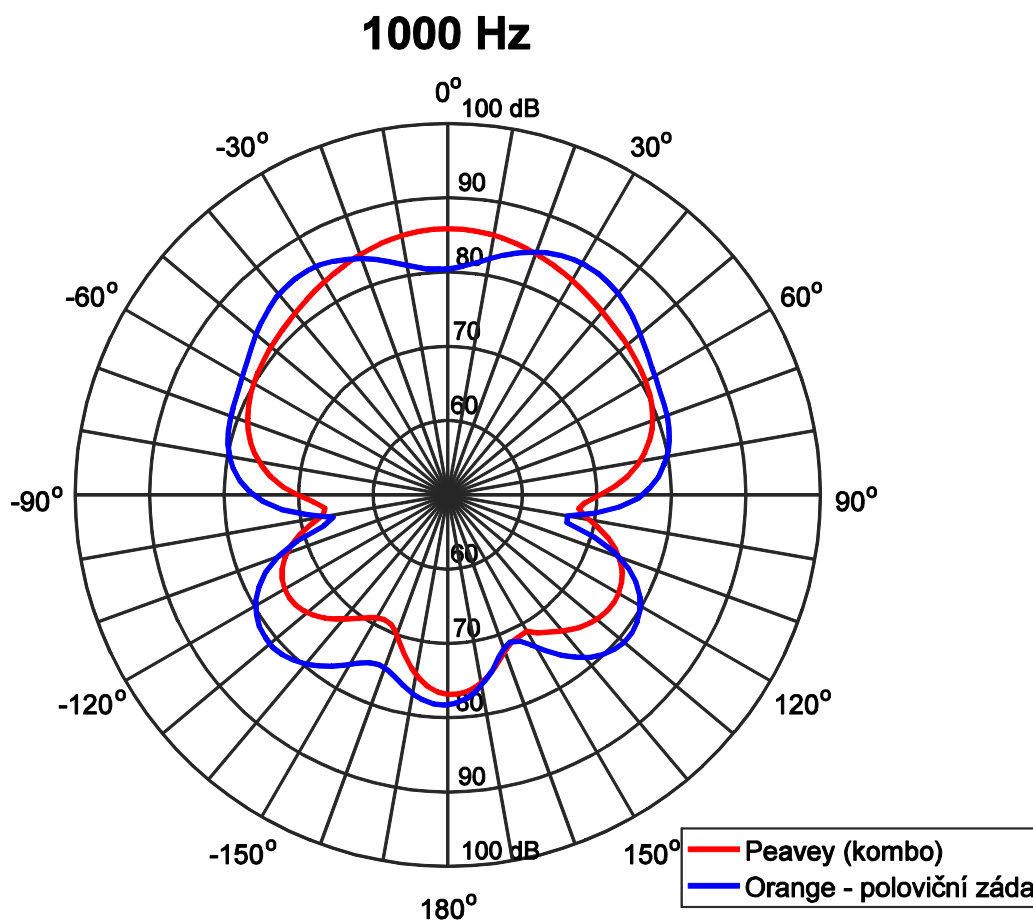
Na závěr je provedeno porovnání frekvenčních a směrových charakteristik s ozvučnicí značky Peavey. Pro tento účel byl zvolen principiálně nejpodobnější typ ozvučnice, tedy typ Orange s polootevřenou zadní stěnou. Objem ozvučnice Peavey je 27,41 l, zatímco objem modelu Orange je 42,76, tedy zhruba o patnáct litrů více. Z hlediska objemu by nejideálnější pro porovnání byla skříň typu Thiele, která má vnitřní objem 33,67 l, nicméně tato nebyla k dispozici ve variantě s otevřenou zadní stěnou.

Na nízkých kmitočtech kvůli menšímu vnitřnímu objemu kombo Peavey vůči ozvučnici Orange zaostává, v pásmu zhruba od 250 Hz do 1 kHz hraje díky vnitřním rezonancím silněji, ale na vyšších frekvencích opět převládá ozvučnice Orange. Je nutno uvést, že kombo Peavey má mírně zkosenou přední desku, osa reproduktoru je oproti ose měřicího mikrofону vychýlena a na vyšších frekvencích je u něj v důsledku toho naměřena menší citlivost.

Pro graf směrových charakteristik je zvolena frekvence 1 kHz, kde je dobře patrný rozdíl ve směrovosti obou ozvučnic. Zatímco vyzařování z ozvučnice Orange je v tomto pásmu relativně všesměrové, charakteristika menšího komba Peavey pomalu začíná vykazovat známky vyzařování do přímého směru a index směrovosti se u něj zvyšuje.



Graf 3.20 - typ Orange, srovnání s ozvučnicí Peavey (FFT)



Graf 3.21 - typ Orange, srovnání s ozvučnicí Peavey na 1 kHz

4 Závěr

Pro účely této bakalářské práce byly vyhotoveny tři modely ozvučnic z březové překližky s různými rozměry, shodnými s běžně používanými značkovými typy reproboxů. Cílem práce bylo zjistit, jakým způsobem tyto ozvučnice modifikují zvuk referenčního reproduktoru. Výsledky měření daných typů ozvučnic většinou odpovídaly očekávání a různé nesrovnalosti byly vysvětleny pomocí teoretických poznatků.

Pomocí měření bylo zjištěno, že nezáleží na tom, jak velký výkon je přiváděn na reproduktor. Tvar křivky frekvenční nebo směrové charakteristiky zůstane stejný, změní se pouze její hladina, a to o konstantní úroveň na všech bodech. U ozvučnice typu Mesa byl zjišťován vliv stylu úchyty reproduktoru k přední stěně skříně a vyšlo najevo, že vnitřní úchyt zajišťuje lepší směrovost reproboxu. Dále byla zkoumána varianta s vnitřním vylumením, která má podle výsledků výrazně hladší frekvenční charakteristiku, a proto je vhodná pro situace s požadavkem na kvalitnější reprodukci.

Ozvučnice typu Orange byla provedena ve dvou variantách, s uzavřenou nebo polootevřenou zadní stěnou. Z měření vyplynulo, že varianta s polootevřenou zadní stěnou dosahuje většího akustického výkonu a obohacuje kmitočtové pásmo o spodní frekvence čehož se hojně využívá u většiny kytarových reproboxů.

Bylo zjištěno, že orientace ozvučnice typu Thiele ovlivňuje na všech frekvencích směr jejího vyzářování. Bassreflexový systém instalovaný u této ozvučnice jí zaručuje rozšíření frekvenčního pásma směrem k nižším frekvencím, zejména ve variantě, kdy je bassreflexový tunel zcela otevřen. Toto je vhodné pro reprosoustavy, kde je požadavek pro hlubší, hutnější zvuk reproduktoru.

Dále bylo uskutečněno porovnání uzavřených variant všech tří typů vyrobených ozvučnic, při kterém se projevila různost jejich rozměrů. Nakonec byly proti sobě postaveny ozvučnice Peavey a model ozvučnice Orange s otevřenými zády. Byl zjištěn rozdíl na nízkých frekvencích a ve směrovosti reproboxů. Tyto dvě skříně jsou však objemově rozdílné, proto je nutno toto srovnání brát s určitou rezervou.

Výsledkem práce jsou mimo jiné i datové listy měřených reproboxů obsažené v příloze. Jsou v nich uvedeny informace o modelech, způsobu měření a reproduktoru použitém při měření. Dále obsahují parametry naměřené zvlášť pro každý reprobox, fotky jednotlivých skříní a výkresovou dokumentaci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] S. Wirsum, *Abeceda NF techniky*, 1st ed. Praha: BEN - technická literatura, 1998.
- [2] J. Reichl, “Elektrodynamický reproduktor,” *Encyklopedie fyziky*. 2007.
- [3] G. M. Ballou, *Handbook for Sound Engineers*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [4] K. Toman, *Reproduktory a reprosoustavy*, 1st ed. Orlová: DEXON, 2003.
- [5] B. Sýkora, “Reproduktory a reproduktorové soustavy,” *Amatérské radio*, vol. XLII, no. 5, pp. 163–197, 1993.
- [6] B. Sýkora, “Stavíme reproduktorové soustavy (I - IX),” *Amatérské radio*, no. I, 1997.
- [7] Basový reproduktor 15SW1300/Nd. In: *Dexon.cz* [online]. Karviná: DEXON CZECH. Dostupné z: <http://www.dexon.cz/katalog/reproduktory/basove-reproduktory/15sw1300-nd-reproduktor-basovy.html>
- [8] Celestion Vintage 30. In: *Celestion.com* [online]. Ipswich. Dostupné z: http://celestion.com/product/1/vintage_30/
- [9] IEC 60268-5. *Sound System Equipment - Part 5: Loudspeakers*. 3rd edition. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2003.
- [10] F. Vobbe, “TL806 Builders Plans,” *Electro-Voice*, 2010.
- [11] E. G. Strasse and A. Lösungen, “Für hörbar bessere Raumakustik,” *Audiofoam*.
- [12] RICKMAN, Steve. Directional plot. In: *Mathworks.com* [online]. 2014. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/1251-dirplot>

Přílohy

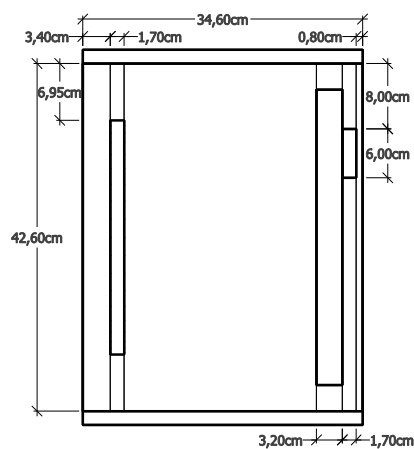
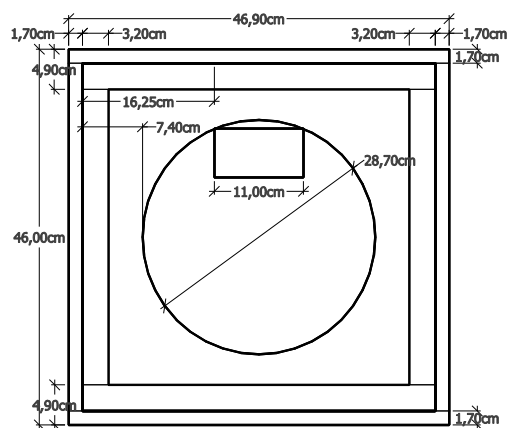
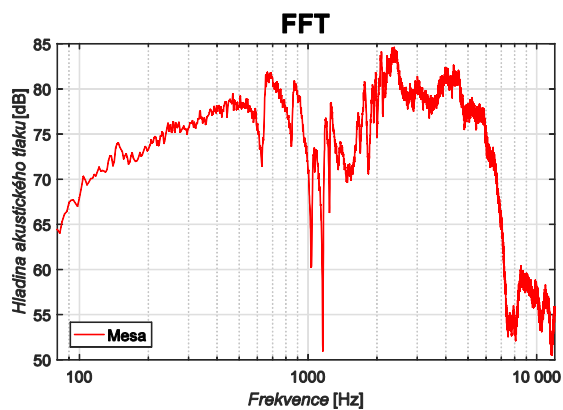
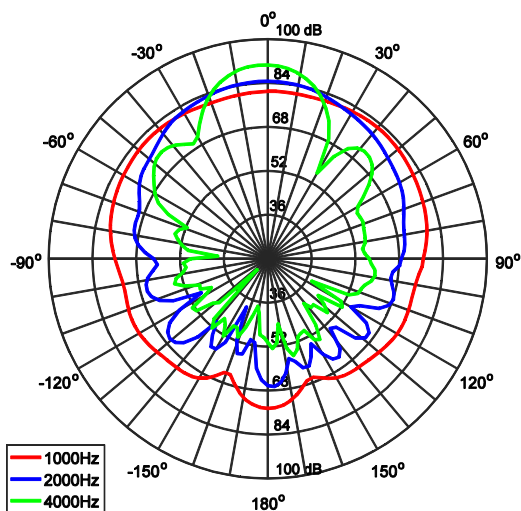
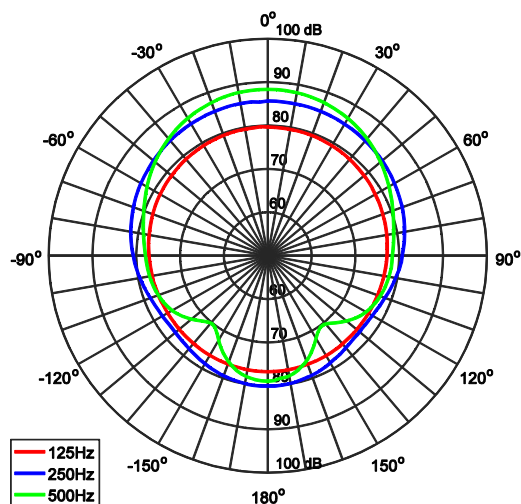
Příloha A - Datasheet pro reprobox 1

Model: Mesa 1×12 Recto

Objem [l]: 48,4

Reproduktor: Celestion 30 Vintage, 16Ω

Měřeno ve vzdálenosti 2 m od mikrofonu,
s napětím na reproduktoru 7,4V, resp. 40V
pro směrové, resp. frekvenční charakteristiky



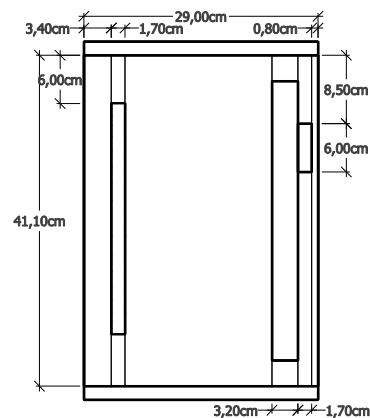
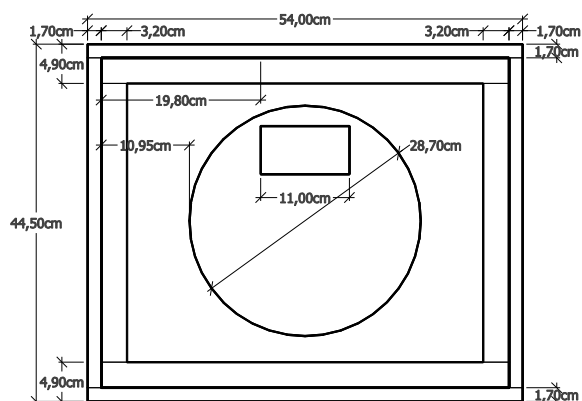
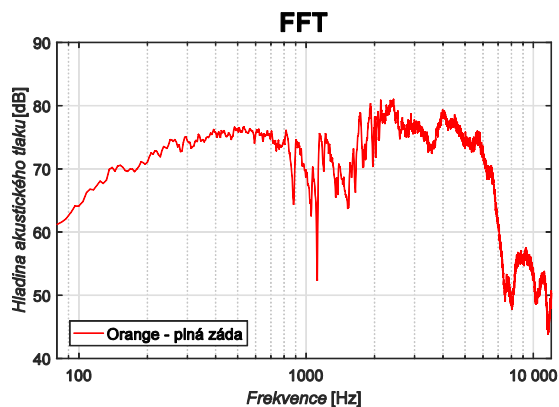
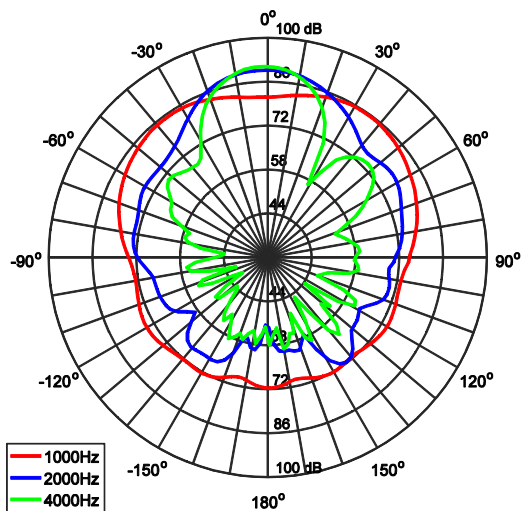
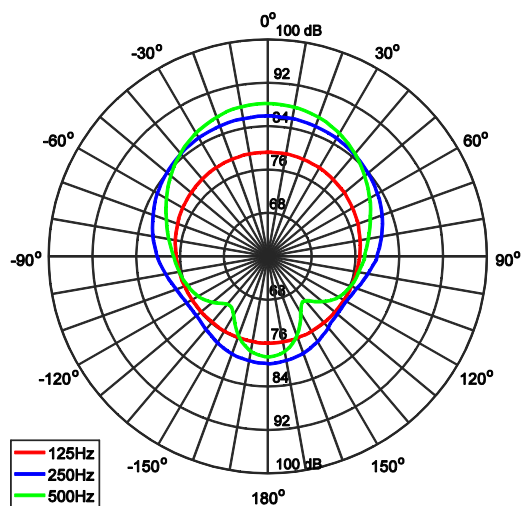
Datasheet pro reprobox 2

Model: Orange PPC112
(uzavřená varianta)

Objem [l]: 42,76

Reproduktor: Celestion 30 Vintage, 16Ω

Měřeno ve vzdálenosti 2 m od mikrofonu,
s napětím na reproduktoru 7,4V, resp. 40V
pro směrové, resp. frekvenční charakteristiky



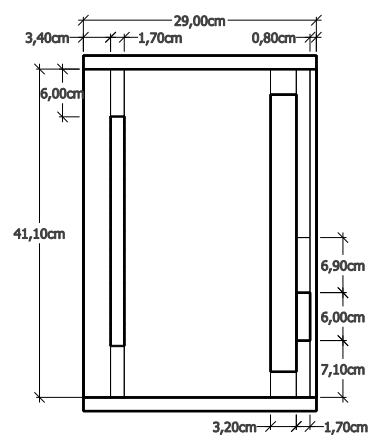
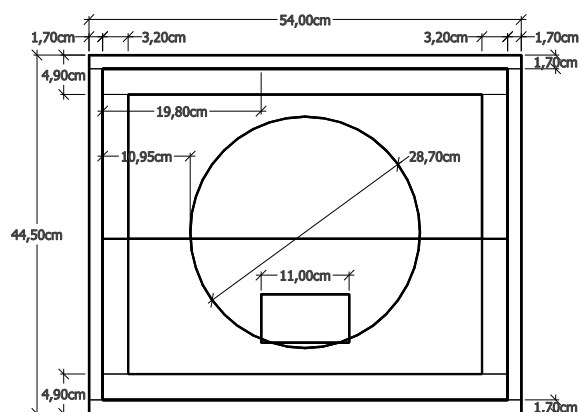
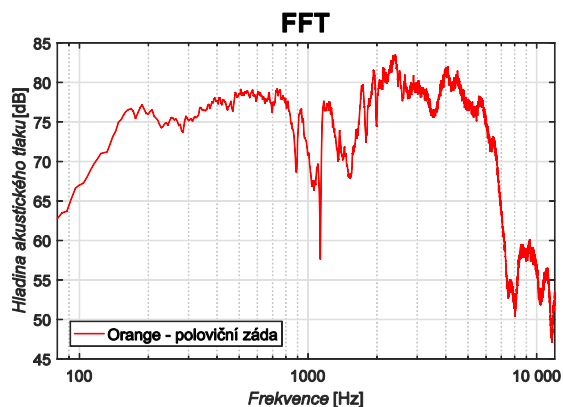
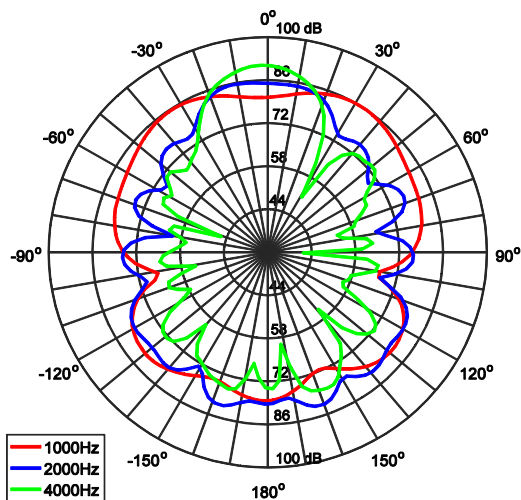
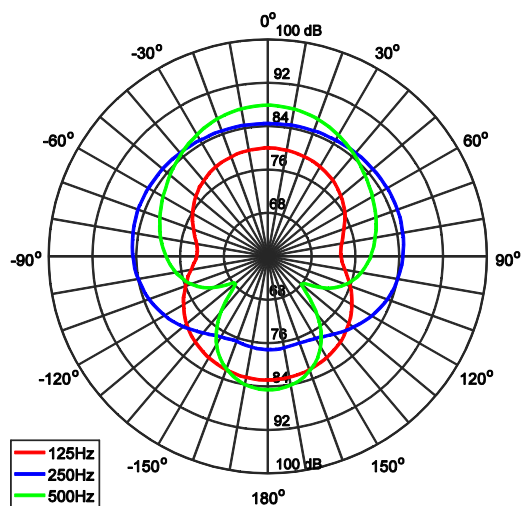
Datasheet pro reprobox 3

Model: Orange PPC112
(otevřená varianta)

Objem [l]: 42,76

Reproduktor: Celestion 30 Vintage, 16Ω

Měřeno ve vzdálenosti 2 m od mikrofonu,
s napětím na reproduktoru 7,4V, resp. 40V
pro směrové, resp. frekvenční charakteristiky



Datasheet pro reprobox 4

Model: EV-TL806
(částečně otevřený BR)

Objem [l]: 33,67

Reproduktor: Celestion 30 Vintage, 16Ω

Měřeno ve vzdálenosti 2 m od mikrofonu,
s napětím na reproduktoru 7,4V, resp. 40V
pro směrové, resp. frekvenční charakteristiky

