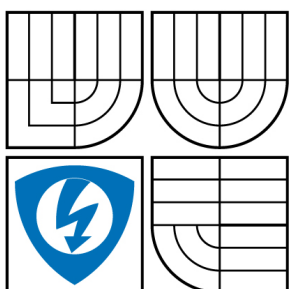


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

BEZODRAZOVÁ KOMORA MALÝCH ROZMĚRŮ PRO MĚŘENÍ ELEKTROAKUSTICKÝCH MĚNIČŮ

ANECHOIC SMALL SIZED CHAMBER FOR ELECTROACOUSTICAL TRANSDUCERS
MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

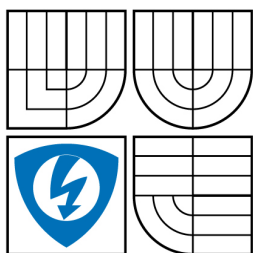
RICHARD MICHALEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Richard Michalec

ID: 72912

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Bezodrazová komora malých rozměrů pro měření elektroakustických měničů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte bezodrazovou skříň se zabudovaným širokopásmovým reproduktorem pro měření kmitočtových charakteristik mikrofonů. Při návrhu se soustředte zejména na potlačení odrazů zvukového vlnění, tlumení stojatých vln a volbu rozměrů měřicí části skříňe z hlediska homogenity zvukového pole v místě umístění měřeného mikrofonu. Zvolte vhodný širokopásmový budicí reproduktor a proveďte měření jeho modulové kmitočtové charakteristiky při zabudování do reproduktorové části skříňe. Proveďte měření modulové kmitočtové charakteristiky zvoleného mikrofonu v klasické bezodrazové komoře a vámi zkonstruované skříni, porovnejte je a zhodnoďte přesnost měření kmitočtových charakteristik mikrofonů v bezodrazové skříni.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 2.6.2009

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

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací bezodrazové komory malých rozměrů pro měření elektroakustických měničů. V teoretické části popisuje vlastnosti reproduktoru, ozvučnic, vznik stojatého vlnění a metody k jeho potlačení. Následně obsahuje návrh s výpočty této komory a vyhodnocení zkušebního měření mikrofону v této komoře.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with proposal and implementation of anechoic small sized chamber for electroacoustical transducers measurements. The theoretical part describes the properties of the loudspeakers, cabinet, the creation of the standing waves and methods for its suppression. The thesis includes the suggestion of this chamber with calculations and the evaluation of the test measurement microphone in this chamber.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezodrazová komora, reproduktor, mikrofón, tlumicí materiál, stojaté vlnění

KEYWORDS

Anechoic chamber, loudspeaker, microphone, sound absorption material, standing wave

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MICHALEC, R. *Bezodrazová komora malých rozměrů pro měření elektroakustických měničů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Bezodrazová komora malých rozměrů pro měření elektroakustických měničů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D., za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování práce.

OBSAH

Úvod	1
1 Základy prostorové akustiky	2
1.1 Šíření zvuku v reálném prostředí.....	2
1.1.1 Odraz zvuku.....	2
1.1.2 Pohltivost zvuku, činitel zvukové pohltivosti	3
1.1.2.1 Používané konstrukce	3
1.2 Stojaté vlnění	5
2 Reproduktor	6
2.1 Parametry reproduktorů	6
2.1.1 Náhradní schéma reproduktoru	6
2.1.2 Rozměry reproduktorů.....	7
2.1.3 Modulová kmitočtová charakteristika	7
2.1.4 Impedance, impedanční charakteristika reproduktoru.....	8
2.1.5 Nominální impedance.....	9
2.1.6 Směrová charakteristika, index směrovosti.....	9
2.1.7 Charakteristická citlivost reproduktoru	10
2.1.8 Příkon reproduktoru.....	10
2.1.9 Rezonanční kmitočet	11
2.2 Rozdělení reproduktorů	11
2.3 Širokopásmový reproduktor	11
3 Ozvučnice	14
3.1 Uzavřená ozvučnice.....	15
3.2 Konstrukce ozvučnice.....	17
3.2.1 Obecné zásady	17
3.2.2 Materiály pro konstrukci ozvučnice	17
3.2.2.1 MDF (Medium density fibreboard).....	17
3.2.3 Spojování stěn a zajištění těsnosti ozvučnice	18
4 Návrh bezodrazové komory pro měření elektroakustických měničů	19
4.1 Návrh uzavřené ozvučnice a výběr vhodného reproduktoru.....	19
4.1.1 Výpočet objemu ozvučnice	20
4.1.2 Počítačová simulace uzavřené ozvučnice.....	21

4.2	Návrh bezodrazové komory.....	22
4.2.1	Tlumicí materiály	23
4.2.2	Potlačení stojatého vlnění.....	23
4.2.3	Konstrukce bezodrazové skříně a umístění mikrofonů	24
4.3	Grafický návrh.....	28
5	Měření.....	29
5.1	Modulová kmitočtová charakteristika bezodrazového boxu.....	29
5.2	Modulová kmitočtová charakteristika mikrofonu Shure PGE 588	31
	Závěr.....	38
	Použitá literatura.....	39
	Seznam zkratk.....	40
	Přílohy	41
A	Katalogový list reproduktoru.....	41
B	Katalogový list tlumícího materiálu VICOUSTIC Flexi panel A50.....	45

ÚVOD

Tato bakalařská práce se zabývá problematikou bezodrazové komory pro laboratorní měření modulových kmitočtových charakteristik elektroakustických měničů (mikrofonů). Jedním z důvodů použití této komory je uvolnění velké bezodrazové komory pro měření ostatních laboratorních úloh v předmětu Elektroakustika.

První část je věnovaná teorii prostorové akustiky, reproduktorů a tlumících materiálů. Navazuje popsání problematiky ozvučnic (jejích druhů) a početní postup při výpočtech uzavřené ozvučnice.

Druhá část začíná návrhem uzavřené ozvučnice s výpočty a simulací zhotovené pomocí programového vybavení. Následuje návrh bezodrazové komory malých rozměrů s použitím tlumících materiálů a akustických úprav. Na návrh navazuje popis konstrukce a technická a fotografická dokumentace. Posledním bodem je výsledné měření realizované bezodrazové komory, které je zhodnoceno v závěru práce.

1 ZÁKLADY PROSTOROVÉ AKUSTIKY

Akustika je velmi složitý a obsáhlý obor. Zabývá se fyzikálními ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem. Zjednodušeně řečeno se zvukové vlny přenášejí pružnou deformací prostředí, ve kterém se šíří.

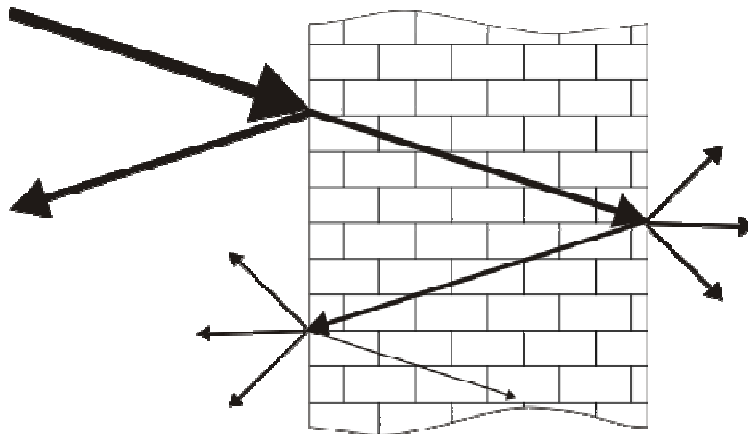
Prostorová akustika je odvětví, ve kterém se řeší šíření zvuku (vlnění) uvnitř prostoru, přičemž se nezabývá zdroji zvuku. Zvuk může vzniknout v prostoru nebo do něj vniknout z vnějšku.

1.1 ŠÍŘENÍ ZVUKU V REÁLNÉM PROSTŘEDÍ

Zvuk se šíří ve volném prostoru přímočaře od zdroje ve vlnoplochách, které často pro zjednodušení považujeme za kulové a rovinné. Výsledný tvar vlnoplochy se může změnit průchodem, nebo odrazem od překážky. Kulová vlnoplocha též nabývá vlastností rovinné ve značné vzdálenosti od zdroje. Ideální zdroj kulové vlnoplochy je minimálních rozměrů. Kulové vlnoplochy se též vytvoří průchodem vlnoplochy přes štěrbinu malých rozměrů.

1.1.1 Odraz zvuku

Přímočarost šíření vlnění od svého zdroje v homogenním poli lze využít k analogii šíření paprsků, která pomáhá snadnější představě o šíření a odrazech vlnění. Tato analogie dále neuvažuje se šířením pohybujících se molekul v prostředí, ale uvažuje šíření zvuku pouze jako paprsky nebo jako vlnoplochy. Na Obr. 1.1 jsou naznačeny základní jevy, které nastanou při nárazu zvukové vlny na pevnou překážku.



Obr. 1.1 Dopad zvukového paprsku na překážku [2]

- Při dopadu na rozhraní se část odrazí (platí úhel dopadu = úhel odrazu) a zbytek energie vnikne do překážky.
- Zbývající energie se šíří materiálem překážky v podobě zvukových vln v pevném prostředí a při tomto šíření se část zvukové energie mění na teplo. Z toho vyplývá, že se zvukové vlny tlumí.
- Část zvukové energie šířící se překážkou vystoupí na druhé straně překážky (resp. přepážky), část se prostřednictvím odrazů uvnitř překážky vrátí – samozřejmě dále utlumená – zpět do té části vzduchového prostředí, odkud přišel primární paprsek.

Aby se uplatnil odraz podle Snellova principu [1] (tj. úhel odrazu = úhel dopadu), musí překážka být větších rozměrů než je vlnová délka zvukového vlnění.

1.1.2 Pohltivost zvuku, činitel zvukové pohltivosti

Pohlcování zvuku je nevratná přeměna jeho energie na jinou energii (nejčastěji na tepelnou).

Schopnost pohltivosti zvuku nejlépe popisuje činitel zvukové pohltivosti α . Je definován jako poměr energie W_p pohlcené určitou plochou k energii W_d na tuto plochu dopadající, tj.[1]

$$\alpha = \frac{W_p}{W_d}. \quad [1] (1.1)$$

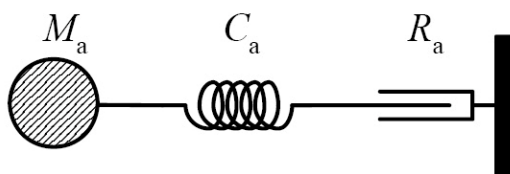
Je to bezrozměrné číslo, které udává poměrnou ztrátu energie při kolmém dopadu (a odrazu) na pevnou překážku. Činitel pohltivosti je obecně frekvenčně závislý. Frekvenční průběh činitele zvukové pohltivosti se uvádí pomocí grafu, nebo tabulky pro normalizované kmitočty, které jsou nejčastěji v rozmezí 100 Hz až 10 kHz [4]. Hodnota $\alpha = 0$ označuje dokonalou odrazivost materiálu a hodnota $\alpha = 1$ dokonalou pohltivost (pro příslušný kmitočet zvukové vlny). Většina běžných tlumících materiálů má největší činitel tlumení pro střední a vyšší kmitočty. Pro efektivní tlumení nízkých kmitočtů se často využívají speciální konstrukce rezonančního principu (basové pasti).

1.1.2.1 Používané konstrukce

Nejběžněji používané konstrukce se mohou z hlediska principu pohlcování zvuku dělit do tří skupin:

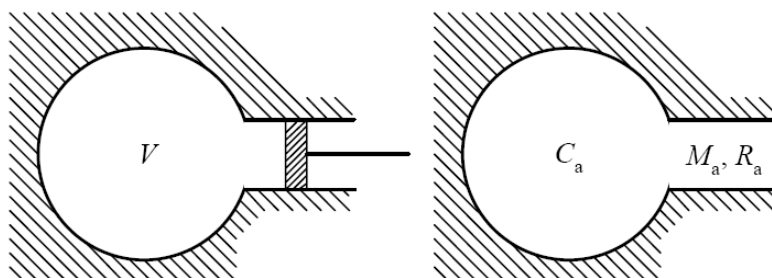
1. **Konstrukce s porézními materiály:** pevné látky, v jejímž objemu se nachází malé dutinky vyplněné vzduchem (asi 60 % až 95 % celkového objemu). Materiály vykazují stejnosměrný akustický odpor, který látka klade průchodu zvukového proudu. Dynamický odpor klade látka při střídavém proudu vzduchu a je závislý na kmitočtu popř. i amplitudě. [1]
2. **Konstrukce využívající rezonančního principu:**

- a) Kmitající membrány nebo desky: rezonanční soustava skládající se z hmoty M_a upevněné na poddajnost C_a , jejíž pohyb je tlumen odporem R_a . Dopadne-li na ni zvukové vlnění, uvede ji do vynuceného kmitání. Přestane-li vlnění dopadat, bude ještě jistou dobu dokmitávat při vlastním rezonančním kmitočtu. Tím je energie zvukového vlnění s různými kmitočty přeměněna na energii vlnění s jedním kmitočtem (často infrazvukovým). Soustava musí být dostatečně tlumena, aby se co největší množství zvukové energie přeměnilo v teplo. [1]



Obr. 1.2 Schéma mechanické nebo akustické rezonanční soustavy [1].

- b) Princip Helmholtzových rezonátorů: Helmholtzův rezonátor je tvořen dutinou o objemu V opatřenou hrdlem, v níž se nachází určitá hmota, kterou může představovat píst. Vlastností objemu je poddajnost C_a , píst představuje akustickou hmotu M_a . Pohyby pístu a akustické hmoty klade určitý odpor tření, který má velikost R_a . [1]



Obr. 1.3 Schéma Helmholtzova rezonátoru [1].

3. **Složené konstrukce:** ostatní typy konstrukcí, které nejsou založeny výhradně na principu předešlých dvou. Vycházejí z myšlenek, že každý materiál pohlcuje, různé jejich kombinace atd. [1]

1.2 STOJATÉ VLNĚNÍ

Definice stojaté vlny se nejčastěji vysvětluje na napnuté struně, která má oba konce dokonale upevněny. Jedno z podání definice stojatého vlnění: „Jestliže dvě sinusové vlny o stejné amplitudě a se stejnou vlnovou délkou postupují v napnuté struně opačným směrem, vzniká jejich interferencí stojatá vlna.“ V akustice si tento jev můžeme vysvětlit jako pohyb vlny, která se pohybuje kolmo mezi dvěma rovnoběžnými dostatečně velkými a dokonale odrazivými ($\alpha = 0$) stěnami. Přímá vlna dopadající kolmo na stěnu se odrazí a pokračuje zpět v opačném směru odkud přišla, v důsledku toho vznikne vlna odražená. Odražená vlna se na druhé straně znovu odrazí a cyklus se dále opakuje. Obě vlny mají stejnou amplitudu a vlnovou délku. Výslednou interferencí těchto vln vzniká stojaté vlnění, které charakterizuje dva druhy bodů tzv. uzly a kmitny rychlosti. Kmitna je bod, ve kterém je amplituda vlnění maximální. V uzlu je amplituda rovna nule. Pokud se vzdálenost stěn rovná celočíselnému násobku poloviny vlnové délky, zůstává poloha kmiten a uzlů konstantní – kmitny a uzly jakoby stojí na místě, odtud název stojatá vlna. Zásadně platí, že pro jakýkoliv geometrický útvar, ohraničený dokonale odrazivými plochami vymezující tak nějaký prostor, se vždy dá najít nekonečně velký počet kmitočtů, pro které se v tomto prostoru vytvoří stojaté vlny. Tyto kmitočty se také nazývají vlastní módy prostoru a získají se řešením příslušných vlnových rovnic. Pokud odrazivé plochy budou i částečně pohlcovat neztratí se stojaté vlnění úplně, ale vytvoří se také soustava nepohyblivých kmiten a uzlů, rozdíl je jen v tom, že hodnota té které veličiny není v uzlu přesně nulová, ale vykazuje jen lokální minimum. V uzavřeném prostoru pouze vytvořením šikmých stěn se stojaté vlnění neodstraní. Aby se toho dosáhlo musí stěny zároveň vlnění pohlcovat. Čím více se bude koeficient pohltivosti α blížit k hodnotě 1, tím bude rozdíl mezi maximem a minimem akustického tlaku v systému stojatých vln menší – menší vjem stojatého vlnění v prostoru. Při dokonale pohlcujících stěnách ($\alpha = 1$) se stojaté vlnění nevytvoří vůbec. [2]

2 REPRODUKTOR

Reproduktor je zařízení k přeměně elektrické energie na zvuk. Je také obecně označován jako elektroakustický měnič. V následujícím textu bude popisován reproduktor elektromagnetický.

2.1 PARAMETRY REPRODUKTORŮ

Parametry reproduktoru se nejčastěji popisují pomocí:

- **Mechanické parametry:** rozměry, hmotnost atd.
- **Všeobecné parametry:** maximální standardizovaný příkon, citlivost, jmenovitá impedance, frekvenční rozsah atd.
- **Thiele – Small parametry:** popisují reproduktor jakožto mechanicko – elektrickou soustavu (činitel jakosti, rezonanční kmitočet, poddajnost atd.)
- **Grafické vyjádření:** frekvenčně – amplitudové, směrové, impedanční a jiné charakteristiky.

Špičkoví výrobci mají všechny důležité parametry popsané v katalogových listech důkladně popsány včetně použitých materiálů na výrobu jednotlivých částí reproduktoru.

2.1.1 Náhradní schéma reproduktoru

Pro odvození náhradního schématu reproduktoru se využívá velmi užitečná elektromechanické analogie. Základní převodní vztahy [4]:

- Síla $F \Leftrightarrow$ napětí U
- Rychlost $v \Leftrightarrow$ proud I
- Poddajnost $c \Leftrightarrow$ kapacita C
- Hmotnost \Leftrightarrow indukčnost L
- Mechanický odpor \Leftrightarrow odpor R

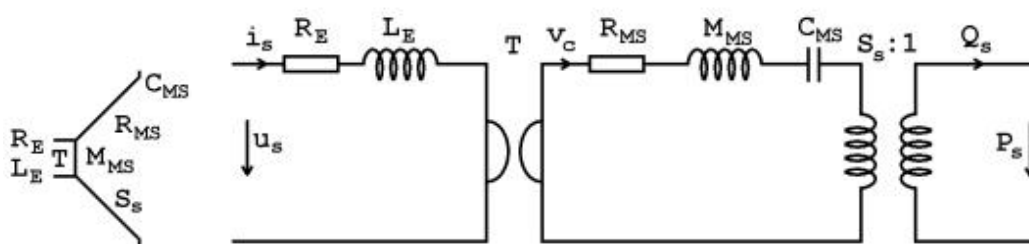
Mechanická i elektrická soustava je analyzována pro harmonické signály.

Při použití uvedených převodních vztahů můžeme například převést mechanickou sílu F , která působí na vodič o délce l umístěný v elektromagnetickém poli B , kterým prochází proud I na napětí U

$$F = B \cdot l \cdot I \Leftrightarrow U = B \cdot l \cdot I$$

Výsledný vzoreček popisuje funkci gyrátoru, který převádí proud na napětí, odpor na vodivost, indukčnost na kapacitu atd. Charakterizuje se pomocí tzv. gyrační konstanty.

Jako gyrátor působí v reproduktoru kmitací cívka v magnetu a její gyrační konstantou je silový faktor (force factor) neboli Bl faktor. Bl faktor vypovídá o síle hnacího ústrojí, prakticky závisí na délce l vodiče cívky v magnetickém poli magnetu a jeho indukci B . [4]



Obr. 2.1 Náhradní schéma reproduktoru s gyrátorem a transformátorem

R_E – stejnosměrný odpor kmitací cívky

L_E – indukčnost kmitací cívky

T – Bl faktor (gyrační konstanta)

R_{MS} – mechanický odpor systému a sloupce vzduchu

M_{MS} – hmotnost kmit. systému a sloupce vzduchu

C_{MS} – poddajnost závěsu membrány

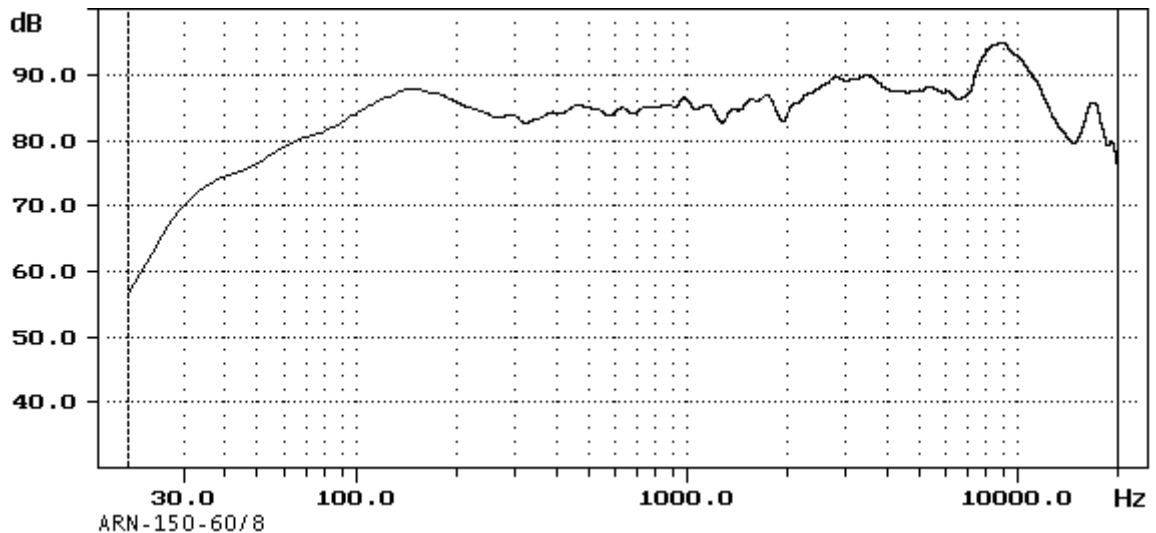
S_s – aktivní plocha membrány

2.1.2 Rozměry reproduktorů

Mezi hlavní mechanické rozměry patří největší průměr reproduktoru, pro který se často užívá jednotka palec. Dále to jsou rozteče umístění montážních otvorů pro uchycení pomocí šroubů, montážní otvor, velikosti magnetu, hloubka a velikost zápusťné hrany reproduktoru.

2.1.3 Modulová kmitočtová charakteristika

Kmitočtová – amplitudová charakteristika definuje závislost akustického tlaku na kmitočtu. Podmínky měření musí být přesně definovány. Nejčastěji měřeno v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m a příkonu 1 VA. To znamená, že na ose y se promítne citlivost reproduktoru (dB) a na x ose v logaritmickém měřítku kmitočtet (Hz). Ukázka modulové kmitočtové charakteristiky je uvedena na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Ukázka modulové kmitočtové charakteristiky

2.1.4 Impedance, impedanční charakteristika reproduktoru

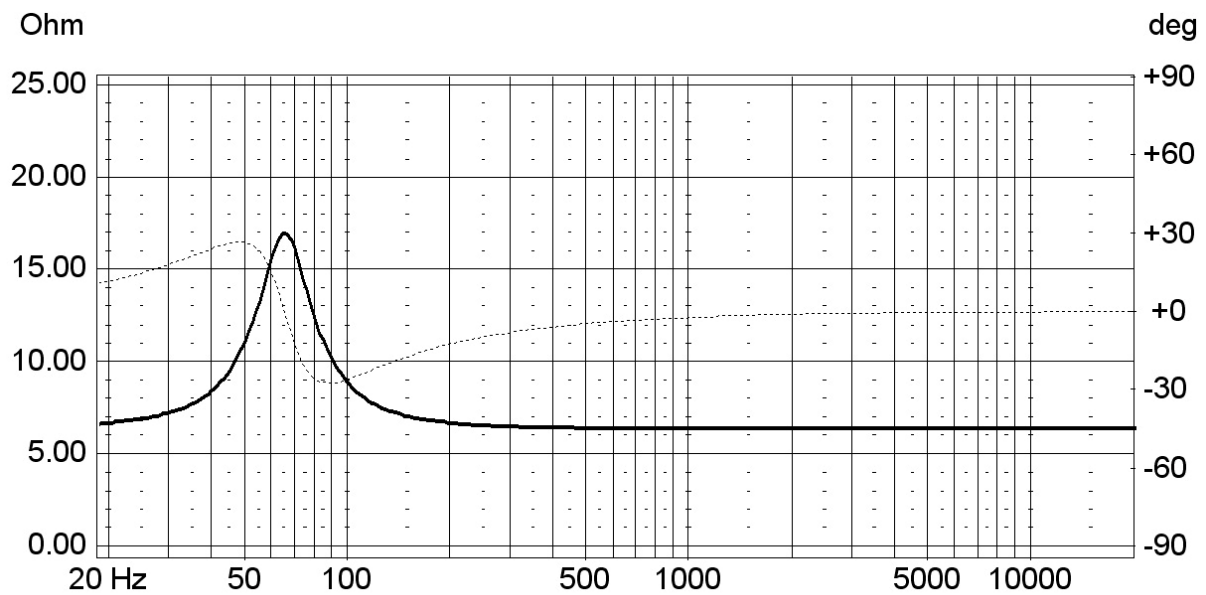
Impedance reproduktoru obsahuje činnou a reaktanční složku, proto se na ní musí pohlížet jako na kmitočtově závislou veličinu komplexního charakteru. Její zápis je

$$\mathbf{Z} = R_e + jX_R \text{ nebo } \mathbf{Z} = Z \cdot e^{j\varphi} . \quad (2.1)$$

Impedance se udává pomocí impedanční charakteristiky, která vyjadřuje kmitočtový průběh jejího modulu (absolutní hodnoty)

$$|\mathbf{Z}| = \sqrt{R_e^2 + X_R^2} . \quad (2.2)$$

Z impedanční charakteristiky se určují důležité parametry reproduktoru. Nejpatrnější je rezonanční kmitočet, pro který modul impedance nabývá svého výrazného lokálního maxima. Z tvaru impedanční charakteristiky (v místě rezonance) lze určit některé hodnoty T-S (Thiele - Small) parametrů (mechanický, elektrický a celkový činitel jakosti) [3]. Dále lze určit nominální impedanci reproduktoru viz 2.1.5. a činný odpor kmitací cívky R_e , který se měří pomocí stejnosměrného proudu, kdy impedance vykazuje pouze činný odpor.



Obr. 2.3 Impedanční charakteristika znázorňující modul a fázi impedance reproduktoru

2.1.5 Nominální impedance

Jedním z hlavních katalogových dělení reproduktorů je podle nominální impedance. Udává se jako číselný údaj v ohmech a nečastěji nabývá hodnot 4, 6, 8, 16 ohmu. Určuje se z impedanční charakteristiky v místě lokálního minima nad rezonančním kmitočtem.

2.1.6 Směrová charakteristika, index směrovosti

Vyzařování membrány je směrově závislé, tudíž hladina akustického tlaku se nemění pouze se vzdáleností od reproduktoru, ale i s azimutem bodu, ve kterém je akustický tlak snímán, vůči akustické ose reproduktoru. Směrová charakteristika je funkcí akustického tlaku na úhlu od osy vyzařování reproduktoru. Pro reproduktory s konickou kruhovou membránou (tvar rotačního objektu) se uvažuje jedna směrová charakteristika. Jiný případ nastává u tlakových výškových reproduktorů s využitím zvukovodů, u kterých se nejčastěji udávají směrové charakteristiky pro horizontální a vertikální vyzařování, z důvodu odlišných vyzařovacích uhlů zvukovodu. Měření je nutné provádět v homogenním prostředí a v dostatečné vzdálenosti od zdroje, která je nesrovnatelná s vlnovou délkou měřeného signálu. Měření probíhá buzením reproduktoru harmonickým signálem o určitém kmitočtu a mění se buď poloha měřícího mikrofону po kružnici okolo měniče, nebo se otáčí samotný měnič a poloha mikrofону zůstává stejná. Výsledek se zásadně zakresluje do polárních souřadnic. Ve většině případu do společného grafu pro více kmitočtů. [4]

Číselně vyjadřuje tvar směrové charakteristiky index směrovosti. K jeho určení potřebujeme znát akustický výkon izotropního (nesměrového) zářiče P_a , který má směrovou charakteristiku kružnice. Jeho výkon je dán vztahem

$$P_a = \frac{4\pi \cdot r^2 \cdot p^2}{c_0 \cdot \rho} \text{ [w]}, \quad [4] \text{ (2.3)}$$

kde r je poloměr kružnice (vzdálenost vlnoplochy od zdroje), ρ hustota vzduchu, c_0 rychlost zvuku a p je akustický tlak.

Jakýkoliv směrový zářič vyzařuje do poloprostoru menší výkon než je P_a a to výkon P_t . Pomocí těchto dvou výkonů lze vypočítat index směrovosti I_D a to podle vztahu

$$I_D = 10 \log \frac{P_a}{P_t} \text{ [dB]}. \quad [4] \text{ (2.4)}$$

Pro půlkruhovou směrovou charakteristiku vychází směrový index 3 dB. Index je samozřejmě kmitočtově závislý – různé tvary směrových charakteristik pro měřené kmitočty. S rostoucí kmitočtem obvykle roste i index směrovosti. Z praktického hlediska udává, jak velký výkon se přeneso mimo hlavní směr vyzařování. [4]

2.1.7 Charakteristická citlivost reproduktoru

Charakteristická citlivost reproduktoru udává jaký akustický tlak vytvoří reproduktor ve vzdálenosti 1m při zdánlivém příkonu 1 VA. Jinými slovy udává účinnost přeměny elektrické energie na vlnění (zvuk). Neuvádí se v procentech, ale v dB (1 m, 1 VA). Přibližný převod mezi procenty a dB – 1% = 92 dB. Účinnost přeměny elektrické energie na zvuk je velmi malá, většina elektrické energie se přemění v teplo. Reproductory pro spotřební elektroniku mají nejčastěji citlivost 84 až 94 dB, reproduktory pro ozvučení koncertů a velikých prostranství dosahují citlivosti 105 dB a více. [3]

2.1.8 Příkon reproduktoru

Dlouhodobý příkon se označuje jako RMS (Root Mean Square), AES (Audio Engineering Society) nebo Nominal power a jeho jednotkou je Watt. Určuje se podle příslušných norem. Definuje se jako výkon růžového šumu, kterým je buzen reproduktor po dobu dvou hodin v udaném frekvenčním pásmu. Během této doby nesmí reproduktor změnit své mechanické a akustické vlastnosti. Příkon zaleží na konstrukci kmitací cívky (velikosti), schopnosti odvodu tepla od cívky a pevnosti všech mechanických částí

membrány. Dnešní elektrodynamické reproduktory (hlubokotónové) dosahují nominálních příkonů až 1000 W.

2.1.9 Rezonanční kmitočet

Modul elektrické impedance nabývá v místě rezonančního kmitočtu svého hlavního maxima, které je zřetelně vidět na impedanční charakteristice. Rezonanční kmitočet je úzce spjat s prostředím, ve kterém je reproduktor umístěn, proto musí být při udávání této hodnoty přesně udány podmínky měření. Katalogový údaj se uvádí pro měření zavěšeného reproduktoru ve volném prostředí. Umístěním reproduktoru do ozvučnice se rezonanční kmitočet zvýší z důvodu snížení poddajnosti závěsu membrány, tj. v elektromechanické analogii znázorněno zvýšením tuhosti pružiny k .

2.2 ROZDĚLENÍ REPRODUKTORŮ

Přehled nejjednodušších a nejznámějších dělení [4]:

podle frekvenčního rozsahu:

- hlubokotónové,
- středotónové,
- vysokotónové
- širokopásmové

podle principu činnosti:

- Elektrodynamický měnič
- Elektromagnetický měnič
- Elektrostatický měnič
- Magneto striktní měnič
- Piezoelektrický měnič
- Odporový měnič

2.3 ŠIROKOPÁSMOVÝ REPRODUKTOR

Označení širokopásmový reproduktor spadá do kategorie rozdělení podle přenášeného frekvenčního rozsahu. Anglicky označován jako full range driver. Tento měnič se nejčastěji vyrábí v průměrech od 3“ do 8“ (cca 7 cm až 20 cm). Výjimku tvoří profesionální koaxiální měniče, které se vyrábějí až do velikosti 15“ (koaxiální

konstrukce). Jeho hlavním požadavkem je široký frekvenční rozsah, který by obsáhl co největší část slyšitelného pásma. Návrh takového měniče je hledáním optimálních kompromisů, protože žádný z reproduktorů sám kvalitně neobsáhne celé slyšitelné pásmo. Pro přenos nejnižších kmitočtů je potřeba větších rozměrů membrány s velkou výchylkou, naopak pro přenos nejvyšších kmitočtů musí být kmitací membrána lehká (tzn. malá). Tento nedostatek se kompenzuje speciálními konstrukcemi membrán, nebo přidáním vysokotónového měniče (koaxiální reproduktor). Tento typ reproduktoru má široké možnosti použití od levných průmyslových instalací, hi-fi aplikací, profesionální velkoplošné použití až po nejdražší studiové monitory.

Rozdělení širokopásmových reproduktorů podle jejich konstrukce [4]:

1. **Bez dalších přídatných částí:** Na pohled se neliší od běžných středo-basových měničů. Široká přenosová charakteristika se docílí vhodnými rozměry membrány a její povrchovou úpravou (lakování, pokovení...). Rozměry membrány jsou kompromisem mezi horním a dolním mezním kmitočtem. Při hledání onoho kompromisu se také uvažuje jedna vlastnost a to směrová charakteristika reproduktoru (větší rozměr = větší směrovost pro vyšší kmitočty).
2. **S difuzorem (dual cone, wizzer cone):** Difuzor se tvarem podobá komolému kuželu bez podstav. Je mechanicky spojen se středem kmitací membrány. Způsobuje rozšíření frekvenční charakteristiky směrem k vyšším kmitočtům. Difuzor působí jako impedanční korektor a při použití metalických materiálů se zlepšují nejen jeho akustické vlastnosti, ale zároveň také pomáhá odvádět teplo od systému.
3. **Koaxiální, triaxiální:** Podstatnou změnou od předešlých modelů je přidání samostatného výškového měniče (koaxiální), popřípadě i středotónového měniče (triaxiální). Triaxiální uspořádání se používá výjimečně, proto je nadále uvažováno pouze koaxiální uspořádání. Skládá se ze středobasového reproduktoru ke kterému je souose umístěn výškový reproduktor. Výškový měnič může být kalotový, tlakový, nebo kombinace tlakový budič – zvukovod. Konstrukčních řešení umístění je více např.: Celý výškový měnič (kalotový, budič - zvukovod) se umístí před membránu anebo se budič umístí za magnetický obvod středobasového reproduktoru a využije se jeho membrány jako zvukovodu.

Širokopásmový reproduktor se díky své konstrukci blíží k teoretickému ideálu bodového zdroje zvuku. Známé pravidlo o tom, že nejlepší zvuk vychází z jednoho bodu je

opodstatněno především tím, že se eliminuje problémům vznikající s rozmístěním reproduktorů u reproduktorových soustav s více měniči. Problém spočívá v interferenci vln, které vycházejí z různého bodu a tím pádem je vzdálenost k cíli různá (fázový posun). Tento problém velmi zhoršuje směrovou charakteristiku soustavy. Širokopásmové reproduktory tento problém omezují a napomáhají tím i k lepší lokalizaci zdroje při reprodukci. Těchto výhod jsou si vědomi i někteří nejnáročnější posluchači a proto jsou širokopásmové reproduktory mezi nimi oblíbené.

3 OZVUČNICE

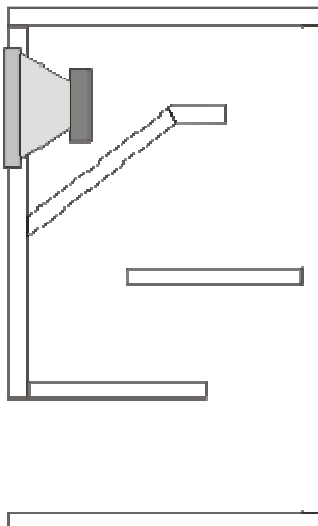
Hlavní podstatou ozvučnice je oddělení přední a zadní zvukové vlny reproduktoru, neboli zamezení akustického zkratu. Akustický zkrat vzniká odčítáním zvukových vln o určitém kmitočtu v určitém místě prostoru. V praxi to znamená, že vlna od zadní strany membrány reproduktoru musí urazit větší vzdálenost než zvuková vlna od přední strany. Dráhový rozdíl způsobí fázový posun obou vln a následujícím sečtením se jejich okamžité hodnoty odčítají. Nejvíce se ovlivňují vlny nízkých kmitočtů, které se šíří téměř všesměrově z důvodů veliké vlnové délky. Vhodnou ozvučnicí se zamezí akustickému zkratu, čímž se podpoří reprodukce nízkých kmitočtů [4].

Stručný přehled ozvučnic z hlediska zamezení šíření vlny od zadní strany reproduktoru, nebo její využití [4] :

- **Rovinná deska.** Nejjednodušší provedení ozvučnice. Ideální zamezení akustického zkratu nastává v případě rovinné desce nekonečných rozměrů. V praxi se používá deska konečných rozměrů. Z toho vyplývá, že správnou funkci bude zajišťovat od jistého dolního mezního kmitočtu, který je závislý na rozměrech desky. Větší rozměr znamená nižší mezní kmitočet.
- **Otevřená ozvučnice.** Vznikla modifikací rovinné desky konečných rozměrů přidáním bočních stěn, které určují hloubku ozvučnice. Zde také dochází k zamezení akustického zkratu jen částečně a to od jistého mezního kmitočtu, který významně ovlivňuje hloubka boxu.
- **Uzavřená ozvučnice.** Jedná se o hermeticky uzavřenou skříň a je realizovatelným kompromisem nekonečné rovinné desky. Zadní vlna se přemění uvnitř ozvučnice v teplo, proto se akustický zkrat neuplatní.
- **Bassreflexová ozvučnice.** Vznikne z uzavřené ozvučnice přidáním bassreflexového nátrubku. Bassreflex je naladěn na určitý kmitočet, při kterém jeho objem vzduchu rezonuje (při buzení reproduktorem) s objemem ozvučnice a využívá tak energii zadní vlny k podpoře přenosu nízkých kmitočtů. Pod tímto rezonančním kmitočtem se ozvučnice chová jako otevřená. To má za následek rychlý pokles na nejnižších kmitočtech (24 dB/oct) a zvýšení výchylky membrány reproduktoru s čímž souvisí i zvýšení zkreslení přenosu. Určení vhodných rozměrů nátrubku a celkového naladění reproboxu je značně složité.
- **Pásmová propust :** V anglickém jazyce nazývaná bandpass. Nejčastější typ této ozvučnice je složen ze dvou komor, které mohou být uzavřené, nebo s umístěným

bassreflexem. Na příčku mezi komorami se umísťuje reproduktor. Základní typ se skládá z jedné uzavřené komory a z druhé bassreflexové. Umístěním bassreflexu i do druhé komory se zvyšuje dolní strmost propusti z 18dB/okt. až na hodnotu 20 dB/okt. a zvýší charakteristická citlivost v daném kmitočtovém pásmu. Toto navýšení je zapříčiněno využitím zadní zvukové vlny od reproduktoru pomocí bassreflexu.

- **Transmision – line:** Je založena na principu laděného zvukovodu, kde využití zadní vlny je klíčové. Nevyužívá se k rezonanci, ale prochází dlouhým zvukovodem, který ji na základě prodloužení dráhy zpozdí a tím otočí fázi. Výsledkem je, že se zadní vlna pro určitý kmitočet sčítá ve fázi s přední vlnou. Tato konstrukce je nejsložitější ze všech.



Obr. 3.1 Příklad bočního řezu ozvučnicí transmision line

3.1 UZAVŘENÁ OZVUČNICE

Uzavřená ozvučnice je hermeticky utěsněná skříň daného objemu. Zadní vlna vyzářená reproduktorem se přemění uvnitř ozvučnice na teplo. Tím se snižuje výsledná účinnost elektroakustické přeměny. Dolní strmost frekvenční charakteristiky reproduktoru v uzavřené ozvučnici je 12 dB/okt. Uzavřená ozvučnice se tedy chová jako horní propust druhého řádu. Konstrukce a návrh této ozvučnice patří mezi jednodušší [4].

Reproduktor se v elektromechanické analogii vyjadřuje hmotností m zavěšené na pružině o tuhosti k . Uzavřená ozvučnice se vyjadřuje pomocí tuhosti pružiny k' . Umístěním reproduktoru se tuhost k' přičte k tuhosti pružiny k a vznikne pružina o tuhosti k'' se závažím m . Z toho plyne závěr, že výsledná soustava (reprosoustava) k'' a m bude

mít vyšší rezonanční kmitočet. Z toho plyne, že reproduktor umístěný do uzavřené ozvučnice klade větší odpor hnacímu ústrojí (zmenší se poddajnost závěsu membrány). Pro vyjádření této náhradní poddajnosti se zavedl parametr ekvivalentní objem reproduktoru. Označuje se V_{as} a popisuje tuhost membrány jako by byla tvořena tuhostí fiktivního vzduchového polštáře jistého objemu uzavřeného za reproduktorem [3]. Vložení reproduktoru do uzavřené ozvučnice se změní parametry jeho impedanční charakteristiky. Rezonanční kmitočet a činitel jakosti se zvýší. Následující vzorce popisují vztahy mezi parametry reproduktoru ve volném prostředí a v uzavřené ozvučnici:

Změna rezonančního kmitočtu je dána

$$\frac{f_c}{f_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}, \quad [4] \quad (3.1)$$

kde f_s je rezonanční kmitočet reproduktoru ve volném prostředí, f_c je rezonanční kmitočet uzavřené soustavy, V_{as} udává hodnotu ekvivalentního objemu reproduktoru a V_b je objem ozvučnice.

Obdobný vztah platí pro činitele jakosti Q_{ts} , který se zvýší na hodnotu činitel jakosti uzavřené soustavy Q_{tc} . Převodní vztah pro tuto změnu je

$$\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}. \quad [4] \quad (3.2)$$

Z hodnoty Q_{tc} lze vypočítat velikost převýšení SPL_{peak} na výsledné amplitudové kmitočtové charakteristice, které se vyskytne nad rezonančním kmitočtem f_c . Nulové převýšení nastává pro $Q_{tc} = 0,707$ a s rostoucí hodnotou se zvyšuje i velikost převýšení. Pro výpočet slouží vztah

$$SPL_{peak} = 20 \log \sqrt{\frac{Q_{tc}^4}{Q_{tc}^2 - 0,25}}. \quad [4] \quad (3.3)$$

,který platí pouze pro $Q_{tc} \geq 0,707$.

Polohu převýšení na modulové kmitočtové charakteristice lze určit pomocí následujícího vzorce:

$$f_{peak} = f_c \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot Q_{tc}^2}}}. \quad [4] \quad (3.4)$$

Poslední vzorec doplňuje základní přehled o průběhu přenosové charakteristiky. Uvádí kmitočet na kterém poklesne přenos na -3 dB. Tento kmitočet se označuje f_3 a vypočítá se pomocí vzorce:

$$f_3 = f_c \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}}. \quad [4] (3.5)$$

3.2 KONSTRUKCE OZVUČNICE

3.2.1 Obecné zásady

- Volba nejvhodnějšího materiálu
- Dokonalá těsnost ozvučnice
- Vysoká pevnost a tuhost ozvučnice

3.2.2 Materiály pro konstrukci ozvučnice

Volba vhodného materiálu pro konstrukci ozvučnice se především řídí podle účelu, pro který má ozvučnice sloužit: mobilní použití, pevné instalace, hi-fi aplikace atd. V tomto ohledu se nejvíce zohledňuje váha a tuhost materiálu. Pro profesionální mobilní použití se nejvíce využívají topolové a březové překližky, které mají dostatečnou tuhost, pevnost a příznivou váhu. Plastové materiály se především používají pro levné komerční reprosoustavy, ale i pro levnější plošné ozvučení. Zřídka se vyskytují exotické materiály jako je mramor, žula a beton. Jejich hlavní výhodou je vysoká tuhost a hmotnost, která zaručuje minimální nežádoucí vibrace ozvučnice. Omezené použití pro stabilní instalace typu hi-fi nebo studio je více než jasné. V poslední řadě jsou materiálu typu dřevovláknitých desek DDF a MDF. Z pohledu akustických vlastností je ideálním materiálem ten s největší tuhostí, vysokou hmotností a vysokým vnitřním tlumením.

3.2.2.1 MDF (Medium density fibreboard)

MDF desky jsou plnohodnotnou a multifunkční alternativou masivního dřeva. Jsou vyráběny chemicko – mechanickou cestou, tj. lisováním dřevných vláken do desek. Desky tohoto typu mají velmi dobré vlastnosti pro konstrukci ozvučnic (hi-fi, pevné instalace) hned z několika důvodů: vysoká hustota materiálu, vyšší hmotnost, dobré vnitřní tlumení (damping factor), snadné opracování. Pro konstrukci bezodrazové komory je vyšší hmotnost přínosem i z hlediska eliminace nežádoucích vlastních vibrací celého boxu, které by se přenášeli na mikrofony. Deska je málo odolná vůči vodě, proto se nehodí pro venkovní (mobilní) použití i z hlediska vyšší hmotnosti.

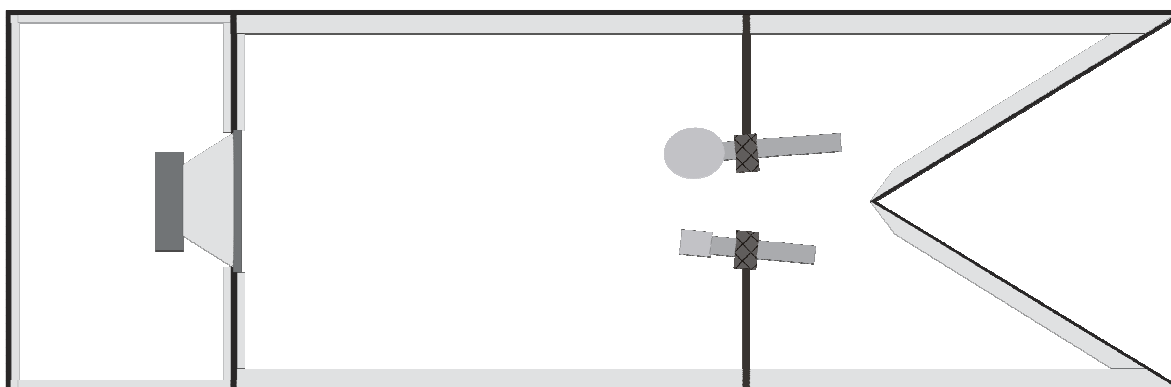
3.2.3 Spojování stěn a zajištění těsnosti ozvučnice

Nejčastěji používané metody spojování při výrobě ozvučnice z dřevěných materiálů jsou tři: na tupo, na pokos, na pokos se zámkem. Druh spoje má vliv na jeho pevnost a tuhost celé ozvučnice (seřazeno výše). Metoda na tupo je nejméně náročná a proto se využívá v drtivé většině konstrukcí. Spojovacím materiálem jsou nejčastěji vruty na dřevěné materiály, anebo spojovací dřevěné kolíky, které navíc zajišťují homogenitu materiálu. Pro dokonalou pevnost spoje se také používají expanzivní lepidla na dřevo, které dokonale vyplní netěsnosti ve spoji. Po kompletaci skeletu se pro dokonalé utěsnění ozvučnice doporučuje aplikovat silikonový tmel do míst spojů stěn a na styčné plochy terminálu. Pro těsnost dosedacích ploch reproduktoru se využívají různá pryžová těsnění.

[4]

4 NÁVRH BEZODRAZOVÉ KOMORY PRO MĚŘENÍ ELEKTROAKUSTICKÝCH MĚNIČŮ

Bezodrazová komora slouží k měření modulových kmitočtových charakteristik mikrofonů. Skládá se ze dvou hlavních částí. První částí je uzavřená ozvučnice se zabudovaným širokopásmovým reproduktorem. Druhá část slouží jako bezodrazová komora malých rozměrů, ve které je umístěn měřicí a měřený mikrofon (elektroakustický měnič). Ve skutečnosti obě části tvoří jeden celek, kdy reproduktor umístěný v uzavřené ozvučnici budí akustické pole v bezodrazové komoře. Samotný návrh se též rozdělí na dvě části.



Obr. 4.1 Ilustrační náčrt rozvržení bezodrazové komory

Pro výrobu ozvučnice a skříně bezodrazové komory je použit materiál MDF o síle 22 mm, který je nejvhodnější díky své tuhosti a dobré schopnosti tlumit vibrace.

4.1 NÁVRH UZAVŘENÉ OZVUČNICE A VÝBĚR VHODNÉHO REPRODUKTORU

Jednou z podmínek při výběru vhodného budícího reproduktoru bylo použití výrobku od českého výrobce TVM. V úvahu připadaly dva modely ARZ 6608 a ARN-150-60/8. Po několika zkušebních simulacích v programu WinISD pro Alpha byl vybrán model ARN-150-60/8, který i přes své menší rozměry nabízí lepší přenos nižších kmitočtů. Díky jeho malým rozměrům vychází menší objem ozvučnice a lze předpokládat homogenitu zvukových vlnoploch již při menší vzdálenosti od měniče a lepší směrovou charakteristiku pro střední a vyšší kmitočty. Tento fakt je důležitý z hlediska umístění mikrofonů mírně

mimo osu reproduktoru. Menší nedostatek přenosu vysokých kmitočtů bude snadno kompenzovat kompresor generátoru se zpětnovazební smyčkou.

Všechny výpočty a simulace jsou pro záření reproduktorové soustavy do volného prostoru.

4.1.1 Výpočet objemu ozvučnice

Pro výpočet vhodného objemu ozvučnice se vycházelo z navržené hodnoty Q_{tc} , která vypovídá o výsledném převýšení nad rezonančním kmitočtem f_c . Parametr Q_{tc} byl stanoven na hodnotu 1, která odpovídá přijatelné hodnotě $SPL_{peak} = 1,25$ dB. Pro výpočty byly použity vztahy z kapitoly 3.1.

Vstupní hodnoty $Q_{tc} = 1$ a parametry reproduktoru uvedené v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Jako první je vypočten objemu ozvučnice V_b pomocí vzorce (3.1):

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} = \frac{13,4}{\left(\frac{1}{0,82}\right)^2 - 1} = 27,30 \text{ l.}$$

Následovuje výpočet rezonančního kmitočtu uzavřené reprosoustavy f_c pomocí upraveného vzorce (3.2):

$$f_c = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b}} = 55 \sqrt{\frac{13,4}{27,3}} = 67,16 \text{ Hz.}$$

Pomocí předešlého výsledku a vzorce (3.2) se určí poloha převýšení na modulové kmitočtové charakteristice f_{peak} :

$$f_{peak} = f_c \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot Q_{tc}^2}}} = 67,16 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2 \cdot 1^2}}} = 94,98 \text{ Hz.}$$

Po určení polohy převýšení na modulové kmitočtové charakteristice se určí jeho velikost s využitím vzorec (3.3):

$$SPL_{peak} = 20 \log \sqrt{\frac{Q_{tc}^4}{Q_{tc}^2 - 0,25}} = 20 \log \sqrt{\frac{1^4}{1^2 - 0,25}} = 1,25 \text{ dB.}$$

Použití tohoto vzorce je umožněno splněním podmínky o velikosti činiteli jakosti soustavy Q_{tc} . Posledním parametrem pro doplnění informací o průběhu modulové kmitočtové charakteristiky je kmitočet f_3 , který udává polohu místa poklesu o 3 dB. Pro výpočet slouží vzorec (3.4):

$$f_3 = f_c \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{tc}^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}} = 67,16 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{1^2} - 2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{1^2} - 2\right)^2 + 4}}{2}} = 52,79 \text{ Hz} .$$

4.1.2 Počítačová simulace uzavřené ozvučnice

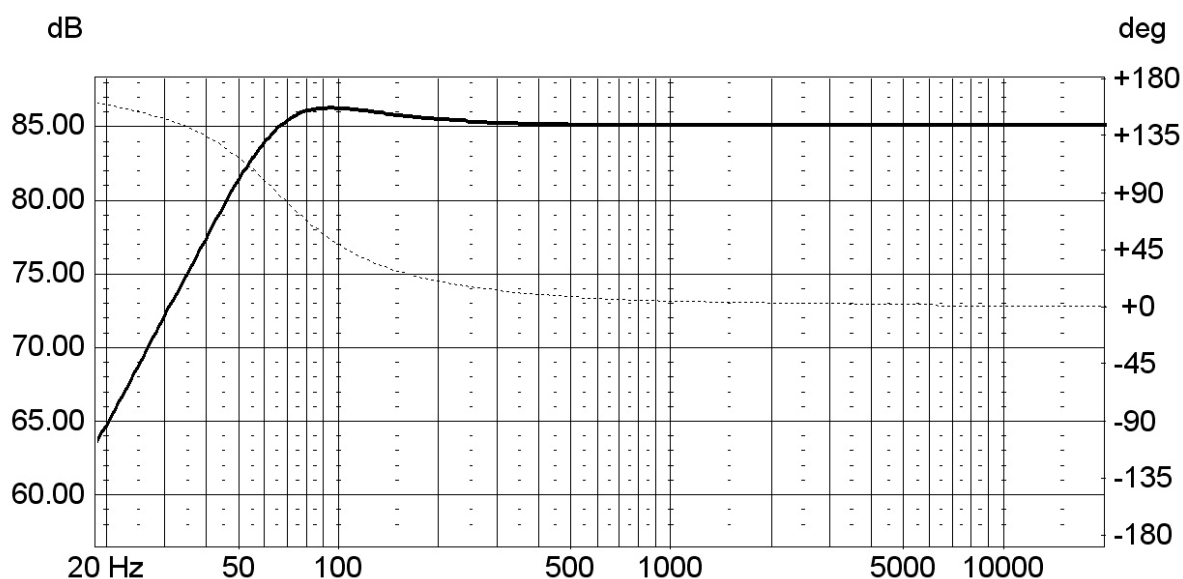
Pro simulaci byl použit volně šiřitelný program WinISD Pro Alpha od sdružení LinearTeam a demoverze programu LspCAD 5.25. Z obou programů vycházely téměř shodné výsledky. Použity byly především pro kontrolu přenosové, impedanční charakteristiky a výpočet objemu ozvučnice ze zadaného parametru Q_{tc} . Dále jsou uvedeny pouze hodnoty z programu LspCAD 5.25.

Vstupní parametry byly použity z katalogového listu reproduktoru ARN-150-60/8 z kapitoly **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a zvolená hodnota $Q_{tc} = 1$.

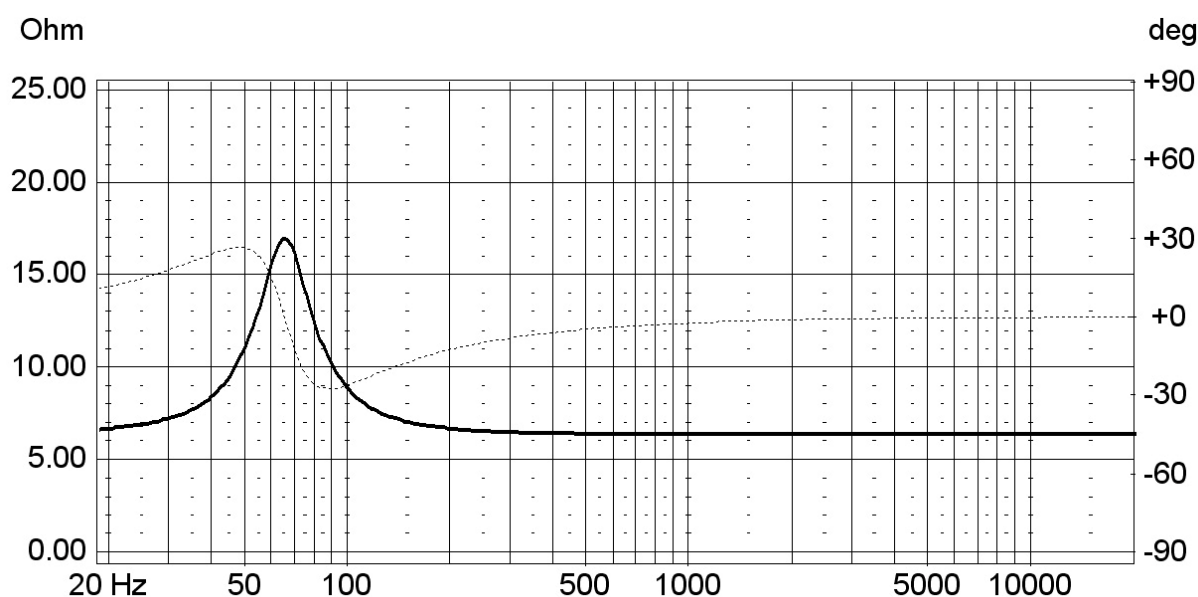
Výsledky:

Tab. 4.1 Porovnání výsledků výpočtu pomocí vzorců a výsledků z programu LspCAD 5.25

	Výpočet vzorcí	LspCAD 5.25
V_b (l)	27,30	27,25
f_c (Hz)	67,16	66,10
f_{peak} (Hz)	94,98	95,50
f_3 (Hz)	52,79	51,90



Obr. 4.2 Modulová kmitočtová charakteristika vykreslená programem LspCAD 5.25



Obr. 4.3 Impedanční charakteristika vykreslená programem LspCAD 5.25

4.2 NÁVRH BEZODRAZOVÉ KOMORY

V této podkapitole je řešena problematika návrhu části bezdrazové komory z hlediska jejího geometrického tvaru, použitých tlumících materiálu a umístění mikrofonů. Základním požadavkem je vytvoření frekvenčně homogenního pole v bodech umístění mikrofonů. Výpočty a návrhy bez pomoci složitého a drahého programového vybavení jsou téměř nemožné z hlediska počtu prvků (parametrů), na kterých je výsledek

závislý. Z tohoto důvodu se návrh omezí na využití základních principů akustiky a známých parametrů použitých tlumících materiálů.

4.2.1 Tlumící materiály

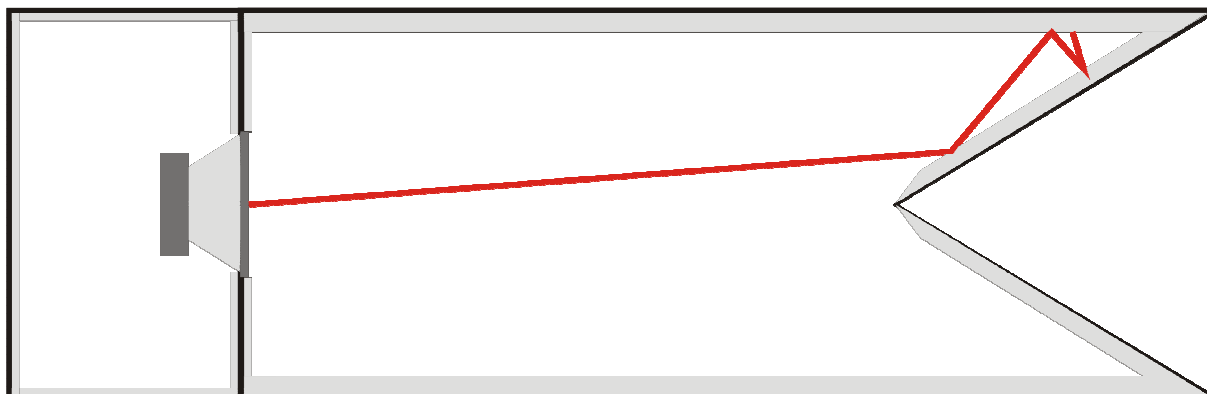
Z důvodů odlišnosti směrových charakteristik měřeného a měrného mikrofону bylo navrženo použití pohlcujících materiálů pro celou skříň. Umístění odrazivých difuzních materiálů by bylo v tak malém prostoru velmi obtížné. Bude se tedy předpokládat, že z největší části se bude podílet na výsledné akustické pole (snímané mikrofóny) přímá zvuková vlna od budícího reproduktoru. Snahou je tedy dosáhnout bezodrazového prostředí pomocí materiálů s vysokým činitelem pohltivosti. Z dostupných materiálů nejlépe vyhovují absorpční panely Flexi panel A50 od firmy VICOUSTIC. Tento panel má nejpříznivější kmitočtový průběh činitele pohltivosti α . Dobré pohltivosti nízkých kmitočtů dosahuje pomocí unikátního tvarování polyuretanové pěny.

4.2.2 Potlačení stojatého vlnění

Eliminace stojatých vln lze dosáhnout pouze přeměnou jejich energie na teplo a to závisí na velikosti činitele pohltivosti materiálu. Zvýšení účinnosti přeměny lze dosáhnout vícenásobnými odrazy od stěn, které jsou pokryty pohlcujícím materiálem. V případě bezodrazové komory je nejkritičtější vznik stojatého vlnění s největší amplitudou kmiten ve směru mezi reproduktorem a protější stěnou skříně. Z tohoto důvodu byl navržen čtyřboký jehlan umístěný na protější straně budícího reproduktoru. Vyroběn je z MDF a pokryt tlumícím materiálem. Slouží jako odrazivá plocha na boční stěny, na kterých je umístěn tlumící Flexi panely A50. Velikost vrcholového úhlu jehlanu určuje správný směr odrazu zvukových vln. Na jeho velikosti dále závisí počtem teoretických odrazů, před postupem vlny zpět. Zde platí úměra: čím menší vrcholový úhel, tím více odrazů v přímém směru. Reálná velikost jehlanu je limitován celkovými rozměry komory, ale i přes to je počet odrazů dostatečný. Na Obr. 4.4 je znázorněn paprsek zvukové vlny dopadající na jehlan.

Kmitočty stojatých vlnění, které mohou vznikat při odrazech mezi stěnami jsou dány rozměry skříně. Pro navržené rozměry jsou tyto kmitočty 511 Hz mezi bočními stěnami a cca 171 Hz mezi stěnou s reproduktorem a protější stěnou (tato hodnota je orientační z důvodu umístění jehlanu). Kmitočty byly určeny pomocí aplikace umístěné na

internetových stránkách Audioweibu [6]. Pro tyto kmitočty má Flexi panel A50 dostatečně veliký index pohltivosti, proto lze předpokládat dobré potlačení vzniku stojatého vlnění.



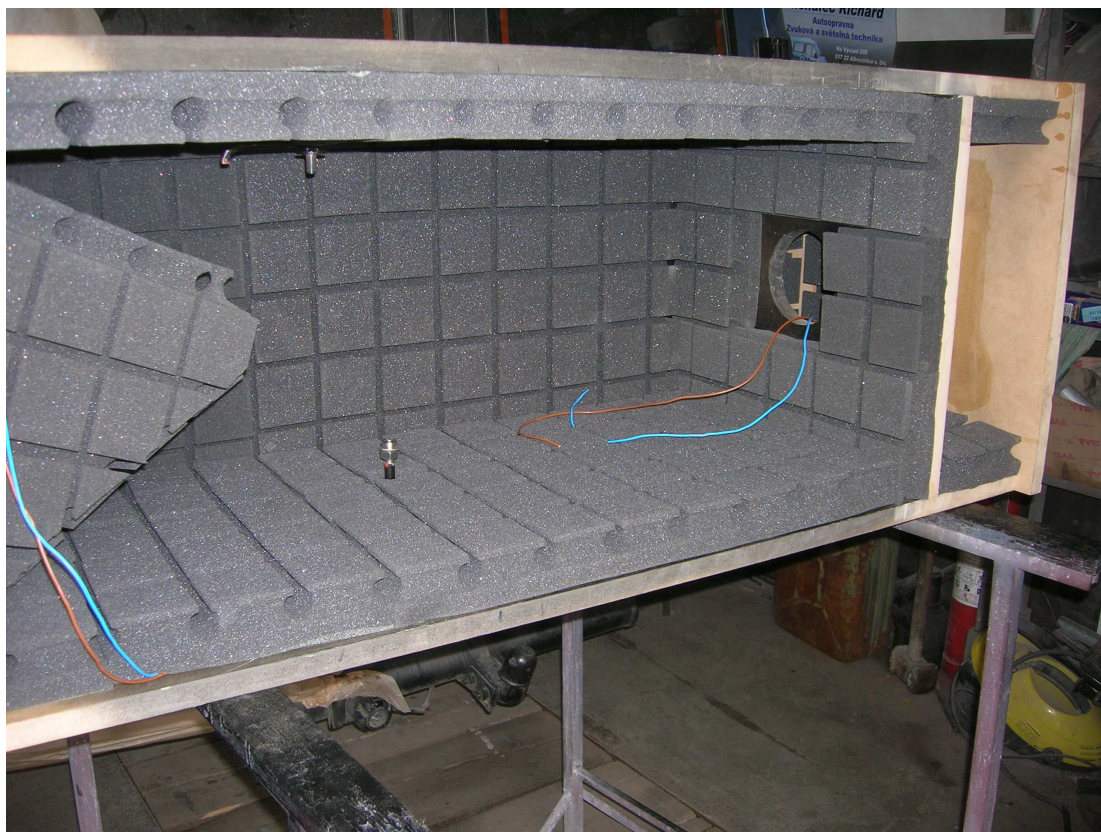
Obr. 4.4 Znárodnění odrazů zvukových vln od jehlanu

4.2.3 Konstrukce bezodrazové skříně a umístění mikrofonů

Návrh rozměrů bezodrazové skříně vycházel ze vzdálenosti mikrofonů od reproduktoru. Ta byla stanovena na 50 cm z důvodů dodržení nízké hodnoty úhlu (maximálně 10°) mezi osou vyzařování reproduktoru a přímkou spojující mikrofon s počátečním bodem vyzařování reproduktoru. Velikost tohoto úhlu se uplatňuje u vysokých kmitočtů, pro které je index směrovosti reproduktoru nejvyšší. Oba mikrofony jsou umístěny v úchytech zabraňujících otřesům a jsou vychýleny o stejný úhel vůči ose vyzařování reproduktoru. Jejich přesné umístění je možno nastavit pomocí polohovatelných úchytů upevněných na stěnách skříně. Další parametrem při návrhu rozměrů byla tloušťka použitého tlumícího materiálu pro obvodové stěny (5 cm). Snahou bylo docílit co nejmenších celkových rozměrů komory, proto rozměry (poměry stran) uzavřené ozvučnice byly uzpůsobeny bezodrazové skříně. Z důvodu zachování objemu ozvučnice V_b i při použití tlumících materiálů byly rozměry určeny pro výsledný objem 29,7 litrů. Pro uzavřenou ozvučnici je použit stejný tlumící materiál jako pro bezodrazovou komoru, tedy Vicoustic Flexipanel A50.

Na čelní stěně jsou umístěny dvířka pro přístup k mikrofonům, které jsou uchyceny pomocí pantů a rychloupínacích zámků. Na dosedacích plochách dvířek je nalepeno pryžové těsnění, které snižuje zbytkový hluk pronikající z a do komory. Pro připojení reproduktoru slouží konektor Speakon a pro měřený mikrofon konektor XLR (female), oba umístěné v zapuštěném terminálu na přední straně komory. Na Obr. 4.5 je vidět komora

před dokončením bez přední stěny a dvířek. Konkrétní rozměry boxu jsou uvedeny v grafickém návrhu.



Obr. 4.5 Bezodrazový box před dokončením

Na Obr. 4.6 je detailní pohled posuvného mechanismu pro uchycení mikrofonů včetně odpružených objímek. Posuvný mechanismus slouží k nastavení stejné vzdálenosti měrného i měřeného mikrofonu od reproduktoru.

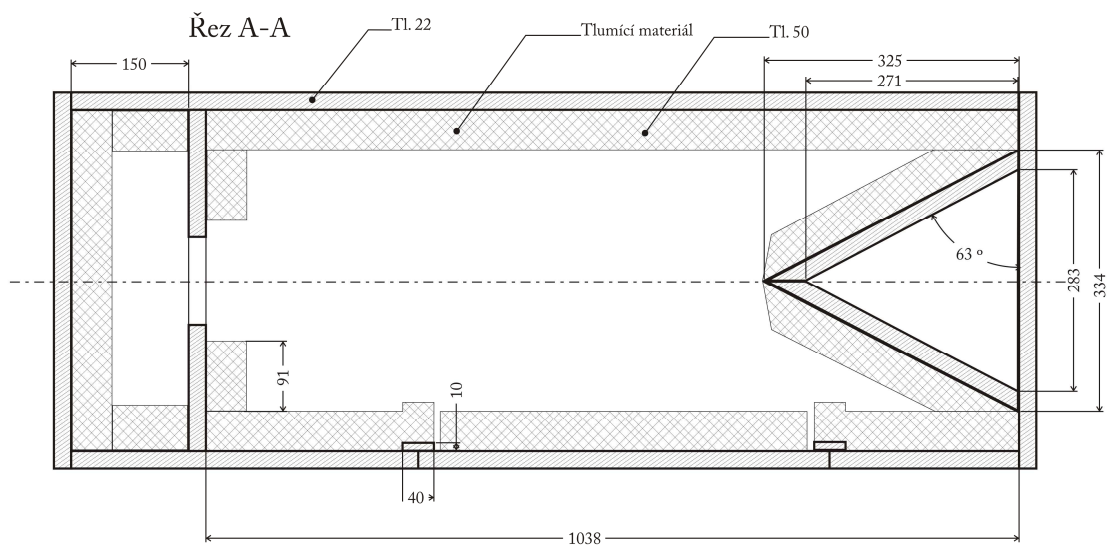
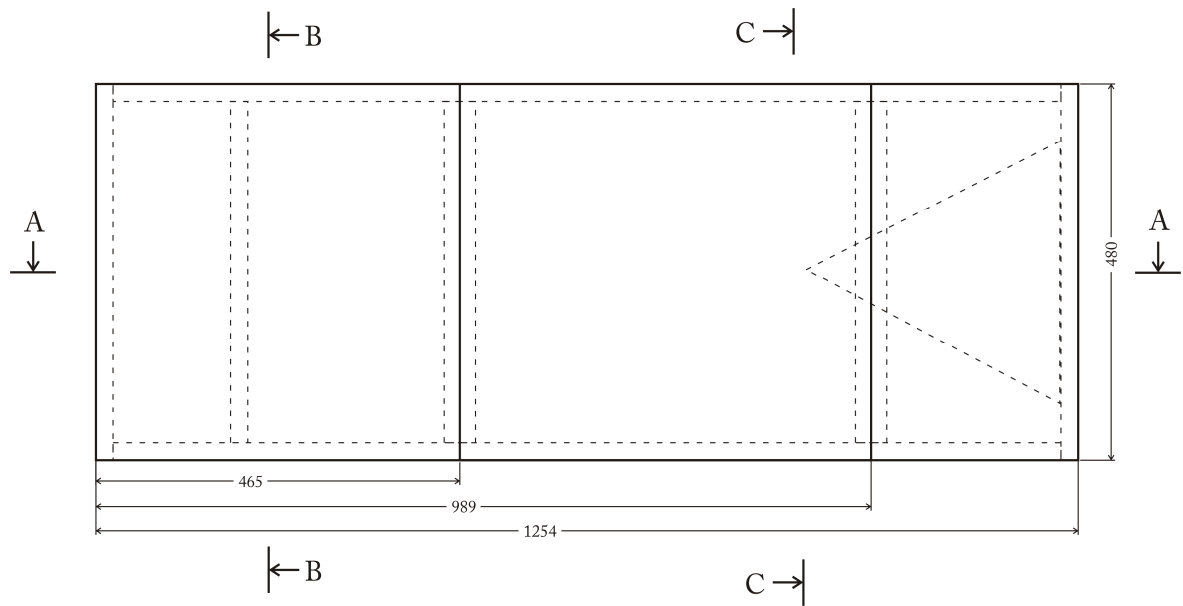


Obr. 4.6 Detail uchycení objímek mikrofonů pro kompenzační metodu měření



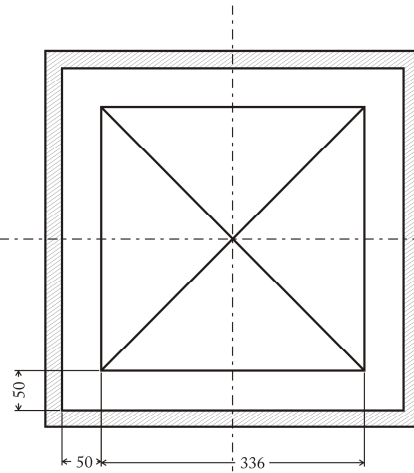
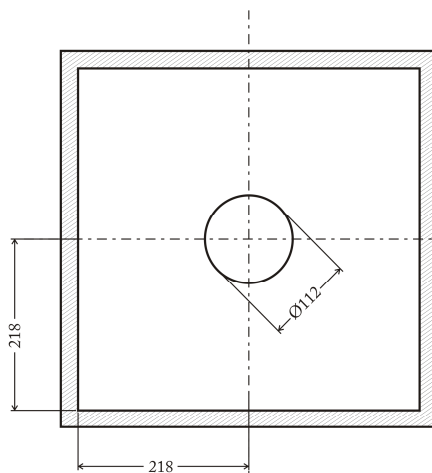
Obr. 4.7 Celkový pohled na konečný výrobek

4.3 GRAFICKÝ NÁVRH



Řez B-B

Řez C-C



5 MĚŘENÍ

5.1 MODULOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA BEZODRAZOVÉHO BOXU

První byla změřena modulová kmitočtová charakteristika bezodrazového boxu s buzením reproduktorem z uzavřené ozvučnice. Měřeno v rozsahu 20 Hz až 20 kHz s postupným přeladováním kmitočtu po 1/6 okt.. Budící sinusový signál z digitálního generátoru byl zesílen ve výkonovém zesilovači Mackie FRS1700 na jehož výstupu byl zapojen reproduktor v bezodrazovém boxu. Pro měření byl použit digitální analyzátor AL1 Acoustilyzer s předzesilovačem a měrným mikrofonom Brüel & Kjaer. Měření probíhalo automatizovaně pomocí obslužného programu na osobním počítači. Kalibrovaný měrný mikrofón byl umístěn v odpružené objímce vzdálený od reproduktoru 50 cm a 5 cm od přímé osy vyzařování. To je poloha, ve které je umístěn i při měření mikrofónů kompenzační metodou. Výsledné hodnoty jsou v tabulce Tab. 5.1 a následně zanesené do grafu na Obr. 5.1

Tab. 5.1 Modulová kmitočtová char. bezodrazového boxu

f [Hz]	20	22,4	25	28	31,5	35,5	40	45	50	56	63
L [dB_{SPL}]	109.2	109.6	109.9	110.1	110.4	110.5	110.6	110.7	110.5	110.1	109.1

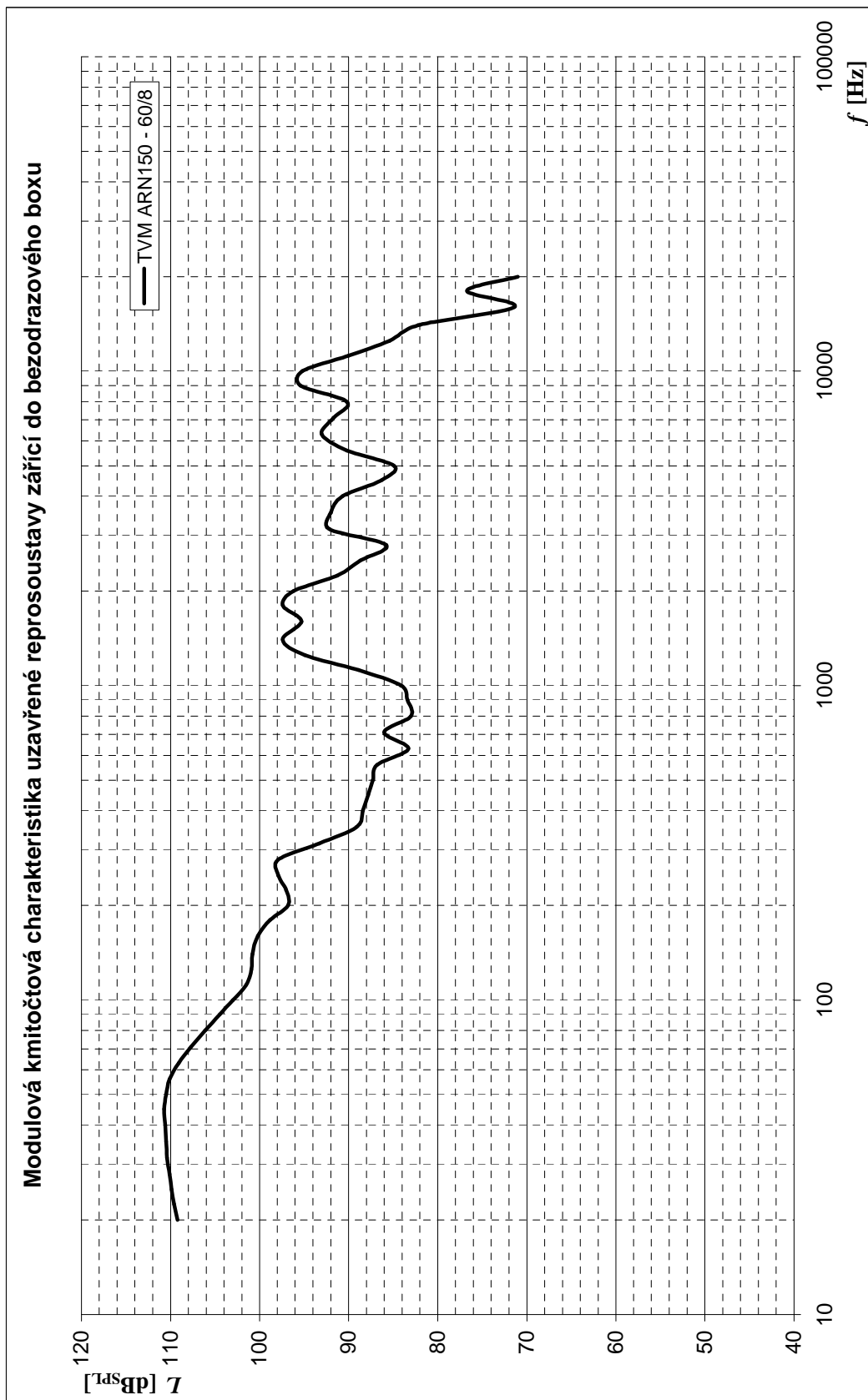
f [Hz]	63	71	80	90	100	112	125	140	160	180	200
L [dB_{SPL}]	109.1	107.7	106.1	104.5	103.0	101.5	100.9	100.8	100.2	98.8	96.8

f [Hz]	224	250	280	315	355	400	450	500	560	630	710
L [dB_{SPL}]	97.0	97.9	97.9	93.3	89.1	88.4	87.8	87.3	86.8	83.3	86.0

f [Hz]	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000	2240	2500
L [dB_{SPL}]	83.0	83.4	84.1	88.9	94.9	97.4	95.3	97.4	96.2	91.3	88.7

f [Hz]	2800	3150	3550	4000	4500	5000	5600	6300	7100	8000	9000
L [dB_{SPL}]	85.8	92.2	92.0	90.7	86.3	84.9	90.2	93.0	91.7	90.2	95.4

f [Hz]	10000	11200	12500	14000	16000	18000	20000
L [dB_{SPL}]	95.2	90.0	85.4	82.2	71.4	76.7	71.0



Obr. 5.1 Graf modulové kmitočtové charakteristiky bezodrazového boxu

5.2 MODULOVÁ KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA MIKROFONU SHURE PGE 588

První měření bylo provedeno metodou kompenzační v bezodrazovém boxu a pro porovnání stejnou metodou v bezodrazové komoře, u které se předpokládají ideální podmínky. Měření zajistil měrný mikrofon s měrným analogovým zesilovačem B&K. Signál z měrného mikrofonu byl přiveden do kompresního vstupu analogového generátoru, tím byla vytvořena zpětnovazební kompenzační smyčka, která udržuje konstantní výstupní napětí mikrofonu. Kmitočtová charakteristika měrného mikrofonu je takřka lineární a proto lze tvrdit, že akustický tlak v blízkosti měrného mikrofonu je stále konstantní. Mikrofony (měřený a měrný) byly umístěny symetricky k ose reproduktoru a ve stejné vzdálenosti od reproduktoru. S tímto uspořádáním a zapojením stačí pouze přeladovat kmitočet na generátoru, který budí reproduktor umístěný v boxu a sledovat napětí na měřeném mikrofonu. Toto napětí odpovídá amplitudové kmitočtové charakteristice. V Tab. 5.2 jsou výsledné hodnoty amplitudových kmitočtových charakteristik měřeného mikrofonu. Uvedeny jsou absolutní hodnoty akustického tlaku a relativní pro lepší porovnání odchylek mezi měřeními v bezodrazovém boxu a komoře. Pro relativní hodnoty byla zvolena referenční hodnota 0 dB pro kmitočet 1 kHz. Relativní hodnoty pro oboje měření jsou zaneseny do grafu na Obr. 5.2. a hodnoty odchylky mezi relativními hodnotami pro box a komoru na Obr. 5.3.

Tab. 5.2 Měření modulové kmitočtové char. mikrofonu kompenzační metodou s porovnáním výsledků naměřených v boxu a komoře

f [Hz]	24	32	40	50	65	80	100	130	160
L [dB_{SPL}] - box	61	61,5	63	66	68,2	73,8	82	90,5	88
L [dB_{SPL}] - komora				71	75,5	76,5	78,3	81,5	84,25
L_{rel} [dB_{SPL}] - box	-23	-22,5	-21	-18	-15,8	-10,2	-2	6,5	4
L_{rel} [dB_{SPL}] - komora				-15,75	-11,25	-10,25	-8,45	-5,25	-2,5
odchylka [dB_{Spl}]				-2,25	-4,55	0,05	6,45	11,75	6,5

f [Hz]	200	220	260	320	360	400	500	650	800
L [dB_{SPL}] - box	85,2	82,5	84,5	87,25	89	87,8	84	86	82,5
L [dB_{SPL}] - komora	86	84,5	86,4	86,5	86,75	86,75	86,75	87,2	87,75
L_{rel} [dB_{SPL}] - box	1,2	-1,5	0,5	3,25	5	3,8	0	2	-1,5
L_{rel} [dB_{SPL}] - komora	-0,75	-2,25	-0,35	-0,25	0	0	0	0,45	1
odchylka [dB_{Spl}]	1,95	0,75	0,85	3,5	5	3,8	0	1,55	-2,5

f [Hz]	1000	1300	1600	2000	2400	2600	3200	3500	4000
L [dB_{SPL}] - box	84	86,25	87,25	86,75	89,5	89	85	82	84
L [dB_{SPL}] - komora	86,75	88,2	89	88,9	89,2	88,7	87,25	86,5	88,1
L_{rel} [dB_{SPL}] - box	0	2,25	3,25	2,75	5,5	5	1	-2	0
L_{rel} [dB_{SPL}] - komora	0	1,45	2,25	2,15	2,45	1,95	0,5	-0,25	1,35
odchylna [dB_{SPL}]	0	0,8	1	0,6	3,05	3,05	0,5	-1,75	-1,35

f [Hz]	5000	5250	5500	6000	6500	7250	8000	9000	10000
L [dB_{SPL}] - box	91,5	93,5	89	92	91,5	85	88	86	90
L [dB_{SPL}] - komora	86,4	87,4	89	92	89,5	88,5	90,5	87	89
L_{rel} [dB_{SPL}] - box	7,5	9,5	5	8	7,5	1	4	2	6
L_{rel} [dB_{SPL}] - komora	-0,35	0,65	2,25	5,25	2,75	1,75	3,75	0,25	2,25
odchylna [dB_{SPL}]	7,85	8,85	2,75	2,75	4,75	-0,75	0,25	1,75	3,75

f [Hz]	13000	15000	18000	20000
L [dB_{SPL}] - box	82	76	53	
L [dB_{SPL}] - komora	84	82	82	66
L_{rel} [dB_{SPL}] - box	-2	-8	-31	
L_{rel} [dB_{SPL}] - komora	-2,75	-4,75	-4,75	-20,75
odchylna [dB_{SPL}]	0,75	-3,25	-26,25	

Z důvodu nepříliš uspokojivých výsledků kompenzační metody bylo provedeno měření stejného mikrofону metodou substituční. Použito bylo stejného měřícího vybavení jako pro měření amplitudové kmitočtové charakteristiky bezodrazového boxu, tedy digitálního generátoru i analyzeru. Tím se eliminovaly nepřesnosti v nastavování kmitočtu a odečítání hodnot z analogových měřících přístrojů. V první fázi byl umístěn v boxu měřící mikrofón. Udržoval se konstantní akustický tlak pro 1/6 oktávové kmitočty a odečítalo se napětí z generátoru. V druhé fázi byl do stejného místa vložen mikrofón měřený. Nastavovalo se napětí na generátoru pro kmitočty změřené v první fázi. Mikrofony byly vkládány do stejné pozice jako při metodě kompenzační, tedy 5 cm od osy reproduktoru. Naměřené hodnoty jsou v Tab. 5.3. Grafické znázornění charakteristiky i s porovnáním s měřením kompenzační metodou v komoře je na Obr. 5.4.

Tab. 5.3 Substituční metoda

f [Hz]	20	22,4	25	28	31,5	35,5	40	45	50	56	63
U_G [dBu]	-49,1	-49,4	-49,5	-49,6	-49,8	-49,9	-50,1	-50,3	-49,9	-51,2	-50,8
L [dB_{SPL}]	23,7	23,7	23,7	23,8	23,8	23,9	24,0	24,3	24,4	25,0	25,8
L_{rel} [dB_{SPL}]	-16,5	-16,5	-16,5	-16,4	-16,4	-16,3	-16,2	-15,9	-15,8	-15,2	-14,4

f [Hz]	71	80	90	100	112	125	140	160	180	200	224
U_G [dBu]	-49,8	-48,3	-46,5	-44,8	-42,9	-41,7	-41,7	-40,9	-39,9	-38,3	-37,2
L [dB_{SPL}]	26,5	28,3	31,0	34,0	38,9	44,4	47,8	44,8	42,2	40,4	40,2
L_{rel} [dB_{SPL}]	-13,7	-11,9	-9,2	-6,2	-1,3	4,2	7,6	4,6	2,0	0,2	0,0

f [Hz]	250	280	315	355	400	450	500	560	630	710	800
U_G [dBu]	-38,0	38,7	-33,7	-30,1	-29,0	-28,0	-27,1	-26,9	-23,3	-26,1	-24,0
L [dB_{SPL}]	40,8	41,0	42,7	44,5	45,4	43,1	41,0	42,7	43,4	41,1	40,1
L_{rel} [dB_{SPL}]	0,6	0,8	2,5	4,3	5,2	2,9	0,8	2,5	3,2	0,9	-0,1

f [Hz]	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000	2240	2500	2800
U_G [dBu]	-24,2	-24,4	-29,1	-34,7	-37,8	-36,6	-37,5	-36,6	-31,7	-28,6	-25,6
L [dB_{SPL}]	40,9	40,2	41,6	42,7	43,3	44,4	43,5	43,9	45,0	45,0	45,7
L_{rel} [dB_{SPL}]	0,7	0,0	1,4	2,5	3,1	4,2	3,3	3,7	4,8	4,8	5,5

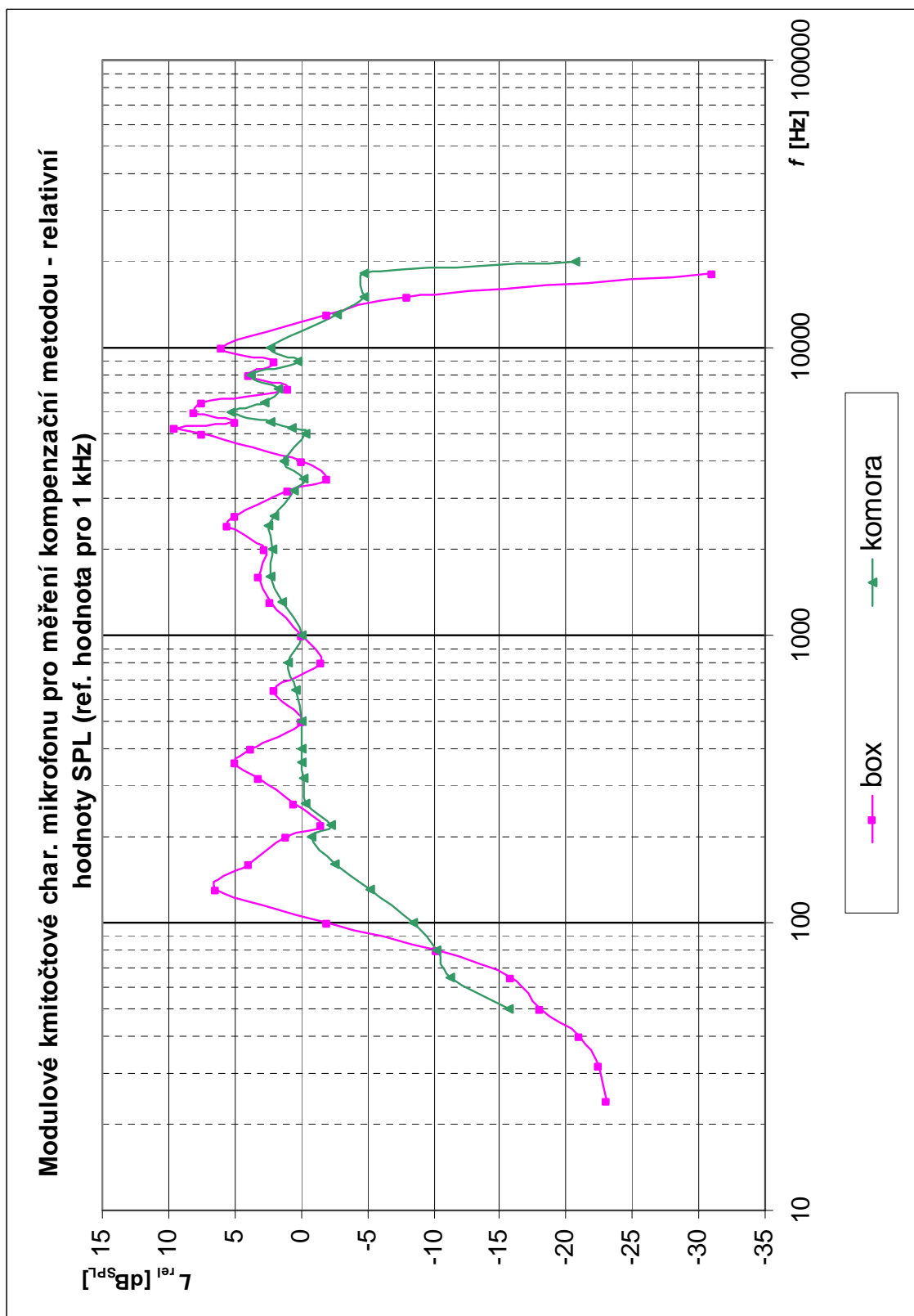
f [Hz]	3150	3550	4000	4500	5000	5600	6300	7100	8000	9000	10000
U_G [dBu]	-32,5	-32,8	-31,3	-27,5	-25,5	-29,8	-32,5	-30,3	-29,8	-35,6	-36,1
L [dB_{SPL}]	41,7	40,0	41,3	44,6	45,8	46,5	50,3	46,0	42,8	43,9	46,8
L_{rel} [dB_{SPL}]	1,5	-0,2	1,1	4,4	5,6	6,3	10,1	5,8	2,6	3,7	6,6

f [Hz]	11200	12500	14000	16000	18000	20000
U_G [dBu]	-29,8	26,8	-25,2	-6,9	-14,3	-8,7
L [dB_{SPL}]	44,6	38,1	36,4	35,6	30,8	31,2
L_{rel} [dB_{SPL}]	4,4	-2,1	-3,8	-4,6	-9,4	-9,0

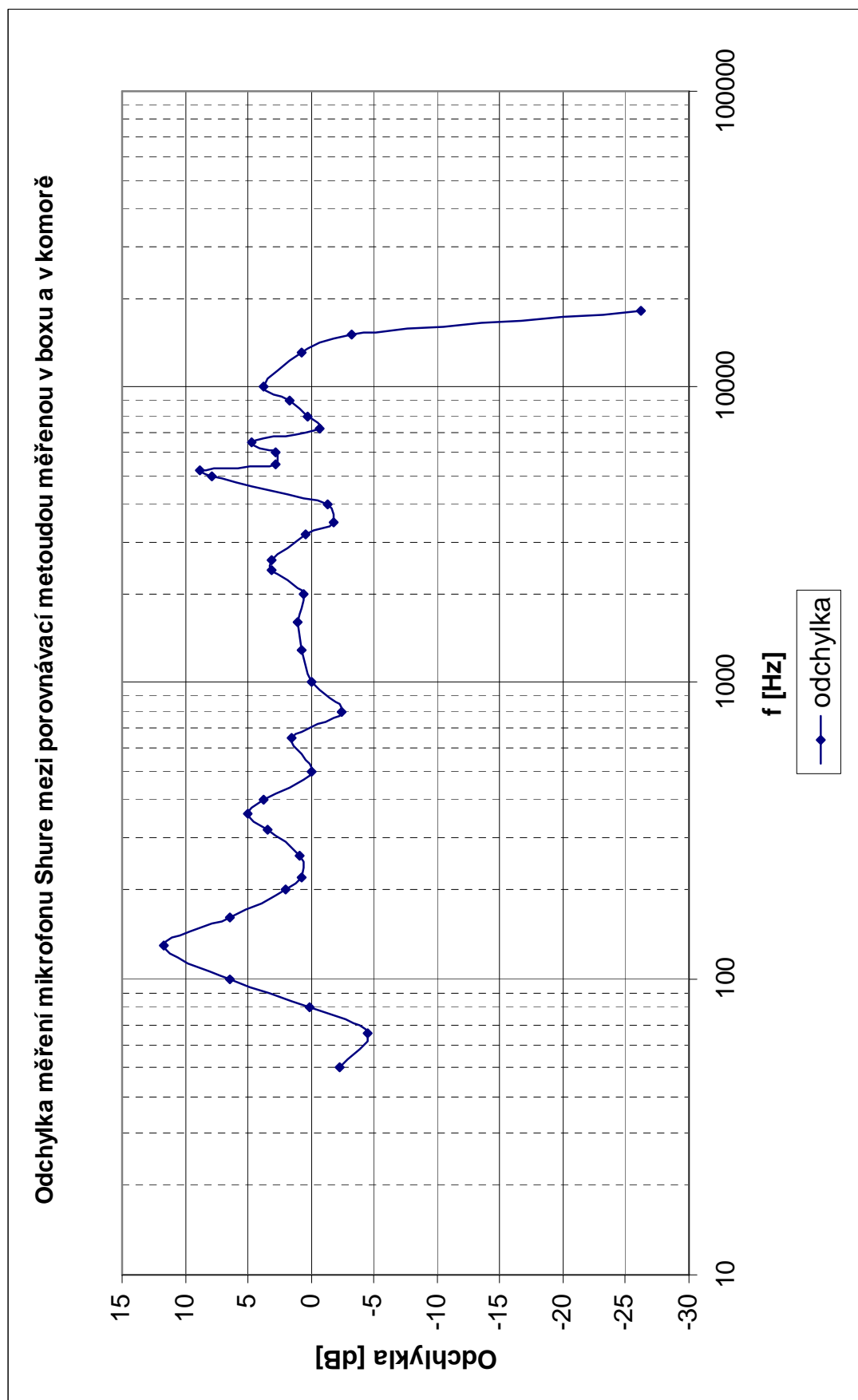
Použité přístroje:

Tab. 5.4 Použité přístroje

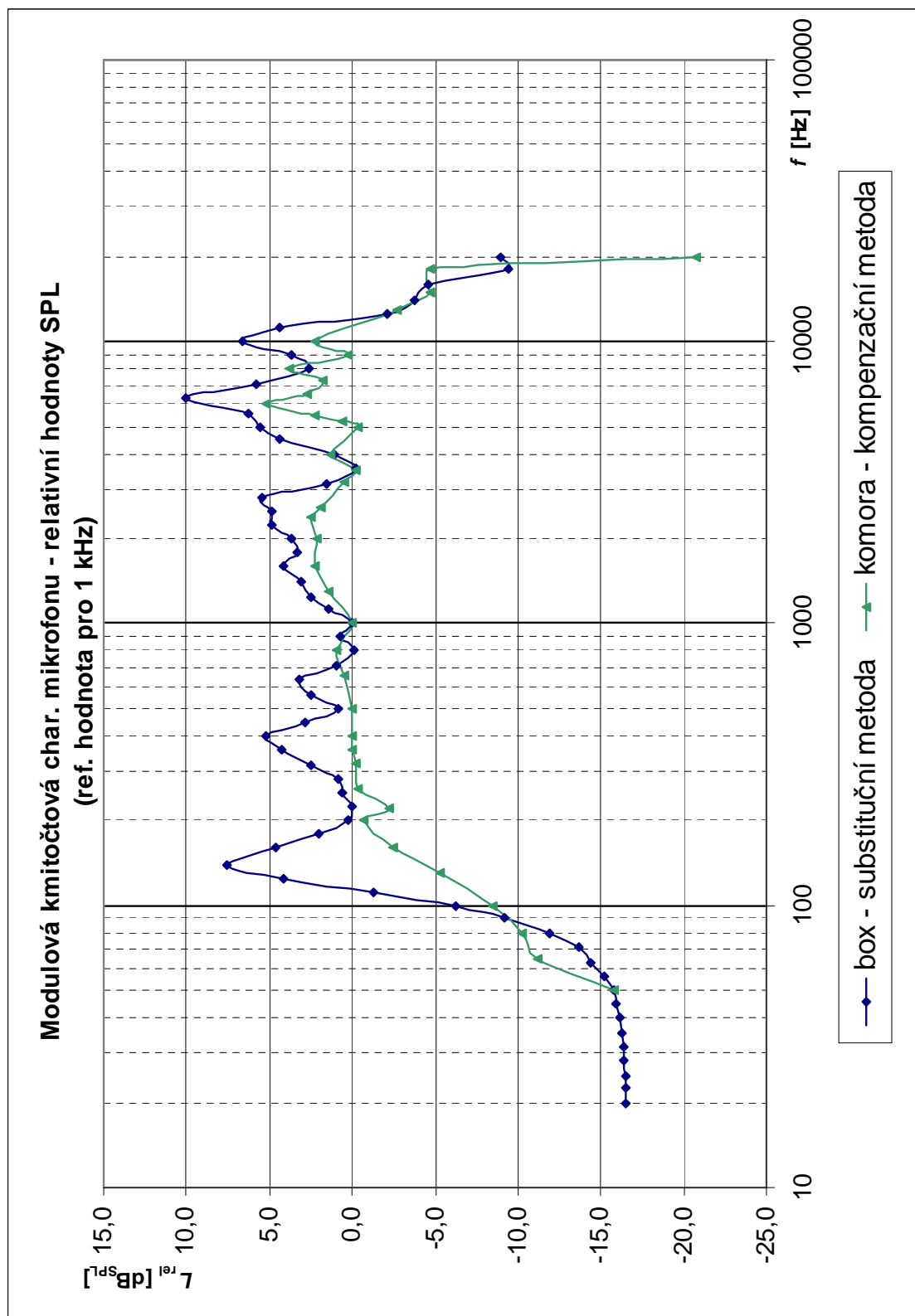
Přístroj	výrobce / typ
Analyzátor	NT1 AG / AL1 Acoustilyzer
Generátor (digitální)	NT1 / Minirator MR2
Generátor (analogový)	Sine-Random Generator B&K 1024
Charakterograf	Frequency Response Tracer B&K 4709
Měrný mikrofon	Brüel & Kjær / type 2660
Měřený mikrofon	Shure PGE 588
Měřicí zesilovač	Measuring Amplifier B&K 2608
Měřicí zesilovač	Measuring Amplifier B&K 2606
Výkonový zesilovač	Mackie FRS1700



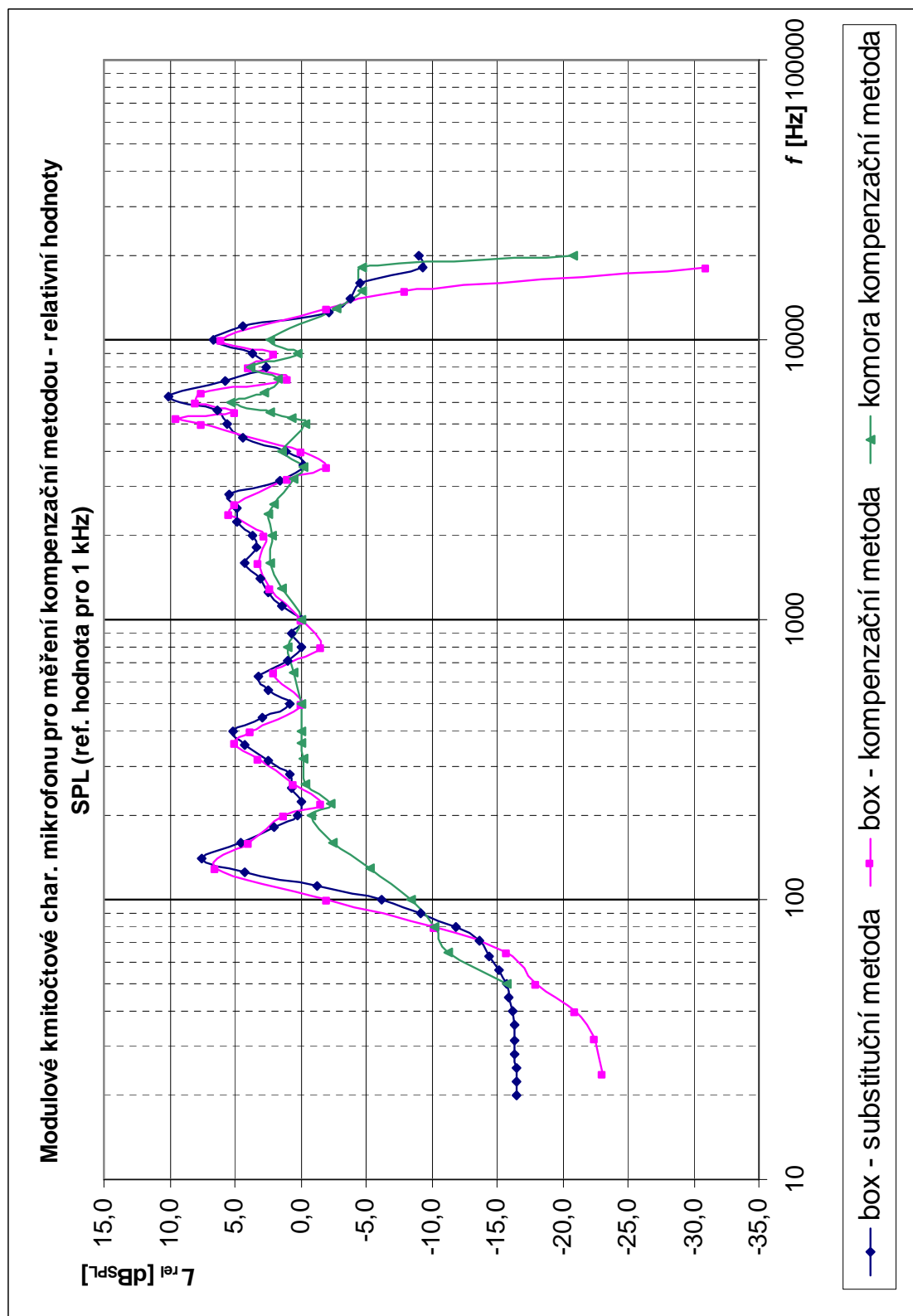
Obr. 5.2 Modulové kmit. char. mikrofonu měřené kompenzační metodou v boxu a komoře



Obr. 5.3 Odchylyka mezi relativními hodnotami naměřenými v boxu a komoře



Obr. 5.4 Modulové kmit. char. mikrofonu pro měřicí metody substituční (box) a kompenzační (komora)



Obr. 5.5 Porovnání všech naměřených modulových kmitočtových charakteristik mikrofonu.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout bezodrazovou skříň malých rozměrů se zabudovaným širokopásmovým reproduktorem pro měření modulových kmitočtových charakteristik mikrofonů a její realizace.

V teoretické části jsem se zaměřil na vysvětlení základních principů akustiky, vlastností reproduktorů a teorii pro návrh uzavřené ozvučnice. Dále jsem uvedl možnosti eliminace vzniku stojatých vlnění pomocí tlumících materiálů a akustických prvků.

Výsledkem práce je dokumentace bezodrazové komory, ve které jsou obsaženy informace o použitých materiálech, zdůvodnění výběru použitého širokopásmového reproduktoru, výpočty uzavřené ozvučnice (včetně počítačové simulace) a grafický návrh s rozměry nutnými pro konstrukci. Snahou bylo dosáhnout co nejvíce homogenního zvukového prostředí v místě mikrofonů a potlačení vzniku stojatého vlnění. Tyto předpoklady se ukázaly jako nepřilíh správné. Ze zkušebního měření mikrofonu je patrné zvlnění modulové kmitočtové charakteristiky v oblasti nízkých kmitočtů řádově do 800 Hz, které je způsobené stojatými vlnami, které vznikají nedostatečným tlumícím účinkem materiálu pro tyto kmitočty. Menší nepřesnosti se ukázaly i v oblasti vyšších kmitočtů nad 2 kHz, které také zřejmě způsobuje stojaté vlnění. Velikost nepřesnosti se zvyšuje pro kmitočty, pro které je činitel pohltivosti $\alpha < 1$, viz příloha B a graf kmitočtové charakteristiky průběhu činitele pohltivosti α , pro Flexi panel A50. Bohužel pro takto malý prostor zřejmě neexistuje adekvátní tlumící materiál ani jednoduché prostorové úpravy pro dokonalou eliminaci vzniku těchto stojatých vlnění. Tloušťka tlumícího materiálu, která by toho byla dokonale schopná není přípustná vzhledem k velikosti komory. Částečné zlepšení by se dalo docílit vrstvením (výměnou) tlumícího materiálu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SCHIMMEL, J.: *Akustika uzavřených prostor*“, elektronický text pro výuku Elektroakustiky
- [2] SÝKORA, B.: *Prostorová akustika na statku i v chaloupce I, II, III*, internetový zdroj: <http://www.hifi-voice.com/teorie/> publikováno v roce 2008
- [3] SÝKORA, B.: *Stavíme reproduktorové soustavy*, 1. - 48. díl. A Radio 10/97 - 9/2001.
- [4] TOMAN, K.: *Reproduktory a reprosoustavy*, 1 díl. 2003.
- [5] DISK Multimedia, s.r.o. Webové stránky společnosti – zdroj katalogového listu Flexi panelu A50. Dostupné na: <http://disk.cz/disk/detail1.csp?!PV,3366>
- [6] RICHTER A.: Audioweb - internetové stránky věnované stavbě reprosoustav – aplikace pro výpočet kmitočtů stojatých vlnění. Dostupné na: <http://audioweb.cz/tp-tsparmetry.htm>

SEZNAM ZKRATEK

AES	Audio Engineering Society (společnost zvukových inženýrů)
MDF	Medium density fibreboard (středně hustá dřevovláknitá deska)
RMS	Root Mean Square (efektivní hodnota časově proměnného signálu)
TVM	Tesla Valašské Meziříčí

PŘÍLOHY

A KATALOGOVÝ LIST REPRODUKTORU



Hlubokotónový reproduktor

ARN-150-60/8

Hlubokotónový reproduktor se stíněným magnetickým obvodem pro aplikaci v reproduktorových soustavách, u kterých se předpokládá provoz v blízkosti TV přijímačů nebo monitorů.

AKUSTICKÁ DATA

Jmenovitý šumový příkon ¹⁾	20 W
Krátkodobý maximální příkon ²⁾	50 W
Jmenovitá impedance	8 Ohm
Rezonanční kmitočet F_s ⁴⁾	55.0 Hz
Jmenovitý kmitočtový rozsah	50 - 15 000 Hz
Charakteristická citlivost ³⁾	87 dB

TS PARAMETRY

Pořízeno MLSSA D-0-10	
Efektivní plocha membrány S_d	77 cm ²
Stejnoseměrný odpor kmitací cívky R_e	6.3 Ohm
Mechanický činitel jakosti Q_{ms}	2.41
Elektrický činitel jakosti Q_{es}	1.24
Celkový činitel jakosti Q_{ts}	0.82
Indukčnost kmitací cívky L_e	0.2 mH
Ekvivalentní objem V_{as}	13.4 l
Celková kmitající hmotnost M_{ms}	5.2 g

Mechanická poddajnost závěsu Cms	1608 uM/Newton
Silový faktor Bl	3.0 Tm
Maximální lineární výchylka Xmax ⁵⁾	1.0 mm

MECHANICKÁ DATA

Materiál kmitací cívky	hliník
Průměr kmitací cívky	19.2 mm
Výška vinutí kmitací cívky	5.5 mm
Průměr jádra	18 mm
Výška vzduchové mezery	3.5 mm
Vnější průměr magnetu	60 mm
Vnitřní průměr magnetu	26 mm
Výška magnetu	13 mm
Vnější průměr kompenzačního magnetu	60 mm
Vnitřní průměr kompenzačního magnetu	26 mm
Výška kompenzačního magnetu	13 mm
Hmotnost	0.75 kg

ZKUŠEBNÍ PODMÍNKY

Zkušební napětí 4.5 V

Kmitočtový rozsah 20 - 20 000 Hz

DIN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 5 dm³.

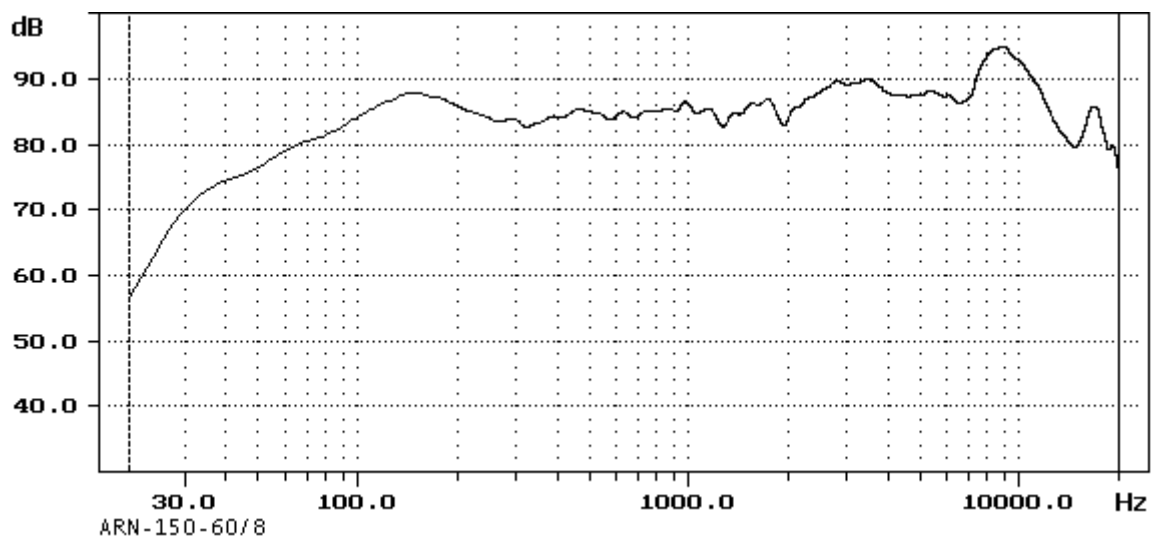
2) ČSN IEC 268-5, uzavřená ozvučnice 5 dm³.

3) ČSN IEC 268-5, standardní ozvučnice, 1W, 1 m, 250 - 4000 Hz

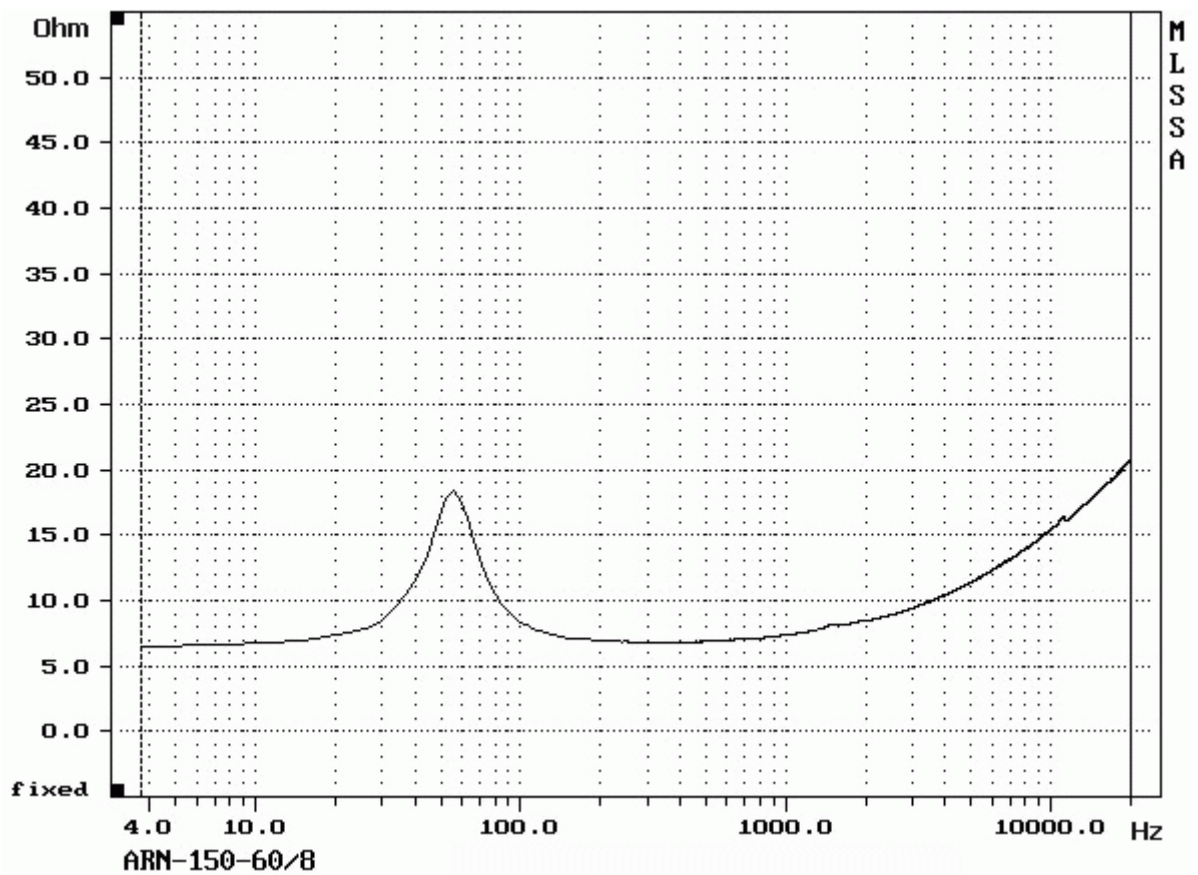
4) ±10 Hz

5) Špička - špička

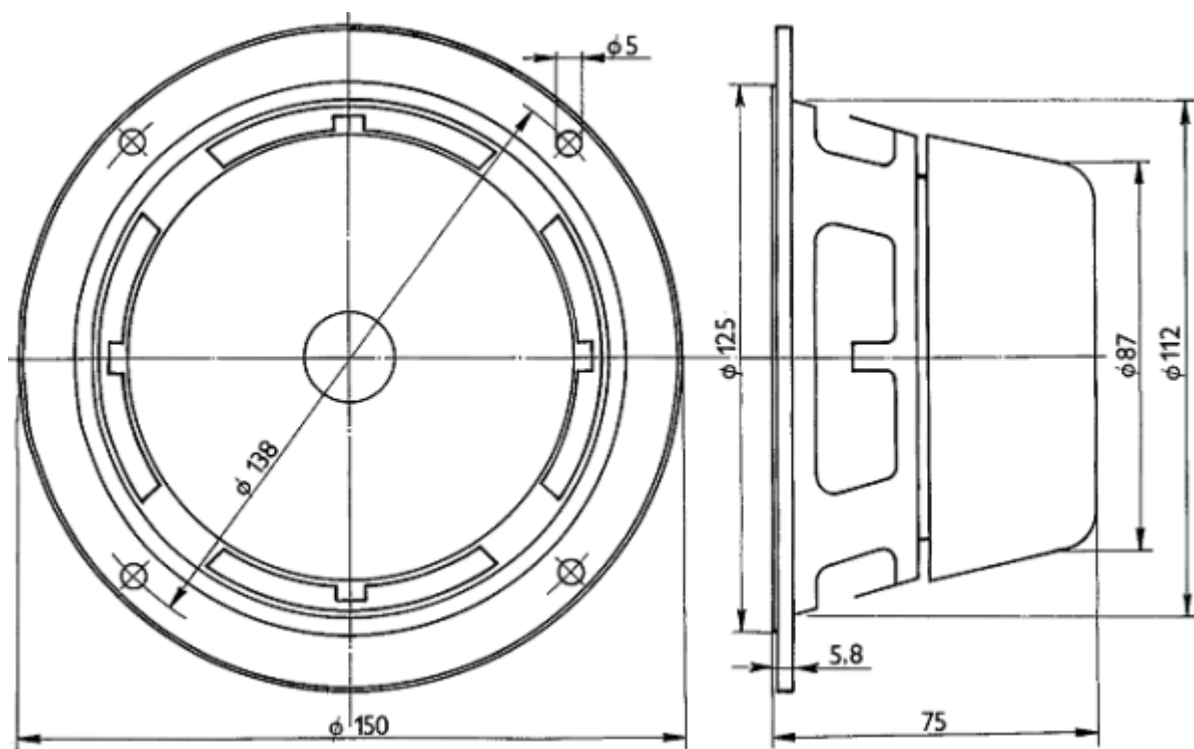
Kmitočtová charakteristika



Impedanční křivka



Výkres



B KATALOGOVÝ LIST TLUMÍCÍHO MATERIÁLU VICOUSTIC FLEXI PANEL A50

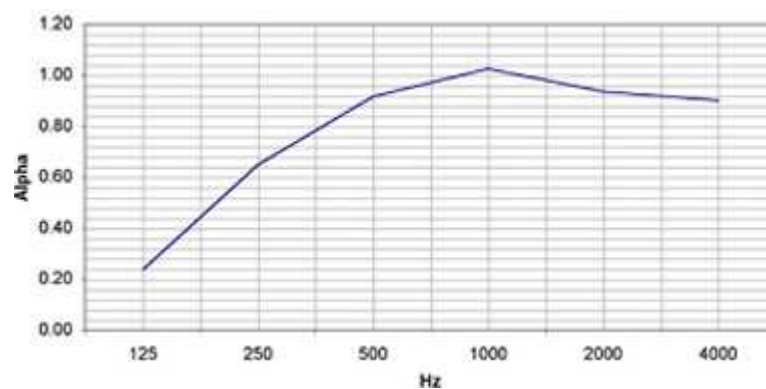


Akustické panely řady *Flexi Line* jsou založeny na nové revoluční konstrukci, která umožňuje vysoce efektivní absorpci rušivých zvukových vlivů v jakémkoli typu a velikosti místnosti či akustických prostor. Díky unikátní kombinaci použitých materiálů, speciálně navrženého absorbčního tvarování povrchu panelů a dostatečné tloušťce je zaručeno dokonalé odhlučnění, kdy rušivé frekvence jsou zachyceny a rozptýleny již při počátečním dopadu na plochu absorbčních desek. Model Flexi A50 zaručuje nejlepší možnou účinnost se zvýšenou ochranou především v pásmech středních a vyšších frekvencí.[5]

Využití se nabízí převážně v profesionálních rozhlasových, televizních či zvukových studiích. Panely Flexi A50 nabízí neoptimálnější efektivní řešení při zachování příznivé nízké ceny. Jednotlivé panely se dají umístit vedle sebe v libovolných konfiguracích, a jejich spojnice umožňují například vedení kabelů, či jiné studiové instalace, která takto zůstane skryta oku a nebude působit rušivě[5].

Technické údaje[5]:

- materiál: akustická pěna – HR
- rozměry: 60 x 60 x 5cm
- hořlavost: splňuje normu ISO 3795



Obr. 0.1 Kmitočtová charakteristika průběhu činitele pohltivosti α [5]