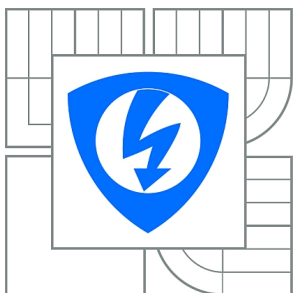


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DVOUPÁSMOVÁ STEREOFONNÍ REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA

TWO-WAY STEREO SPEAKER SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

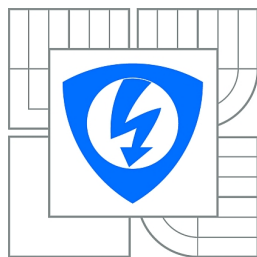
PAVEL KOČVARA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ KRATOCHVÍL, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Pavel Kočvara

ID: 22371

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Dvoupásmová stereofonní reproduktorová soustava

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete pasivní dvoupásmovou stereofonní reproduktorovou soustavu s výkonem do 50 W RMS / 8 ohmů a její výhybku. Při výběru reproduktorů se zaměřte na dosažení citlivosti alespoň 90 dB/W/m. Navrhnete konstrukční uspořádání ozvučnice a celkovou reproduktorovou skříň s ohledem na stávající standardy a doporučení ITU/AES.

V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, konstrukční výkresy atd.). Navržené zařízení realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měření ověřte technické parametry a směrové charakteristiky reprosoustavy. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.

[2] TOMAN, K. Reprodukory a reprosoustavy. Karviná: Dexon, 2001.

[3] METZLER, B. Audio Measurement Handbook. Beaverton: Audio Precision, Inc., 1993.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem pasivní dvoupásmové stereofonní reproduktorové soustavy s výkonem 50 W RMS / 8 Ω pro běžné domácí použití. S ohledem na požadovanou citlivost 90 dB/W/m byly použity středobasové reproduktory Beyma 5MP50/N a výškové reproduktory Beyma T2030. Ozvučnice je bassreflexová, z desek MDF a s vnitřním tlumením z polyuretanové pěny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Reproduktor, výhybka, ozvučnice

ABSTRACT

The Bachelor thesis deals with design of a passive two-way stereo speaker system with performance 50 W RMS / 8 Ω for normal domestic use. With respect to its sensitivity 90 dB/W/m mid-range speakers Beyma 5MP50/N and tweeter Beyma T2030 were used. The enclosure is a type of bass-reflex and it is made of MDF material with internal damping from polyurethane coat.

KEYWORDS

Loud-speaker, crossover, enclosure

KOČVARA, P. *Dvoupásmová stereofonní reproduktorová soustava*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2013. 43 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Dvoupásmová stereofonní reproduktorová soustava“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	10
1 Reprodaktor	11
1.1 Dělení reproduktorů podle frekvenčního rozsahu	11
1.1.1 Širokopásmové reproduktory	11
1.1.2 Hlubokotónové (basové) reproduktory	12
1.1.3 Středotónové reproduktory	12
1.1.4 Vysokotónové reproduktory	12
1.2 Výběr reproduktorů	12
1.2.1 Použité reproduktory	13
1.3 Středobasový reproduktor Beyma 5MP60/N	14
1.3.1 Náhradní schéma reproduktoru	14
2 Ozvučnice	16
2.1 Uzavřená ozvučnice	16
2.2 Bassreflexová ozvučnice	16
2.2.1 Návrh Bassreflexové ozvučnice podle normovaných charakteristik	16
3 Konstrukce reproduktorové skříně	19
3.1 Stavební materiál	19
3.1.1 M.D.F. - Medium density fibre board	19
3.1.2 D.T.D. - Dřevotřísková deska	19
3.1.3 Překližka z břízy	19
3.1.4 Překližka z topolu	19
3.1.5 Vícejádro - multi core	20
3.1.6 Lamináty	20
3.1.7 Beton, kámen, plast	20
3.2 Spojování stěn	20
3.3 Tlumení stojatých vln	21
3.3.1 Tlumící materiál	21
3.3.2 Tloušťka tlumícího materiálu	21
3.4 Rozmístění reproduktorů	22
3.5 Konstrukce ozvučnice	22
3.5.1 Konstrukční schéma reproduktorové skříně	23

4	Výhybka	24
4.1	Stanovení dělicích kmitočtů	24
4.2	Návrh pomocí vzorců	24
4.3	Kompenzace indukčnosti kmitačky	25
4.4	Vyrovnaní citlivosti výškového reproduktoru	26
4.5	Schéma výhybky pro středobasovou a výškovou větev	27
4.6	Simulace amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky výhybky	27
4.7	Ochrana a pólování reproduktorů	28
5	Konstrukční podklady k realizaci návrhu a stavba reprosoustavy	29
5.1	Schéma zapojení výhybky	29
5.2	Deska plošného spoje výhybky	30
5.3	Seznam součástí	31
5.4	Realizace výhybky	32
5.5	Realizace reproduktorové skříně	33
6	Měření reprosoustavy	34
6.1	Měření amplitudové kmitočtové charakteristiky reprosoustavy	34
6.2	Měření směrové charakteristiky reprosoustavy	35
7	Závěr	36
	Literatura	37
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	38
	Seznam příloh	39
A	Katalogový list - výškový reproduktor BEYMA T2030	40
B	Katalogový list - středobasový reproduktor BEYMA 5MP60N	41
C	Tabulka naměřených hodnot amplitudové frekvenční charakteristiky reprosoustavy	42
D	Tabulka naměřených hodnot směrových charakteristik reprosoustavy	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Elektrodynamický reproduktor - schématický řez (převzato z [1]). . .	11
1.2	Středobasový hifi reproduktor Beyma 5MP60/N (převzato z [3]). . . .	13
1.3	Výškový hifi reproduktor Beyma T-2030 (převzato z [3]).	14
1.4	Náhradní elektrické schéma středobasového reproduktoru Beyma 5MP60/N v programu PSpice.	15
1.5	Simulace impedančního a fázového frekvenčního průběhu reproduk- toru Beyma 5MP60/N v programu PSpice.	15
2.1	Normovaná charakteristika pro reproduktor s $Q_{ts}=0,3$ (převzato z [2]).	17
3.1	Spojování stěn na tup, na pokos, na zámek.	20
3.2	Konstrukční schéma reproduktorové skříně.	23
4.1	Informativní vzorce a schémata pro návrh jednotlivých propustí s různými strmými (převzato z [2]).	25
4.2	Schéma výhybky pro středobasovou a výškovou větev.	27
4.3	Simulace amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky výhybky v programu LspCAD.	27
5.1	Schéma zapojení výhybky v návrhovém systému Eagle.	29
5.2	Deska plošného spoje výhybky - strana spojů (bottom).	30
5.3	Deska plošného spoje výhybky - strana součástek (top).	30
5.4	Realizovaná výhybka dle konstrukčních podkladů.	32
5.5	Realizovaná ozvučnice dle konstrukčních podkladů.	33
6.1	Amplitudová frekvenční charakteristika reprosoustavy.	34
6.2	Směrové charakteristiky reprosoustavy.	35

SEZNAM TABULEK

2.1	Orientační průměr nátrubku podle průměru reproduktoru (převzato z [2]).	17
3.1	Tloušťka tlumícího materiálu podle průměru reproduktoru (převzato z [4]).	21
4.1	Orientační hodnoty odporů pro jednotlivé úrovně útlumu (převzato z [2]).	26
5.1	Seznam součástí pro stavbu výhybky.	31

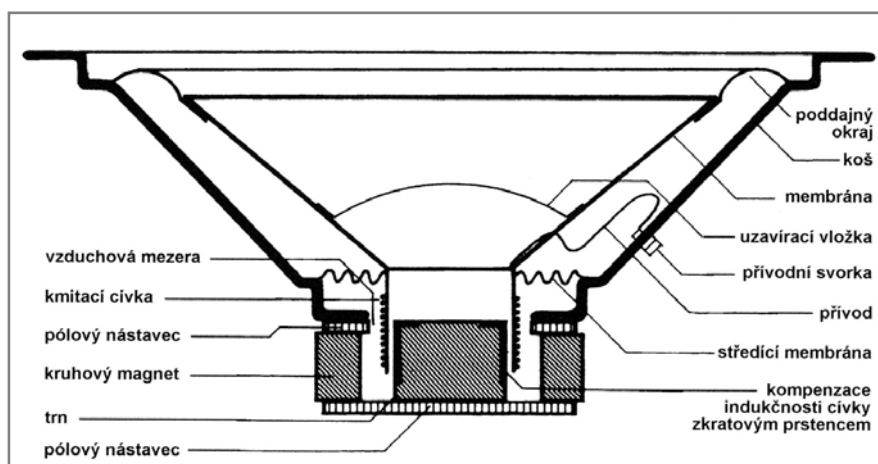
ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je návrh a realizace stereofonní dvoupásmové reproduktorové soustavy, včetně návrhu a konstrukce ozvučnice, dále návrh a simulace výhybky pomocí simulačního programu LspCAD.

Práce je rozdělena na 6 částí. První část popisuje reproduktory a jejich charakteristiky, dále simuluje náhradní elektrické schéma reproduktoru v programu PSpice. Druhá část se zaměřuje na návrh ozvučnice podle normovaných charakteristik. Následující kapitola se zabývá konstrukcí reproduktorové skříně. Ve čtvrté kapitole je ukázán jeden ze způsobů návrhu výhybky včetně její simulace v programu LspCAD. Pátá kapitola pojednává o konstrukčních podkladech pro samotnou výrobu reprosoustavy, které zahrnují schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupisky součástek, dále popisuje vlastní realizaci výhybky a ozvučnice. Poslední část je věnována experimentálnímu měření a vyhodnocení technických parametrů a směrových charakteristik prototypu reprosoustavy.

1 REPRODUKTOR

Reproduktor bývá nazýván jako elektroakustický měnič, který přeměňuje elektrickou energii na akustickou. Ideálnímu reproduktoru odpovídá účinnost 100%, se kterou se u reálného reproduktoru nesetkáme, protože většina elektrické energie se změní na teplo.



Obr. 1.1: Elektroakustický reproduktor - schématický řez (převzato z [1]).

1.1 Dělení reproduktorů podle frekvenčního rozsahu

Pro návrh reprosoustavy je jedním z nejdůležitějších kroků samotný výběr reproduktorů podle toho, pro jaký účel bude reprosoustava sloužit. Tím je myšleno, zda bude reprosoustava ozvučovat jednu místnost v domácnosti, či koncerty na otevřené scéně. Každý reproduktor má svou šířku frekvenčního pásma, ve které dokáže zahrát. Hladina akustického tlaku SPL (sound pressure level) by neměla v tomto pásmu klesnout o více než 3 dB.

1.1.1 Širokopásmové reproduktory

Tyto celorozsahové reproduktory (full-range) dokáží zahrát od basů až po soprány. Používají se převážně v automobilech nebo dopravních prostředcích, televizorech a jiných nenáročných prostředích. Jejich běžný kmitočtový rozsah se pohybuje od 45 - 15 000 Hz.

1.1.2 Hlubokotónové (basové) reproduktory

Basové reproduktory, označované jako Woofers nebo Sub-woofers, jsou nejširší skupinou reproduktorů. Jsou určeny pro reprodukci nízkých kmitočtů od 20 Hz - 5 000 Hz. Všeobecně platí, že reproduktory většího průměru dokáží zahrát nižší kmitočty, ale vyžadují větší ozvučnici. Naopak menší reproduktory mají lepší přenos středních a vyšších kmitočtů, mají lepší dynamické vlastnosti a při rostoucím kmitočtu tolik nesměřují. Basové reproduktory a jejich parametry bývají nejdůležitější a rozhodující pro celkový návrh reprosoustavy.

1.1.3 Středotónové reproduktory

Pro tyto reproduktory, které anglicky označujeme jako Mid-range, je příznačné pásmo kmitočtů od 500 Hz - 4 000 Hz, ve kterém kvalitně reprodukují. Z hlediska kvality třípásmových reprosoustav patří k nejnamáhanějším a nejdůležitějším, neboť přenáší frekvence, na které je lidské ucho nejvíce citlivé (okolo 3,5 kHz). Frekvenční charakteristika musí být co nejplošší, aby při reprodukci nedocházelo ke zkreslení.

1.1.4 Vysokotónové reproduktory

Vysokotónové reproduktory (anglicky Tweeter) reprodukují kmitočty od 3 kHz výše. Vzhledem k jejich příliš velké charakteristické citlivosti je musíme oproti ostatním reproduktorům tlumit. Nízké kmitočty tyto reproduktory ohrožují. Na to je potřeba myslet při návrhu dělicího kmitočtu. U Hi-Fi reprosoustav se zpravidla používají kalotové reproduktory, které mají nižší zkreslení a vyrovnanější kmitočtovou charakteristiku.

1.2 Výběr reproduktorů

S ohledem na zadání a požadavky na reprosoustavu, která bude sloužit pro běžný domácí poslech, byla vybrána kombinace středobasového reproduktoru Beyma 5MP60/N s výkonem 50 W RMS a rezonanční frekvencí 60 Hz a kalotového výškového reproduktoru Beyma T-2030 s výkonem 15 W RMS a rezonanční frekvencí 1 050 Hz.

1.2.1 Použité reproduktory

Středobasový hifi reproduktor Beyma 5MP60/N



Obr. 1.2: Středobasový hifi reproduktor Beyma 5MP60/N (převzato z [3]).

Specifikace:

- nominální průměr ϕ 5"
- zatížitelnost 60 W RMS
- impedance 8 Ω
- citlivost 91 dB/1W,1m
- frekvenční rozsah 50 - 12 000 Hz
- průměr cívky ϕ 25,8 mm
- hmotnost magnetu 1 kg
- rezonanční kmitočet f_s 60 Hz
- činný odpor kmitací cívky R_e 5,33 Ω
- celkový činitel jakosti Q_{ts} 0,29
- ekvivalentní objem V_{as} 9,8 l
- účinnost η 0,5 %
- maximální výchylka membrány X_{max} 4 mm

Výškový hi-fi reproduktor Beyma T-2030



Obr. 1.3: Výškový hi-fi reproduktor Beyma T-2030 (převzato z [3]).

Specifikace:

- zatížitelnost 15 W RMS
- impedance 8Ω
- citlivost 95 dB/1W,1m
- frekvenční rozsah 1 500 - 20 000 Hz
- doporučená dělicí frekvence 2 000 Hz
- průměr cívky ϕ 25,4 mm
- rezonanční kmitočet f_s 1050 Hz
- materiál membrány Al
- materiál magnetu Ferit

1.3 Středobasový reproduktor Beyma 5MP60/N

1.3.1 Náhradní schéma reproduktoru

Výpočet prvků náhradního schématu z parametrů podle katalogového listu [2]:

$$R_1 = R_e = 5,33 \Omega \quad (1.1)$$

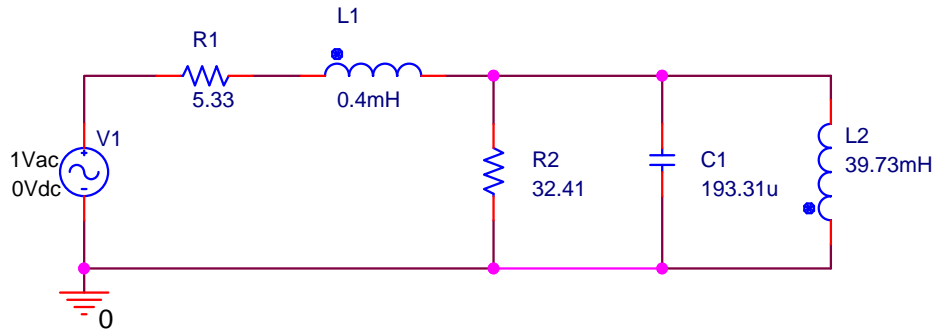
$$L_1 = L_e = 0,40 \text{ mH} \quad (1.2)$$

$$R_2 = \frac{Bl^2}{R_{ms}} = \frac{6,4^2}{1,75} = 23,41 \Omega \quad (1.3)$$

$$L_2 = C_{ms} \cdot Bl^2 = 0,97 \cdot 10^{-3} \cdot 6,4^2 = 39,73 \text{ mH} \quad (1.4)$$

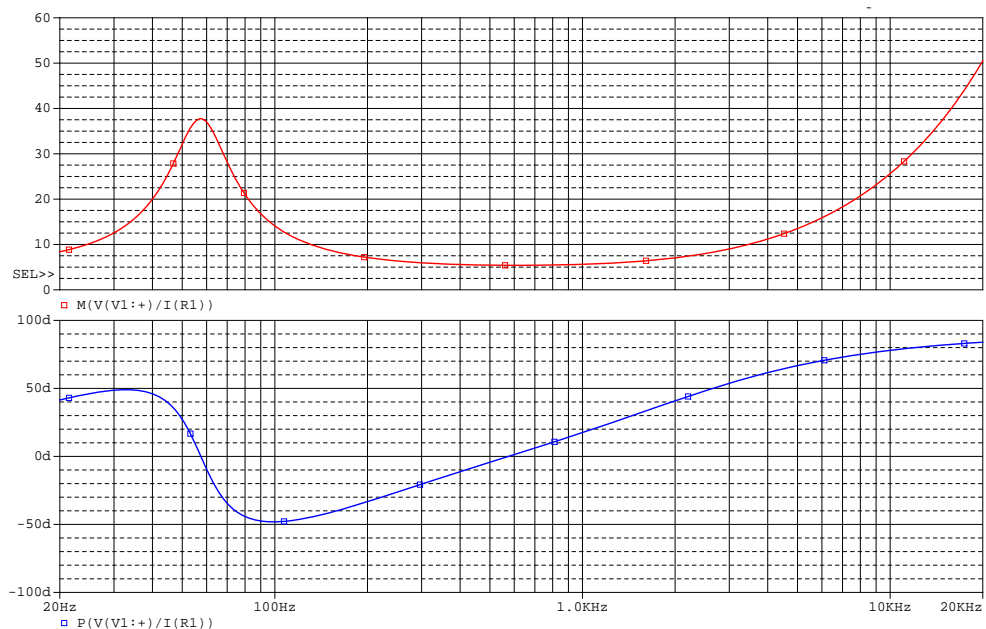
$$C_1 = \frac{M_{ms}}{Bl^2} = \frac{0,008}{6,4^2} = 195,31 \mu\text{F} \quad (1.5)$$

Náhradní elektrické schéma reproduktoru je zobrazeno na obr. 1.4.



Obr. 1.4: Náhradní elektrické schéma středobasového reproduktoru Beyma 5MP60/N v programu PSpice.

Simulace impedančního a fázového frekvenčního průběhu reproduktoru Beyma 5MP60/N v programu PSpice je znázorněna na obr. 1.5.



Obr. 1.5: Simulace impedančního a fázového frekvenčního průběhu reproduktoru Beyma 5MP60/N v programu PSpice.

2 OZVUČNICE

Ozvučnice, která představuje reproduktorovou skříň, slouží k oddělení přední a zadní zvukové vlny z reproduktoru. Tím zamezuje jevu nazývanému jako akustický zkrat, kdy dochází k vzájemnému vyrušení přední a zadní vlny. Nejčastěji se používají uzavřené a bassreflexové ozvučnice.

2.1 Uzavřená ozvučnice

Uzavřenou ozvučnici tvoří hermeticky utěsněná skříň daného objemu. Zadní vlna zůstane v této ozvučnici uvězněna a mechanická energie se přemění na teplo, čímž ale dochází ke snížení účinnosti. Tato energie se může částečně využít, když místo uzavřené ozvučnice bude použita ozvučnice typu bassreflex.

2.2 Bassreflexová ozvučnice

Bassreflexová ozvučnice je oproti uzavřené ozvučnici opatřena bassreflexovým nátrubkem (bývá označován jako Helmholtznový rezonátor), což je část trubky kruhového či obdélníkového průřezu. Ne vždy je tato ozvučnice vhodná, a proto byl stanoven tzv. činitel EBP (anglicky Efficiency Bandwidth Product)[2]:

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} = \frac{60}{0,35} = 171,43 \text{ Hz} \quad (2.1)$$

Pokud je $EBP < 50$, pak se reproduktor hodí do uzavřené ozvučnice. V opačném případě se užívá ozvučnice typu bassreflex. Na základě tohoto činitele byla vybrána ozvučnice typu bassreflex.

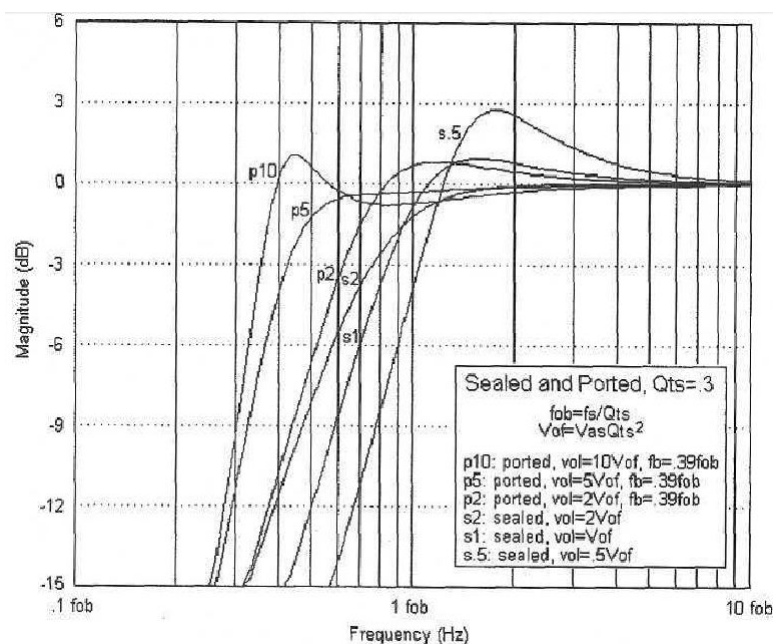
2.2.1 Návrh Bassreflexové ozvučnice podle normovaných charakteristik

Tato metoda výpočtu bassreflexové ozvučnice je velmi rychlá. Každé výchozí hodnotě Q_{ts} odpovídá jistá sada charakteristik. Ta nám určí, jaký objem a ladění se má použít. Nejdříve se určí pomocné konstanty [2]:

$$f_{ob} = \frac{f_s}{Q_{ts}} = \frac{60}{0,29} = 206,90 \text{ Hz} \quad (2.2)$$

$$V_{of} = V_{as} \cdot Q_{ts}^2 = 9,8 \cdot 0,29^2 = 0,82 \text{ l} \quad (2.3)$$

Z normovaných sad charakteristik na obr. 2.1 byl vybrán průběh charakteristiky p5 pro reproduktor s $Q_{ts}=0,3$, který má nejmenší zvlnění.



Obr. 2.1: Normovaná charakteristika pro reproduktor s $Q_{ts}=0,3$ (převzato z [2]).

Objem ozvučnice pak je podle vzorce [2]:

$$V_b = 5 \cdot V_{of} = 5 \cdot 0,82 = 4,12 \sim 5,00 \text{ l} \quad (2.4)$$

Rezonanční frekvence pro bassreflex podle vzorce [2]:

$$f_b = 0,39 \cdot f_{ob} = 0,39 \cdot 206,90 = 80,69 \text{ Hz} \quad (2.5)$$

Tab. 2.1: Orientační průměr nátrubku podle průměru reproduktoru (převzato z [2]).

ϕ reproduktoru [mm]	ϕ nátrubku [mm]
<100	30
130-165	50
165-200	75
200-250	100
250-305	130
305-380	160

Z tabulky 2.1 byl zvolen průměr nátrubku ϕ 50 mm. Délka nátrubku pak je podle vzorce [2]:

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732 \cdot d = \frac{2361 \cdot 0,05^2}{80,69^2 \cdot 0,005} - 0,732 \cdot 0,05 = 0,145 \text{ m} \quad (2.6)$$

Rozteč reproduktorů podle dělicího kmitočtu $f_d = 3,5$ kHz [2]:

$$l = \frac{425}{f_d} = \frac{425}{3500} = 0,121 \text{ m} \quad (2.7)$$

Rozměry reproduktorové skříně vychází z poměru stran zvaného „golden ratio“ (š:v:h) 0,62 : 1,62 : 1. Rozměry stran byly upraveny podle rozměrových parametrů reproduktorů a nátrubku při zachování vnitřního objemu. Výsledný poměr stran je 0,93 : 1,6 : 1. Tloušťka desek ozvučnice byla zvolena 18 mm.

3 KONSTRUKCE REPRODUKTOROVÉ SKŘÍNĚ

3.1 Stavební materiál

Pro stavbu reproduktorové skříně je vhodné použít materiál, který je nejtěžší, nejtěžší, s největším vnitřním tlumením. Pro stavbu reproduktorové skříně se používají desky M.D.F (medium density fiber board), dřevovláknité desky D.T.D, lisované desky (particle board), překližky z břízy (birch plywood), překližky z topolu (poplar plywood) a vícejádra.

3.1.1 M.D.F. - Medium density fibre board

Desky M.D.F. jsou těžké, vyznačují se velkým vnitřním tlumením. Jsou dobrým materiálem pro skříně určené k domácímu použití, kde jejich velká hmotnost není překážkou vzhledem k malým objemům reproduktorové skříně. Svou tíhou přispívají k dobré stabilitě i při větších úrovních hlasitosti.

3.1.2 D.T.D. - Dřevotřísková deska

Tato deska, tvořená lisovaným dřevoodpadem, je nejpoužívanějším materiálem pro výrobu reproduktorových skříní. Je středně těžká a levnější než deska M.D.F., oproti které má však horší tuhost. Často se používá v tloušťkách 18, 20 nebo 25 mm.

3.1.3 Překližka z břízy

Břízová překližka je středně těžká, je silným a tuhým materiálem. Její vnitřní tlumení není tak dobré jako u desky M.D.F., je nejdražším a nejtrvanlivějším materiálem, který se používá k výrobě reproduktorových skříní, převážně profesionálních. Výhodou je použití pro mobilní systémy a ve venkovních prostorech.

3.1.4 Překližka z topolu

Překližka z topolu je lehká, silná a levnější než břízová překližka, proto se používá pro systémy, které je potřeba často přemísťovat. Nevýhodou jsou prázdná místa uvnitř překližky, která negativně ovlivňují reprodukci různými rezonancemi a zvonivými zvuky.

3.1.5 Vícejádro - multi core

Tento materiál má využití v každé situaci, kdy se používá překližka z topolu. Stojí téměř stejně, nevyskytují se u něj defektní prázdná místa a lépe v něm drží vruty než v překližce z topolu.

3.1.6 Lamináty

Lamináty mohou výrazně snížit rezonanci reproduktorové skříně. Jsou tvořeny slepenými pláty dřeva různých druhů, které vlivem odlišné rezonance pomáhají odstranit případné vibrace. Předností těchto desek je nízká hmotnost a tloušťka. Špatně se zajišťuje přilnavost mezi deskami, která má za následek zvonivý zvuk způsobený prázdnými prostory mezi jednotlivými vrstvami.

3.1.7 Beton, kámen, plast

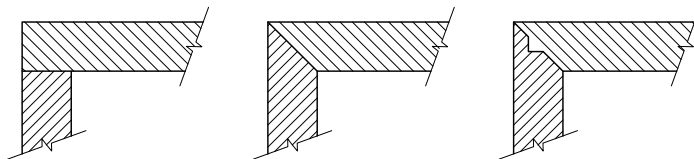
Beton je silný a těžký materiál s vynikající tuhostí pro malé HiFi reprosoustavy. Zpracování není technologicky příliš snadné. Kámen je tvrdý a těžký, ale má tendenci zvonit. Používá se břidlice, pískovec, mramor, žula a vápenec. Zvonivost je nutné tlumit dalším nalepeným materiálem. Plasty nepatří mezi příliš oblíbené materiály. Jsou výrobně dobře reprodukovatelné, ale dražší. Často se používají pro malé satelitní reprosoustavy, pro plošné ozvučení a levnější autosubwoofery.

3.2 Spojování stěn

Používá se mnoho způsobů, jak spojovat stěny reproduktorové skříně.

Nejčastěji se používají tyto spoje:

- Na tupo - má malou pevnost, která se musí kompenzovat doplněním hranolků v rozích. Spojením na tupo vzniká nevzhledná spára, která se překrývá dýhou.
- Na pokos - stejně jako u spoje na tupo se pevnost musí vyztužit hranolky. Není nutné odýchování, jelikož nevzniká nevzhledná spára.
- Na pokos se zámkem - mají nejlepší pevnost, avšak jejich výroba kvůli nárokům na přesnost není jednoduchá.



Obr. 3.1: Spojování stěn na tup, na pokos, na zámek.

3.3 Tlumení stojatých vln

Tlumení se používá pro zabránění vzniku stojatých vln uvnitř ozvučnice, které vznikají sloučením přímé vlny a dalších odražených vln. Na frekvenční charakteristice se projevují zvlněním na daných kmitočtech, které se určí podle vzorce [2]:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \Rightarrow f = 2^k \frac{340}{l} \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.1)$$

kde l je daný rozměr soustavy a čísla k jsou módy, které odpovídají násobkům vlnové délky λ .

Je několik možností tlumení.

- Tlumení na stěny - nejčastěji používaný způsob tlumení. Tlumí se stěny zadní, horní, spodní, levá a pravá. Čím tlustší vrstva, tím lepší (větší účinek na nižších kmitočtech).
- Tlumení na výztuhu - v případě použití výztuhy se omotává příčka tvořící výztuhu skříně několika vrstvami tlumícího materiálu. Nejúčinnějšího tlumení se dosáhne, pokud je příčka v polovině největšího rozměru, kde je amplituda stojatého vlnění největší.
- Tlumení metodou zig-zag - jedná se o nejúčinnější metodu, kdy je tlumící materiál veden zleva doprava a pak zpět. Nevýhodou této metody je snížení celkového činitele jakosti soustavy.

3.3.1 Tlumící materiál

Jako tlumící materiál se používá speciálních tlumících prostředků jako je vatelín, vata, skelná vata, igelit a tlumící rouna s vysokou pohltivostí.

3.3.2 Tloušťka tlumícího materiálu

Tloušťka se volí přibližně podle velikosti basového reproduktoru.

Tab. 3.1: Tloušťka tlumícího materiálu podle průměru reproduktoru (převzato z [4]).

ϕ reproduktoru [mm]	ϕ tloušťka tlumícího materiálu [mm]
100	10
150	15
200	20
300	30

3.4 Rozmístění reproduktorů

Rozteč reproduktorů společně se strmostí a dělicím kmitočtem výhybky f_d má významný vliv na výslednou směrovou charakteristiku reprosoustavy.

Rozteč výškového a středobasového reproduktoru je dána vzorcem [2]:

$$d = \frac{425}{f_d} = \frac{425}{3,5 \cdot 10^3} = 0,121 \text{ m} \quad (3.2)$$

Vzorec je určený pro $5/4$ vlnové délky odpovídajícího dělicího kmitočtu.

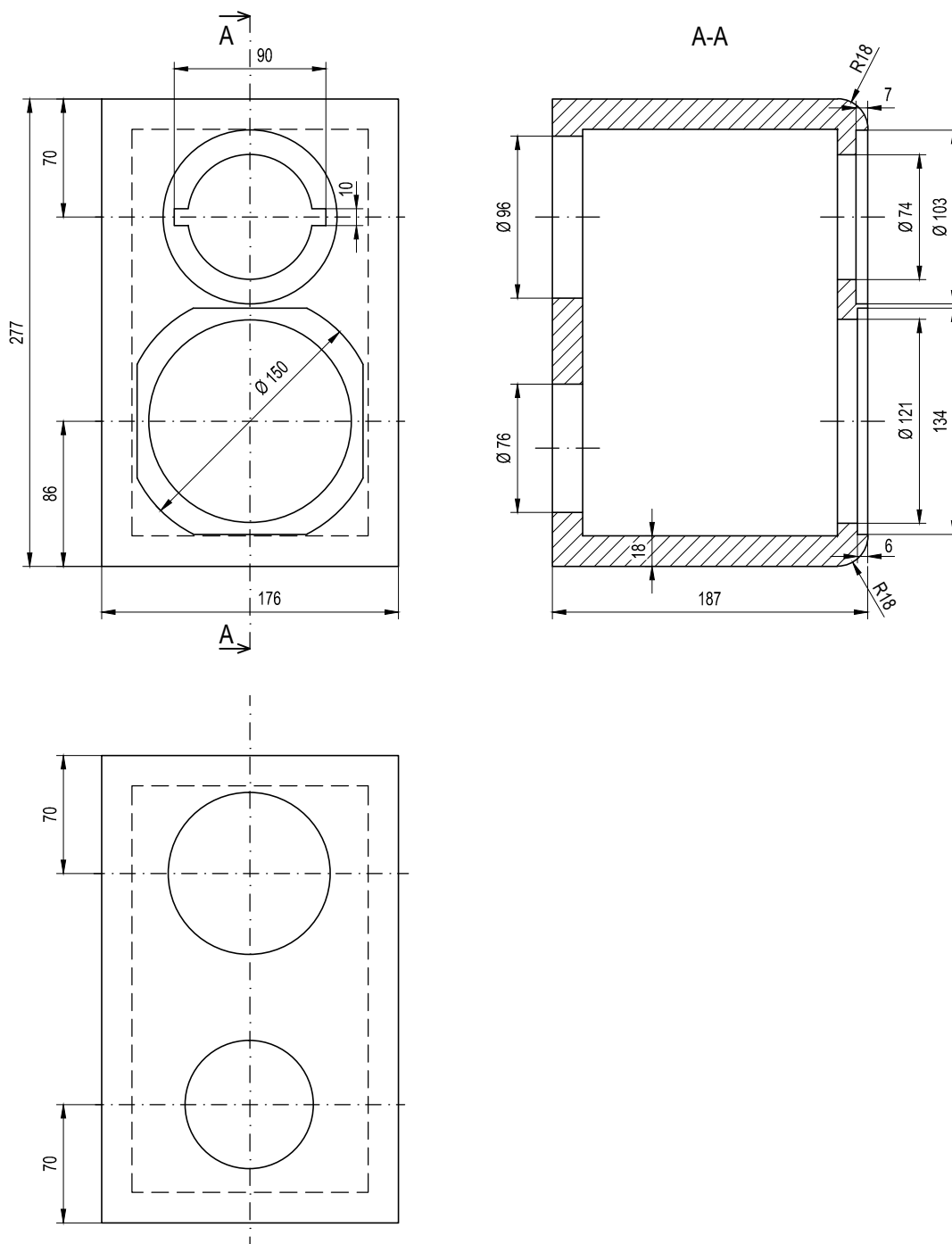
Výškový reproduktor je dobré zapustit do čelní desky kvůli případným difrakcím. Středobasový reproduktor je vhodné u dvoupásmových reprosoustav také zapustit. Nejčastější rozmístění reproduktorů na čelní straně je symetricky podle svislé osy. Kvůli difrakcím se zaoblují či zkosují rohy a hrany skříně.

3.5 Konstrukce ozvučnice

Jako materiál pro reproduktorovou skříň byla vybrána deska M.D.F. tloušťky 18 mm. Rozteč reproduktorů je 121 mm (podle vzorce (3.2)). Rozměry skříně vycházejí z vnitřního čistého objemu 5 litrů (byl odečten objem reproduktorů). Poměr stran byl určen 1 : 2,17 : 1,33 (š x v x h). Jako materiál pro vnitřní tlumení jsou použita tlumící polyuretanová rouna.

3.5.1 Konstrukční schéma reproduktorové skříně

Konstrukční schéma bylo vytvořeno v grafické progamu AutoCad.



Obr. 3.2: Konstrukční schéma reproduktorové skříně.

4 VÝHYBKA

Výhybka slouží v reproduktorových soustavách k rozdělení celkového kmitočtového pásma na několik dílčích pásem pro jednotlivé reproduktory. Tím umožňuje využít předností jednotlivých reproduktorů a naopak potlačit jejich nežádoucí vlastnosti. Reproduktorová výhybka je tvořena filtry:

- pro basový reproduktor **dolní propust** (low pass) - propouští pásmo do určitého kmitočtu;
- pro středotónový reproduktor **pásmová propust** (band pass) - propouští pásmo v určitém rozmezí kmitočtů;
- pro výškový reproduktor **horní propust** (high pass) - propouští pásmo od určitého kmitočtu.

4.1 Stanovení dělících kmitočtů

Pro dvoupásmovou reproduktorovou soustavu se užívá pouze dolní a horní propusti s jedním dělícím kmitočtem. Podle kmitočtových charakteristik obou použitých reproduktorů byla jako dělící kmitočet zvolena frekvence $f_d = f_{dd} = f_{dh} = 3,5$ kHz.

4.2 Návrh pomocí vzorců

Návrh výhybky může probíhat dvěma způsoby. První možností je vytvoření obvodového modelu výhybky a její zátěže, který se upravuje ve vhodném simulačním programu. Druhou variantou je návrh pomocí známých vzorců, podle kterých se počítají jednotlivé součástky výhybky, sestaví se funkční model, který se na základě měření a poslechu postupně upravuje. K výpočtu výhybky byla využita varianta návrhu pomocí známých vzorců za využití aproximace Linkwitz-Rilley se strmostí 12 dB/oct pro dolní i horní propust.

Samotný výpočet jednotlivých propustí se pak řídí informativními vzorci uvedenými na obr. 4.1.

	6 dB / oct.	12 dB / oct.	18 dB / oct.
dolní propust LP			
	$L = \frac{Z_h}{2\pi f_{dd}}$	$L = \frac{Z_h}{\pi f_{dd}}, C = \frac{1}{4\pi f_{dd} Z_h}$	$L_2 = \frac{Z_h}{4\pi f_{dd}}, C = \frac{2}{3\pi f_{dd} Z_h}, L_1 = 3L_2$
horní propust HP			
	$C = \frac{1}{2\pi f_{dh} Z_v}$	$L = \frac{Z_v}{\pi f_{dh}}, C = \frac{1}{4\pi f_{dh} Z_v}$	$C_1 = \frac{1}{3\pi f_{dh} Z_v}, L = \frac{3Z_v}{8\pi f_{dh}}, C_2 = 3C_1$

Obr. 4.1: Informativní vzorce a schémata pro návrh jednotlivých propustí s různými strmostmi (převzato z [2]).

Výpočet prvků filtru dolní propusti se strmostí 12 dB/oct:

$$L_d = \frac{Z_h}{\pi \cdot f_{dd}} = \frac{8}{\pi \cdot 3,5 \cdot 10^3} = 727,57 \mu H \quad (4.1)$$

$$C_d = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_{dd} \cdot Z_h} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot 10^3 \cdot 8} = 2,84 \mu F \quad (4.2)$$

Výpočet prvků filtru horní propusti se strmostí 12 dB/oct:

$$L_h = \frac{Z_v}{\pi \cdot f_{dh}} = \frac{8}{\pi \cdot 3,5 \cdot 10^3} = 727,57 \mu H \quad (4.3)$$

$$C_h = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot f_{dh} \cdot Z_v} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot 10^3 \cdot 8} = 2,84 \mu F \quad (4.4)$$

4.3 Kompenzace indukčnosti kmitačky

Frekvenční závislost impedance připojených reproduktorů výhybku znehodnocuje, a proto je nutné impedanci vykompenzovat. Nejjednodušším řešením je zapojení

sériového RC členu na výstup výhybky, jehož impedance se zkombinuje s impedancí reproduktorů a ve výsledku výhybce poskytne téměř činnou zátěž. Tato kompenzace se nejčastěji provádí u basového reproduktoru. Hodnoty kompenzačního RC členu se určí dle vzorců [2]:

$$R_k = R_e = 5,33 \Omega \quad (4.5)$$

$$C_k = \frac{L_e}{R_e^2} = \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{5,33^2} = 14,08 \mu F \quad (4.6)$$

4.4 Vyrovnání citlivosti výškového reproduktoru

Jelikož každý reproduktor má rozdílnou citlivost, je nutné citlivosti vyrovnat. Největší rozdíl citlivostí bývá mezi basovým či středobasovým a výškovým reproduktorem, kde rozdíl může být i 8 dB. Proto se citlivost vyrovnává snížením citlivosti výškového reproduktoru a to zapojením odporového děliče do jeho větve výhybky. Hodnoty odporů podle daného útlumu jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tab. 4.1: Orientační hodnoty odporů pro jednotlivé úrovně útlumu (převzato z [2]).

útlum [dB]	R_{1u} [Ω]	R_{2u} [Ω]
1,3	1,00	47,00
2,2	1,50	22,00
3,3	2,20	15,00
3,7	2,20	10,00
5,5	3,30	8,20
7,1	3,90	5,60
8,5	4,70	4,70
9,2	4,70	3,90
9,8	4,70	3,30

Pro požadovaný útlum 3,7 dB jsou hodnoty prvků odporového děliče:

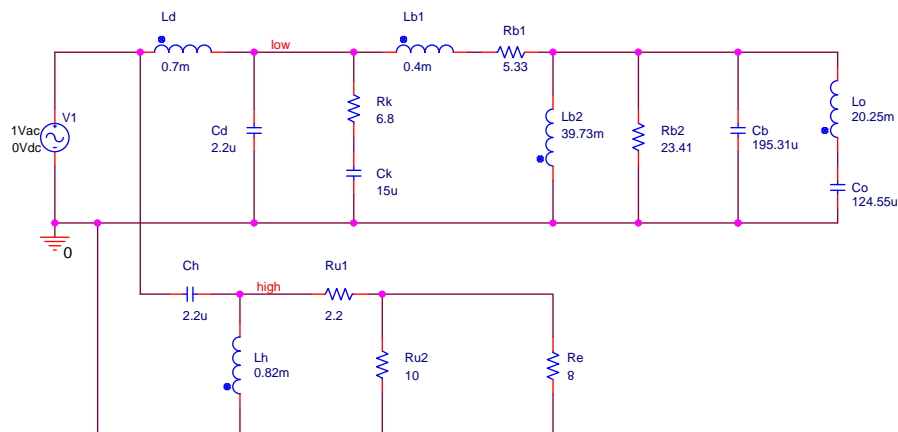
$$R_{u1} = 2,20 \Omega \quad R_{u2} = 10,00 \Omega \quad (4.7)$$

Celkový zatěžovací odpor výhybky tvořený kombinací útlumového členu a reproduktoru [2]:

$$R_z = R_{u1} + \frac{R_{u2} \cdot R_e}{R_{u2} + R_e} = 2,2 + \frac{10,5,33}{10 + 5,33} = 5,68 \Omega \quad (4.8)$$

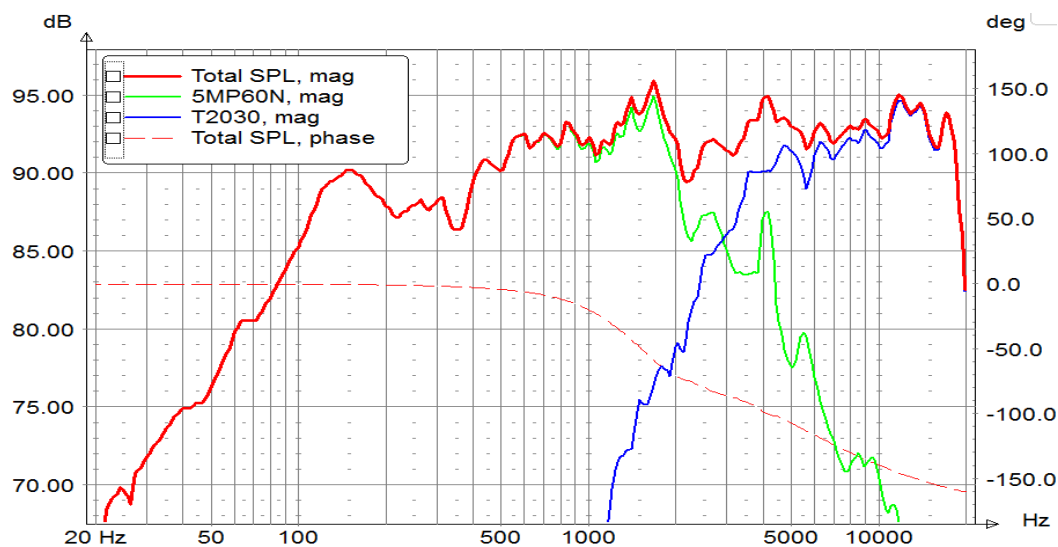
Vypočtené hodnoty prvků výhybky byly postupným doladováním v simulačním programu LspCAD upraveny na nové hodnoty s ohledem na jejich dostupnost.

4.5 Schéma výhybky pro středobasovou a výškovou větev



Obr. 4.2: Schéma výhybky pro středobasovou a výškovou větev.

4.6 Simulace amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky výhybky



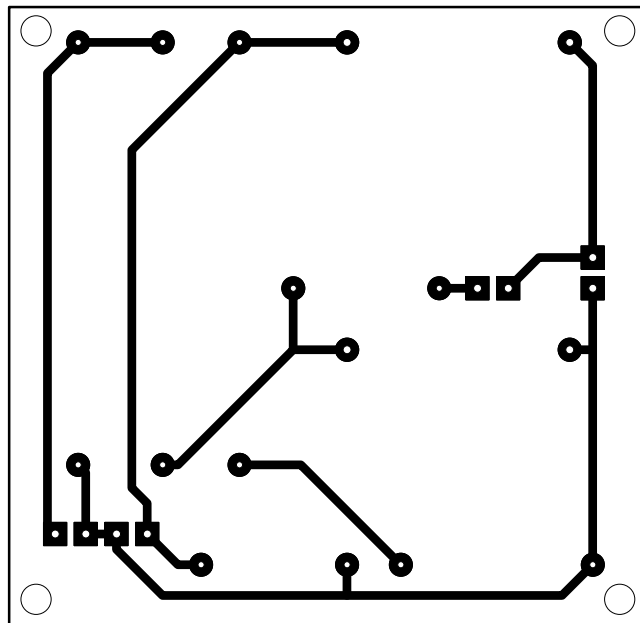
Obr. 4.3: Simulace amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky výhybky v programu LspCAD.

K simulaci byly použity podpůrné soubory obsahující naměřené amplitudové frekvenční charakteristiky a impedanční charakteristiky obou použitých reproduktorů Beyma 5MP60/N a Beyma T-2030, díky kterým jsou lépe postihnuty skutečné vlastnosti navržené výhybky (převzato z [5]).

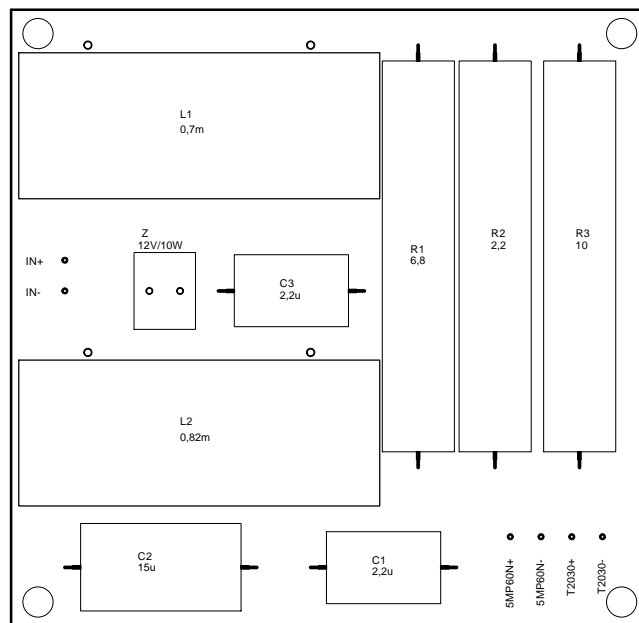
4.7 Ochrana a pólování reproduktorů

Jako ochranu proti výkonovému přetížení výškového reproduktoru se do výškové větve výhybky instaluje halogenová žárovka 12 V/10 W. Výškový reproduktor je zapojen s inverzní polaritou, neboť na dělicím kmitočtu reproduktory vyzařují s opačnou fází a na charakteristice by vznikl velký propad [2].

5.2 Deska plošného spoje výhybky



Obr. 5.2: Deska plošného spoje výhybky - strana spojů (bottom).



Obr. 5.3: Deska plošného spoje výhybky - strana součástek (top).

5.3 Seznam součástek

Tab. 5.1: Seznam součástek pro stavbu výhybky.

Označení	Hodnota	Popis
L1	0,7 mH	vzduchová cívka
L2	0,82 mH	vzduchová cívka
C1	2,2 μ F	svitkový kondenzátor
C2	15 μ F	svitkový kondenzátor
C3	2,2 μ F	svitkový kondenzátor
R1	6,8 Ω	výkonový keramický rezistor
R2	2,2 Ω	výkonový keramický rezistor
R3	10 Ω	výkonový keramický rezistor
-	-	deska plošných spojů
-	-	patice pro ochrannou žárovku
Z	12V/10W	ochranná žárovka
-	-	svorkovnice

5.4 Realizace výhybky

Pro výhybku byly použity součástky od firmy Dexon [3] (viz. Tab. 5.1). Deska plošného spoje byla vyrobena odbornou firmou podle konstrukčních podkladů.



Obr. 5.4: Realizovaná výhybka dle konstrukčních podkladů.

5.5 Realizace reproduktorové skříně

Reproduktorová skříň je vyrobena z desek M.D.F. (Medium density fibre board) tloušťky 18 mm. Stěny jsou spojovány na tupo s vyztužením dřevěnými kolíky a utěsněním silikonovým lepidlem. Přední hrany jsou kvůli difrakci zaobleny. Všechny stěny ozvučnice jsou kvůli tuhosti nerozebíratelně spojeny, a proto je vnitřní prostor přístupný pouze přes otvor pro basový reproduktor, případně otvor pro terminál. Na vnitřní strany ozvučnice je nalepeno tlumící polyuretanové rouno. Reproduktoři a terminál jsou uchyceny vruty délky 20 mm a utěsněny těsnící páskou. Skříň je opatřena bílým lesklým lakem na dřevo, který zakrývá spáry spojů.



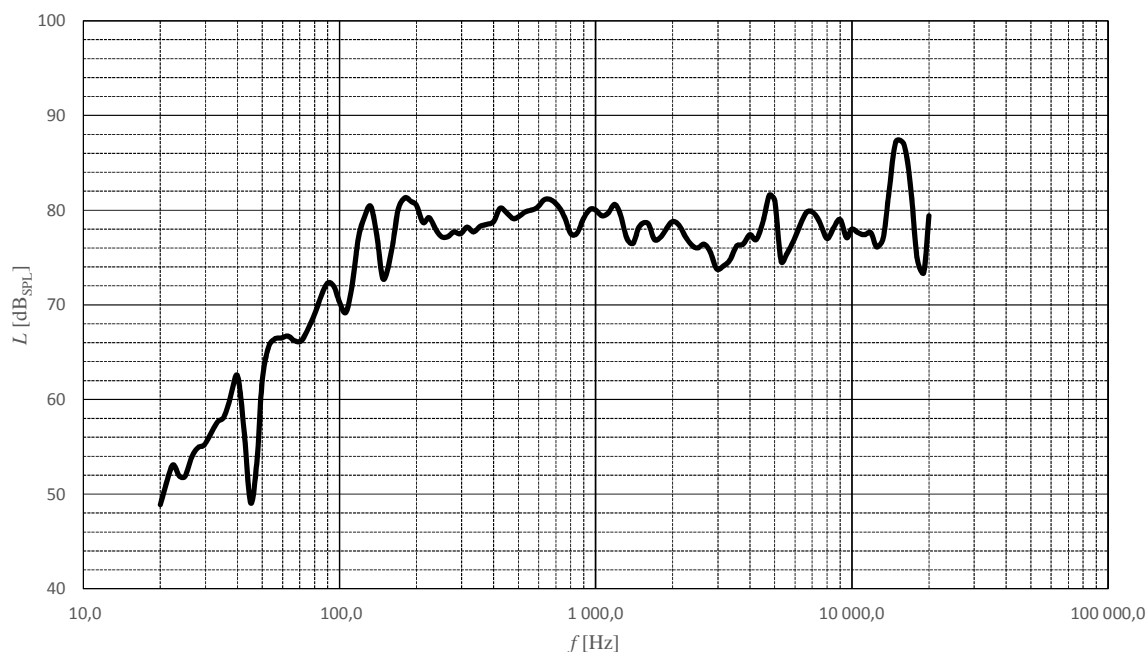
Obr. 5.5: Realizovaná ozvučnice dle konstrukčních podkladů.

6 MĚŘENÍ REPROSOUSTAVY

Reposoustava byla podrobena experimentálnímu měření, při kterém byly zjišťovány základní parametry reposoustavy, jako je směrová charakteristika a elektroakustický činitel přenosu udávající poměr akustického tlaku v určitém bodě v prostoru k vstupnímu napětí reposoustavy. Důležitá je závislost činitele přenosu na kmitočtu vstupního signálu, která udává amplitudovou frekvenční charakteristiku. Ta se vyjadřuje graficky jako závislost absolutní hodnoty činitele přenosu na kmitočtu v logaritmickém měřítku. Všechna měření byla uskutečněna v bezodrazové komoře ústavu telekomunikací FEKT VUT v Brně.

6.1 Měření amplitudové kmitočtové charakteristiky reposoustavy

Měření probíhalo při umístění reposoustavy a měřícího mikrofону v bezodrazové komoře ve vzájemné vzdálenosti 1 m. Mikrofon byl výškově osazen mezi výškový a basový reproduktor. Buzení probíhalo harmonickým signálem.

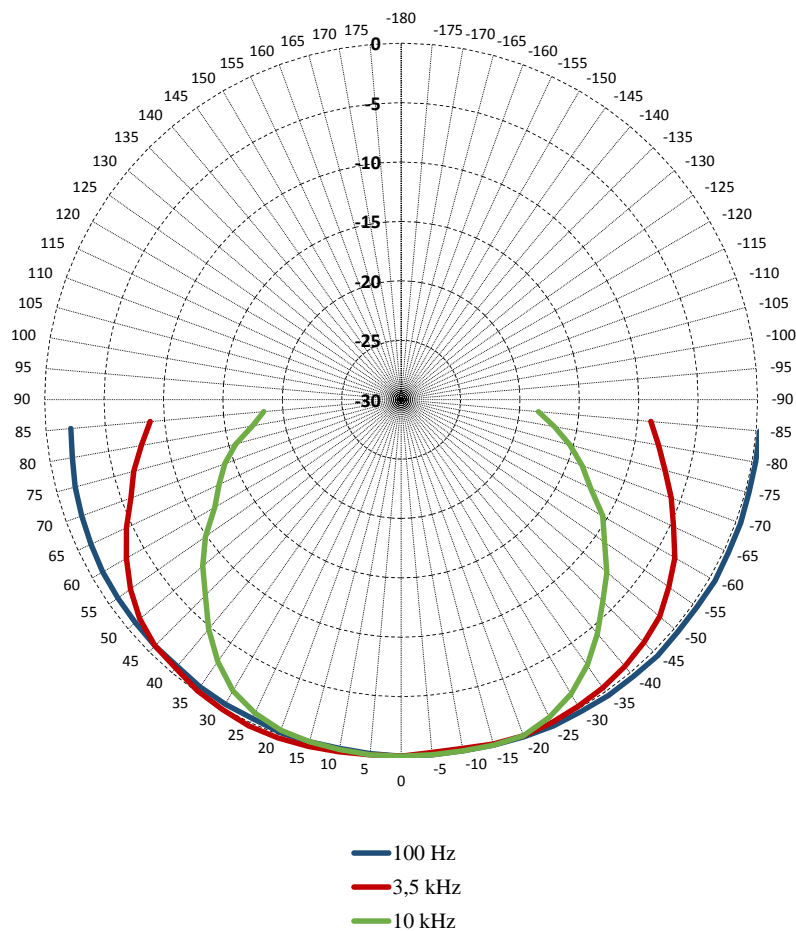


Obr. 6.1: Amplitudová frekvenční charakteristika reposoustavy.

Na charakteristice je patrná špička na kmitočtu 15 kHz, která může být zapříčiněna nedokonalým utižením vrutů, kterými jsou reproduktory uchyceny.

6.2 Měření směrové charakteristiky reprosoustavy

Směrová charakteristika byla měřena pro kmitočty 100 Hz, 3,5 kHz a 10 kHz v úhlovém rozmezí $\langle -85^\circ, +85^\circ \rangle$ v krocích po 5° .



Obr. 6.2: Směrové charakteristiky reprosoustavy.

Z charakteristiky vyplývá, že pro zajištění kvalitního poslechu musí být posluchač v ose reprosoustavy. Díky zaobleným rohům přední desky ozvučnice jsou potlačeny postranní laloky.

7 ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byla navržena pasivní dvoupásmová stereofonní reproduktorová soustava s využitím simulačních programů LspCAD a PSpice. Pro soustavu byl použit středobasový reproduktor Beyma 5MP60/N a výškový kalotový reproduktor Beyma T-2030. Byla navržena bassreflexová ozvučnice o objemu 5 litrů, z desek M.D.F tloušťky 18 mm, s tlumením polyuretanovým rounem tloušťky 15 mm. Parametry pro návrh a výpočet byly získány z katalogových listů reproduktorů. Výsledné hodnoty součástek byly upraveny v simulačním programu LspCAD pro získání optimální frekvenční a fázové charakteristiky s ohledem na dostupnost jednotlivých součástek. Reprosoustava má výkon 50 W RMS, nominální impedance je 8Ω , citlivost 90 dB. Reproduktorová soustava je sestavena podle návrhu a kompletních konstrukčních podkladů pro realizaci (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, konstrukční výkresy). Po sestavení byly experimentálním měřením ověřeny a vyhodnoceny technické parametry a směrové charakteristiky reprosoustavy, ze kterých vyplývá, že reprosoustava hraje vyrovnaně na kmitočtech od 100 Hz až do 20 kHz, s mírným zvlněním okolo dělicího kmitočtu 3,5 kHz, které je způsobeno výhybkou.

LITERATURA

- [1] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN: 80-86056-26-0.
- [2] TOMAN, Karel. *Reproduktory a reprosoustavy*. Karviná: Dexon, 2001.
- [3] DEXON CZECH s.r.o. [online]. ©2009 [cit. 2012-10-25]. Dostupné z: <<http://www.dexon.cz/>>.
- [4] Repromania.net [online]. ©2005-2011 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: <<http://www.repromania.net/>>.
- [5] SPEAKERS.czweb.org [online]. ©2005 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <<http://www.speakers.czweb.org/>>.
- [6] METZLER, Bob. *Audio Measurement Handbook*. Beaverton: Audio Presision, Inc., 1993.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

SPL hladina akustického tlaku – Sound Pressure Level

RMS efektivní hodnota – Root Mean Square

EBP činitel – Efficiency Bandwidth Product

M.D.F. středně zhuštěná dřevotřísková deska – Medium density fibre board

D.T.D. dřevotřísková deska

L.T.D. laminovaná dřevotřísková deska

SEZNAM PŘÍLOH

A	Katalogový list - výškový reproduktor BEYMA T2030	40
B	Katalogový list - středobasový reproduktor BEYMA 5MP60N	41
C	Tabulka naměřených hodnot amplitudové frekvenční charakteristiky reprosoustavy	42
D	Tabulka naměřených hodnot směrových charakteristik reprosoustavy	43

A KATALOGOVÝ LIST - VÝŠKOVÝ REPRODUKTOR BEYMA T2030



-Studio-

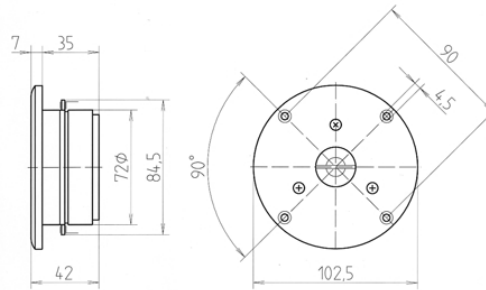


This metal dome tweeter is designed for high frequency reproduction in two or three way studio or domestic systems. It features an aluminium diaphragm, an especially designed cast aluminium front plate, to achieve flat frequency response, high efficiency, and wide and controlled dispersion pattern.

Tweeter con cúpula metálica que permite una reproducción del extremo agudo con una gran precisión y fineza. Tanto su sensibilidad como su respuesta transitoria son inmejorables, y permiten una gran polivalencia con sistemas miniatura hasta modelos semi-profesionales.

SPECIFICATIONS

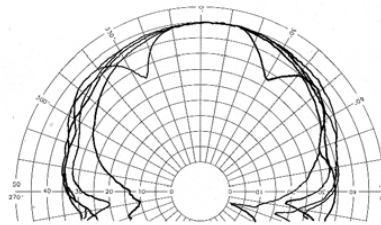
Nominal diameter	32mm. 1.25 in.
Nominal impedance	8 ohms.
Minimum impedance	6.2 ohms @ 2.5 kHz
D.C. Resistance	5 ohms
Power capacity*	15 w RMS
Program Power	30 Watts.
Efficiency**	95 dB 1w @ 1m.
Frequency range	1.5/20 kHz
Recommended crossover (minimum)	2 kHz or higher, 12 dB/oct.
Dispersion	60°
Voice coil diameter	25.4 mm. 1 in.
Magnetic assembly weight	0.525 kg. 1.16 lb.
Flux density	1.44 T
BL Factor	3 N/A



MOUNTING INFORMATION

Overall diameter	102 mm. 3.9 in.
Bolt circle diameter	90 mm. 3.54 in.
Baffle cutout dimensions:	75 mm. 2.95 in.
Front mount	42 mm. 1.65 in.
Depth	0.66 kg. 1.45 lb.
Net weight	0.7 kg. 1.54 lb.
Shipping weight	

POLAR PATTERN



MATERIALS

Diaphragm	Aluminium
Voice coil	Aluminium
Former	Kapton
Front cover	Aluminium
Magnet	Ferrite

THIELE-SMALL PARAMETERS**

Resonant Frequency, fs	1050 Hz
Mechanical Quality Factor, Qms	3.957
Electrical Quality Factor, Qes	1.567
Total Quality Factor, Qts	1.122

NOTES

*The power capacity corresponds to the RMS maximum value that can dissipate the loudspeaker when a sinus signal is applied for a period of at least two hours.

Program power is defined as the transducer's ability to handle normal music program material.

**Sensitivity was measured at 1m distance, on axis, with 1w input, averaged in the range 2-15 kHz.

***The polar plots are reproduction of measurements done with single sinusoidal signal tones, at the indicated frequencies. Rotation was about the centre of the emitter source, and the microphone is placed at 2m. on the axis.

NOTAS

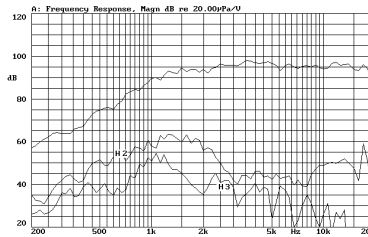
*La potencia admisible corresponde a la máxima potencia RMS que puede disipar el altavoz durante al menos dos horas, cuando se le aplica una señal determinada. Por potencia programa se entiende la capacidad de altavoz en el manejo de señales transitorias como sería el proporcionado por el contenido de un pasaje musical normal.

**Medición realizada con el micrófono a 1 m de distancia, en el eje, aplicando 1w al altavoz, promediando en el rango 2-15 kHz.

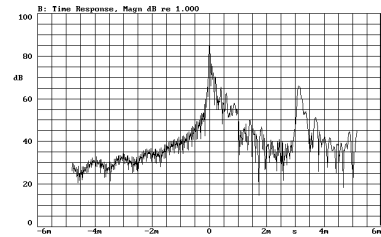
***Los parámetros 1-5 han sido medidos después de un período de fatiga y estabilización de las suspensiones, mediante transductor laser de velocidad-corriente, y son el reflejo de los parámetros a largo plazo del altavoz, una vez éste haya sido instalado y haya trabajado en un corto espacio de tiempo.

****Los gráficos polares fueron medidos con el tweeter situado sobre una mesa giratoria, sin pantalla, con el foco emisor sobre el eje de giro y situando el micrófono de medida a 2m. de distancia de dicho eje. Las señales usadas son tonos puros de las frecuencias representadas.

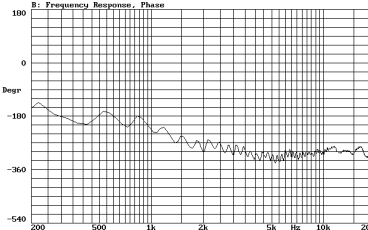
FREQUENCY RESPONSE & DISTORTION CURVES, MAGN. On axis, 1w @ 1m.



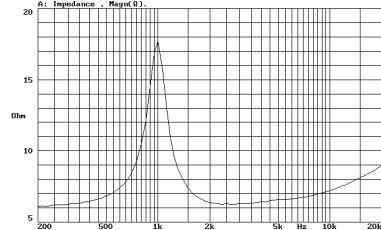
TIME RESPONSE, MAGN.



FREQUENCY RESPONSE, PHASE. On axis, 1w @ 1m.



FREE AIR IMPEDANCE CURVE



C TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT AM- PLITUDOVÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERIS- TIKY REPROSOUSTAVY

f [Hz]	L [dB _{SPL}]	f [Hz]	L [dB _{SPL}]	f [Hz]	L [dB _{SPL}]
20,0	48,9	211,9	78,7	2 240,0	77,2
21,2	51,3	224,0	79,2	2 373,2	76,3
22,4	53,1	237,3	78,0	2 500,0	76,0
23,7	51,9	250,0	77,2	2 648,7	76,4
25,0	51,9	264,9	77,2	2 800,0	75,6
26,5	53,9	280,0	77,7	2 966,5	73,8
28,0	54,9	296,6	77,5	3 150,0	74,1
29,7	55,2	315,0	78,2	3 337,3	74,7
31,5	56,4	333,7	77,7	3 550,0	76,2
33,4	57,6	355,0	78,3	3 761,1	76,4
35,5	58,2	376,1	78,5	4 000,0	77,4
37,6	60,3	400,0	78,8	4 237,9	76,9
40,0	62,5	423,8	80,2	4 500,0	78,8
42,4	56,9	450,0	79,7	4 767,6	81,6
45,0	49,1	476,8	79,1	5 000,0	81,0
47,7	53,6	500,0	79,3	5 297,3	74,6
50,0	62,1	529,7	79,8	5 600,0	75,5
53,0	65,6	560,0	80,0	5 933,0	76,8
56,0	66,4	593,3	80,3	6 300,0	78,5
59,3	66,5	630,0	81,1	6 674,6	79,8
63,0	66,7	667,5	81,1	7 100,0	79,7
66,7	66,2	710,0	80,5	7 522,2	78,6
71,0	66,2	752,2	79,4	8 000,0	77,0
75,2	67,4	800,0	77,5	8 475,7	78,1
80,0	69,0	847,6	77,6	9 000,0	79,0
84,8	70,9	900,0	79,2	9 535,2	77,1
90,0	72,3	953,5	80,1	10 000,0	78,0
95,4	71,9	1 000,0	80,0	10 594,6	77,6
100,0	70,3	1 059,5	79,4	11 200,0	77,4
105,9	69,2	1 120,0	79,7	11 866,0	77,6
112,0	72,0	1 186,6	80,6	12 500,0	76,1
118,7	77,1	1 250,0	79,5	13 243,3	77,0
125,0	79,2	1 324,3	77,0	14 000,0	82,2
132,4	80,4	1 400,0	76,5	14 832,5	87,2
140,0	77,3	1 483,2	78,3	16 000,0	86,9
148,3	72,7	1 600,0	78,6	16 951,4	82,5
160,0	75,8	1 695,1	76,9	18 000,0	74,8
169,5	80,1	1 800,0	77,2	19 070,3	73,4
180,0	81,3	1 907,0	78,2	20 000,0	79,4
190,7	80,9	2 000,0	78,8		
200,0	80,5	2 118,9	78,4		

D TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK REPROSOUSTAVY

úhel od akustické osy [°]	L [dB _{SPL}]			L_{REL} [dB]		
	100 [Hz]	3,5 [kHz]	10 [kHz]	100 [Hz]	3,5 [kHz]	10 [kHz]
-85	70,8	66,6	59,5	0,3	-8,9	-18,4
-80	70,8	67,5	61,0	0,3	-8,0	-16,9
-75	70,8	68,5	62,6	0,3	-7,0	-15,3
-70	70,9	69,7	64,1	0,4	-5,8	-13,8
-65	70,9	70,8	65,5	0,4	-4,7	-12,4
-60	71,0	72,1	67,5	0,5	-3,4	-10,4
-55	70,9	73,0	68,8	0,4	-2,5	-9,1
-50	70,9	73,9	70,5	0,4	-1,6	-7,4
-45	71,0	74,4	71,9	0,5	-1,1	-6,0
-40	70,9	74,8	73,6	0,4	-0,7	-4,3
-35	70,9	75,1	75,2	0,4	-0,4	-2,7
-30	70,8	75,3	76,5	0,3	-0,2	-1,4
-25	70,8	75,5	77,4	0,3	0,0	-0,5
-20	70,7	75,6	78,0	0,2	0,1	0,1
-15	70,6	75,5	78,0	0,1	0,0	0,1
-10	70,5	75,3	77,9	0,0	-0,2	0,0
-5	70,5	75,3	77,9	0,0	-0,2	0,0
0	70,5	75,5	77,9	0,0	0,0	0,0
5	70,4	75,5	77,9	-0,1	0,0	0,0
10	70,3	75,6	77,8	-0,2	0,1	-0,1
15	70,3	75,7	77,7	-0,2	0,2	-0,2
20	70,3	75,8	77,5	-0,2	0,3	-0,4
25	70,1	75,8	77,0	-0,4	0,3	-0,9
30	70,1	75,6	76,2	-0,4	0,1	-1,7
35	70,0	75,4	74,8	-0,5	-0,1	-3,1
40	69,8	75,0	73,1	-0,7	-0,5	-4,8
45	69,8	74,8	71,2	-0,7	-0,7	-6,7
50	69,7	74,2	69,7	-0,8	-1,3	-8,2
55	69,6	73,3	68,0	-0,9	-2,2	-9,9
60	69,5	72,2	66,0	-1,0	-3,3	-11,9
65	69,3	71,0	64,8	-1,2	-4,5	-13,1
70	69,1	69,7	63,7	-1,4	-5,8	-14,2
75	68,9	68,8	62,3	-1,6	-6,7	-15,6
80	68,6	67,7	60,6	-1,9	-7,8	-17,3
85	68,4	66,7	59,5	-2,1	-8,8	-18,4