

## Obsah

Obsah.....	1
Seznam obrázků .....	3
Seznam tabulek .....	5
Seznam příloh.....	6
Seznam zkratk .....	7
Seznam symbolů .....	8
ÚVOD .....	9
1 Elektroakustické měniče .....	10
2 Rozdělení elektroakustických měničů podle frekvenčního rozsahu .....	10
2.1 Hlubokotónové měniče .....	10
2.2 Středotónové měniče .....	11
2.3 Vysokotónové měniče .....	11
2.4 Širokopásmové měniče .....	11
3 Rozdělení podle principu činnosti a konstrukčního uspořádání měniče .....	12
3.1 Elektrodynamický systém s uzavřeným košem .....	13
3.2 Elektrodynamický systém s kalotovou membránou.....	13
3.3 Elektrodynamický systém s magnetickým stíněním .....	13
3.4 Elektromagnetický systém .....	13
3.5 Elektrostatický systém.....	14
3.6 Piezoelektrický systém.....	14
4 Elektrodynamický systém s kuželovou membránou.....	14
4.1 Membrána.....	15
4.1.1 Materiály používané pro membrány basových měničů.....	16
4.1.2 Materiály používané pro membrány středotónových měničů .....	18
4.1.3 Materiály používané pro membrány vysokotónových měničů .....	19
4.1.4 Vyspělé materiály používané pro výrobu membrán .....	19
4.1.5 <i>Specific modulus</i> – parametr pro hodnocení materiálů membrán .....	20
4.2 Horní závěs membrány.....	21
4.3 Spodní závěs membrány – středící membrána .....	21
4.4 Těsnění .....	21
4.5 Koš .....	21
4.6 Přívody a připojovací terminál .....	22
4.7 Prachovka .....	22
4.8 Magnetický obvod.....	22
4.9 Kmitací cívka .....	22
4.10 Kostra kmitací cívky .....	22
5 Materiály používané pro výrobu ozvučnic.....	23
5.1 Laťovka .....	23
5.2 Překližka.....	24
5.3 M.D.F. ....	24
5.4 Beton .....	25
5.5 Kámen .....	25
5.6 Plasty .....	27
5.7 Hliník (Aluminium).....	28
5.8 Další používané materiály, porovnání.....	29
6 Ozvučnice.....	30
6.1 Uzavřená ozvučnice .....	30
6.2 Ozvučnice typu Bassreflex.....	30

7	Volba basového měniče .....	34
7.1	Simulace impedanční charakteristiky měniče .....	36
8	Volba výškového měniče .....	38
9	Návrh parametrů ozvučnice a bassreflexového nátrubku.....	39
10	Simulace průběhu SPL frekvenční charakteristiky měniče v bassreflexové ozvučnici.....	41
10.1	Výpočet prvků akustického náhradního obvodu nezávislých na $Q_L$ .....	42
10.2	Výpočet prvků akustického náhradního obvodu závislých na $Q_L$ .....	45
10.3	Simulace průběhu SPL frekvenční charakteristiky měniče v bassreflexové..... ozvučnici s $Q_L = 7$ .....	48
10.4	Simulace průběhu SPL frekvenční charakteristiky měniče v bassreflexové..... ozvučnici s $Q_L = 15$ .....	50
11	Návrh mechanického řešení ozvučnice .....	52
11.1	Půdorys dutiny ozvučnice .....	53
11.2	Objemový tvar ozvučnice.....	54
12	Model ozvučnice .....	60
12.1	Vytvoření 3D modelu ozvučnice.....	60
12.2	Znamé nedostatky návrhu .....	65
13	Realizace ozvučnice .....	66
13.1	Materiál .....	66
13.2	Formy .....	67
13.3	Problémy při realizaci ozvučnice .....	69
14	Výhybky .....	69
14.1	Butterworth třetího řádu .....	71
14.2	Kompenzace indukčnosti kmitací cívky basového měniče.....	71
14.3	Snížení citlivosti výškového měniče .....	73
14.4	Návrh výhybek .....	74
14.5	Součástky .....	77
	Závěr.....	78
	Použitá literatura a další zdroje .....	79
	Přílohy .....	82

## Seznam obrázků

Obr. 1	Koaxiální měnič Seas T18RE/XFCTV2 .....	12
Obr. 2	Řez elektrodynamickým systémem .....	15
Obr. 3	Středotónový koaxiální měnič THIEL Audio .....	16
Obr. 4	<i>SPL</i> char. HDS PPB Woofers 830868 .....	17
Obr. 5	<i>SPL</i> char. Woofers PL22WR09-08 .....	18
Obr. 6	Porovnání hodnot specific modulus materiálů používaných pro výrobu membrán .....	20
Obr. 7	Lepení ozvučnice reproduktoru B&W .....	24
Obr. 8	Výztuha ozvučnice reproduktoru B&W .....	24
Obr. 9	Reproduktor s betonovou ozvučnicí společnosti ArmageTone .....	26
Obr. 10	Reproduktor společnosti Flinkstone .....	26
Obr. 11	Detail materiálu Q-stone používaného společností Green Mountain Audio .....	26
Obr. 12	Řez ozvučnicí středopásmového reproduktoru společnosti B&W .....	28
Obr. 13	Reproduktor Celestion .....	28
Obr. 14	Reproduktor B&O .....	28
Obr. 15	Reproduktor Marten .....	28
Obr. 16	Porovnání hustot materiálů používaných pro výrobu ozvučnic .....	29
Obr. 17	Měnič HDS Nomex 6½ .....	35
Obr. 18	Frekvenční <i>SPL</i> a impedanční charakteristika měniče HDS Nomex 6½ .....	35
Obr. 19	a) Náhradní impedanční obvod měniče; b) korigovaný obvod měniče .....	37
Obr. 20	Simulované průběhy impedancí náhradního a korigovaného obvodu měniče .....	37
Obr. 21	Peerless HDS Tweeter .....	38
Obr. 22	Frekvenční <i>SPL</i> a impedanční charakteristika Peerless HDS Tweeter .....	38
Obr. 23	Řez ozvučnicí, boční pohled.....	43
Obr. 24	Zapojení náhradního akustického obvodu měniče v bassreflexové ozvučnici s $Q_L = 7$ .....	48
Obr. 25	Průběh simulované <i>SPL</i> charakteristiky a impedance měniče v bassreflexové ozvučnici s $Q_L = 7$ .....	49
Obr. 26	Zapojení náhradního akustického obvodu měniče v bassreflexové ozvučnici s $Q_L = 15$ .....	50
Obr. 27	Průběh simulované <i>SPL</i> charakteristiky a impedance měniče v bassreflexové ozvučnici s $Q_L = 15$ .....	51
Obr. 28	Základní tvar půdorysu ozvučnice .....	53
Obr. 29	Odrazy zvukových vln od zakřivených stěn ozvučnice .....	54
Obr. 30	Osy podstavy ozvučnice .....	55
Obr. 31	Bokorys měniče HDS Nomex 6½ .....	55
Obr. 32	a) Plocha klínu vloženého mezi odkloněné části; b) Plocha přičítaného klínu .....	58
Obr. 33	a) Kvádr uvažovaného objemu; b) Klín uvažovaného objemu .....	59
Obr. 34	a) Boční pohled tělesa dutiny ozvučnice b) Horní a dolní pohled tělesa dutiny ozvučnice .....	60
Obr. 35	a) Skořepina ozvučnice; b) Otvory v ozvučnici; c) Osazení pro měniče .....	61
Obr. 36	a) Rámeček osazení měničů b) Otvor bassreflexu a osazení bassreflexového nátrubku c) Detail osazení bassreflexového nátrubku .....	62
Obr. 37	a) Stanovení bodu vzniku zvukové vlny měniče HDS 1“ Tweeter b) Stanovení bodu vzniku zvukové vlny měniče HDS Nomex Midwoofer .....	63
Obr. 38	Vertikální vzdálenost měničů a úhel pro odklonění přední stěny .....	63

Obr. 39	a) Přední pohled vizualizace osazené reprosoustavy	
	b) Přední – boční pohled vizualizace osazené reprosoustavy	
	c) Boční pohled vizualizace osazené reprosoustavy .....	64
Obr. 40	a) Přední boční pohled realizované ozvučnice	
	b) Boční pohled realizované ozvučnice .....	66
Obr. 41	a) Boční pohled modelu dutiny ozvučnice	
	b) Boční pohled modelu dutiny ozvučnice v řezu	
	c) Přední pohled modelu dutiny ozvučnice	
	d) Skutečný model dutiny .....	67
Obr. 42	a) Boční pohled modelu vnějšího tvaru ozvučnice	
	b) Boční pohled modelu vnějšího tvaru ozvučnice v řezu	
	c) Přední pohled modelu vnějšího tvaru ozvučnice	
	d) Spodní pohled modelu vnějšího tvaru ozvučnice .....	68
Obr. 43	a) Model dutiny a formy vnějšího tvaru	
	b) Forma vnějšího tvaru .....	68
Obr. 44	Náhradní impedanční obvod měniče s kompenzací indukčnosti .....	72
Obr. 45	Simulovaný průběh impedance měniče s kompenzací indukčnosti .....	73
Obr. 46	Zapojení výhybek s vypočtenými hodnotami součástek .....	75
Obr. 47	Simulované přenosové charakteristiky filtrů s ideálními hodnotami prvků .....	75
Obr. 48	Zapojení výhybek se součástkami z E12 .....	76
Obr. 49	Simulované přenosové charakteristiky filtrů s hodnotami součástek z E12 .....	76

## Seznam tabulek

Tab. 1	Parametry materiálů používaných pro výrobu membrán .....	19
Tab. 2	Hustoty kamenných materiálů .....	25
Tab. 3	Hustoty kovových materiálů .....	28
Tab. 4	Porovnání hustot materiálů používaných pro výrobu ozvučnic .....	28
Tab. 5	Porovnání hodnot modulů pružnosti v tahu .....	29

## **Seznam příloh**

Příloha 1	Basové měniče
Příloha 2	Výškové měniče

## Seznam zkratek

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
B&O	Bang & Olufsen
B&W	Bowers & Wilkins
B4	Butterworth 4. řádu
BE4	Bessel 4. řádu
CFAID	Carbon Fiber Poly with Aluminium Ion Deposit
CVD	Chemical Vapour Deposition
DP	Dolní propust
E12	Normalizovaná řada hodnot elektrických součástek
EBP	Efficiency Bandwidth Product
HDS	High Definition Sound
HP	Horní propust
IB4	Butterworth Inter – Order
MDF	Medium Density Fiber Board
PP	Pásmová propust
PPB	Polypropylene Black
QB3	Quasy Butterworth 3. řádu
SBB4	Super Boom Box 4. řádu
SBR	Styrene – Butadiene Rubber
SC4	Sub – Chebyshev 4. řádu
<i>SPL</i>	Sound Pressure Level
TS	Thiele – Small

## Seznam symbolů

$a, b$	poloměr [m]
$A$	útlum [dB]
$B$	hustota magnetického toku [T]
$c$	rychlost zvuku ve vzduchu 344 m/s
$C$	elektrická kapacita [F]
$C_a$	akustická poddajnost [m <sup>5</sup> /N]
$C_m$	mechanická poddajnost [m/N]
$d, D$	průměr [m]
$E$	modul pružnosti v tahu [Pa]
$f$	kmitočet [Hz]
$K$	přenos [dB]
$l$	délka [m]
$L$	elektrická indukčnost [H]
$M_a$	akustická hmotnost [kg/m <sup>4</sup> ]
$M_m$	mechanická hmotnost [kg]
$p$	akustický tlak [Pa]
$p_0$	referenční akustický tlak $2 \times 10^{-5}$ Pa
$Q$	činitel jakosti
$Q_e$	elektrický činitel jakosti
$Q_L$	činitel ztrát ozvučnice netěsností, Vented-box enclosure quality factor
$Q_m$	mechanický činitel jakosti
$Q_t$	celkový činitel jakosti
$r$	vzdálenost [m]
$R$	elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$R_a$	akustický odpor [N·s/m <sup>5</sup> ]
$R_{al}$	akustický odpor netěsností [N·s/m <sup>5</sup> ]
$R_m$	mechanický odpor [N·s/m]
$S$	plocha [m <sup>2</sup> ]
$SPL$	Sound Pressure Level [dB]
$U$	objemová rychlost [m <sup>3</sup> /s]
$v$	výška [m]
$V$	objem [m <sup>3</sup> ]
$V_{as}$	ekvivalentní objem [m <sup>3</sup> ]
$V_b$	objem ozvučnice [m <sup>3</sup> ]
$x$	výchylka membrány [m]
$X_{max}$	maximální lineární výchylka kmitacího systému [m]
$Z$	impedance [ $\Omega$ ]
$\alpha$	poměr poddajností
$\delta$	úhel [°]
$\eta$	účinnost
$\lambda$	vlnová délka [m]
$\rho_0$	hustota vzduchu 1,18 kg/m
$\rho$	hustota [kg/m]
$\omega$	úhlový kmitočet [rad/s]



## ÚVOD

Zvuk je ve své fyzikální podstatě mechanické vlnění, spojené s kmitáním částic plynu, kapaliny nebo pevné látky. Formou slyšitelnou člověkem je zvuk šířící se vzduchem. Slyšitelnou oblast zvuků tvoří určitý rozsah kmitočtů a amplitud akustického tlaku. Za slyšitelné pásmo pokládáme obvykle rozsah 16 – 16000 Hz, někdy též 20 – 20000 Hz. Slyšitelný zvuk tedy zasahuje do tří kmitočtových dekád, vyjádříme-li toto pásmo v oktávách ( $16 = 2^4$  až  $16000 \approx 2^{14}$  Hz), jedná se o deset kmitočtových oktáv. Nejcitlivěji jsou vnímány kmitočty v rozsahu asi 2 až 4 kHz. Za prahovou hodnotu slyšitelného akustického tlaku je považována hodnota 20  $\mu\text{Pa}$ , nejvyšší hodnota vnímaného akustického tlaku je dána nejvyššími fyziologicky snesitelnými tlaky, které mají v okolí kmitočtu  $f = 1$  kHz hodnotu přibližně 60 Pa. Vyššími akustickými tlaky se již přibližujeme hodnotě prahu bolesti.

Za zdroje zvuku můžeme považovat například akustické hudební nástroje, zpěv nebo řeč, hluk strojů, ulice a podobně. Takovýto signál je pro následné zpracování elektronickým systémem nutné nejprve převést ze signálu akustického na elektrický. Jiným typem zdroje zvuku jsou například elektronické hudební nástroje, syntezátory, záznamová média a podobně, které produkují přímo elektrický signál. Po zpracování elektronickým systémem je třeba elektrický signál podat příjemci ve své původní formě, kterou je akustický signál. Zařízení sloužící k vzájemné přeměně akustického a elektrického signálu nazýváme elektroakustický měnič. Elektroakustické měniče se dělí na měniče převádějící signál akustický na elektrický (mikrofony) a na měniče převádějící signál elektrický na akustický (reproduktory). Existují i měniče umožňující převod oběma směry – reciproké měniče. V praxi se označení „elektroakustické měniče“ obvykle zjednodušuje na „měniče“ a specifikace, zda se jedná o měnič elektroakustický nebo akustickoelektrický, bývá uváděna pouze v případech, kdy to není zřejmé z kontextu.

Protože pro kvalitní reprodukci různých kmitočtových rozsahů jsou na elektroakustické měniče (reproduktory) kladeny značně rozdílné, někdy dokonce protichůdné nároky, optimalizují se kvalitní měniče vždy jen pro část slyšitelného pásma (s výjimkou měničů širokopásmových) a následně se sdružují do soustav více měničů, pokrývajících celé slyšitelné kmitočtové pásmo – reprosoustav.

Reprosoustava se obvykle skládá z ozvučnice, několika měničů, elektronických filtrů (výhybek) a dalších konstrukčních částí jako jsou vodiče propojující výhybky a měniče, svorky pro připojení reprosoustavy ke zdroji elektrického signálu a podobně. Ozvučnice je vnější obal, ve kterém jsou mechanicky upevněny měniče tak, aby byla jejich nepohyblivá část (koš) v přesně definované poloze. Dalším – hlavním účelem ozvučnice je oddělení vnitřní akustické vlny, buzené vnitřní stranou měniče od vnější akustické vlny, buzené vnější stranou měniče. Vnitřní akustická vlna je pohlcována stěnami ozvučnice, obvykle navíc obloženými akusticky pohltivými materiály. Počet měničů soustavy závisí na požadované kvalitě reprodukce a zvoleném řešení. U kvalitních reprosoustav se obvykle volí 2 a více měničů. Podle počtu měničů, pokrývajících jednotlivá pásma kmitočtového rozsahu se reprosoustavy označují jako dvoupásmové, třípásmové a podobně. Měniče jsou podle kmitočtového pásma, pro které jsou určeny, označovány jako hlubokotónové (basové), středotónové (středové) a vysokotónové (výškové). Výhybky jsou elektronické filtry, zajišťující rozdělení elektrického signálu na kmitočtová pásma určená pro konkrétní měniče reprosoustavy. Pokud by do měničů přicházel celý frekvenční rozsah signálu, kmitočtová část signálu, pro kterou není měnič určen, by nebyla korektně reprodukována a mohla by měnič poškodit.

# 1 Elektroakustické měniče

Funkcí elektroakustického měniče je přeměna elektrické energie na energii akustickou. To znamená přeměna přicházejícího elektrického signálu, jehož parametry jsou frekvence, fáze a amplituda, reprezentujícího hudbu nebo řeč, obecně zvuk, na akustické chvění vzduchu, které má parametry co nejvíce podobné parametrům původního elektrického signálu.

Od měničů požadujeme především:

- frekvenčně nezávislou konstantní *SPL* charakteristiku alespoň ve slyšitelném frekvenčním pásmu (*SPL* – *sound pressure level* – hladina akustického tlaku)
- všesměrové vyzařování – chování bodového zářiče v celém frekvenčním pásmu
- frekvenčně nezávislou konstantní impedanční charakteristiku
- nulové zkreslení
- libovolnou výchylku membrány
- maximální účinnost a citlivost
- schopnost vyzářit signály v dynamickém rozsahu přibližně 80 dB.

Tyto požadavky však nelze bezesbýtku splnit, reálné měniče se jim vždy jen více či méně přibližují.

Měniče je účelné rozdělit do několika kategorií podle následujících kritérií:

- podle frekvenčního rozsahu, pro který je měnič určen, a ve kterém by se měly jeho parametry co nejvíce přibližovat výše definovaným požadovaným vlastnostem,
- podle principu činnosti a konstrukčního uspořádání měniče.

## 2 Rozdělení elektroakustických měničů podle frekvenčního rozsahu

### 2.1 Hlubokotónové měniče

Vlastnostmi těchto měničů, anglicky nazývaných *Woofers*, jsou především [1]:

#### **Průměr membrány měniče:**

- Větší průměr membrány poskytuje lepší reprodukci nízkých kmitočtů, ale větší směrovost.
- Větší měniče typicky vyžadují použití většího objemu ozvučnice.
- Menší měniče poskytují lepší přenos středních a vyšších kmitočtů, mívají lepší dynamické vlastnosti a menší směrovost.

**Důležitým faktorem je maximální akustický tlak měniče.**

**Průměr kmitací cívky:**

- Ovlivní její ohřátí a tím nárůst odporu cívky. To má za následek menší výsledný akustický tlak (jev zvaný termická komprese).

**Maximální lineární výchylka  $X_{max}$ :**

- Ovlivní dosažitelný akustický tlak při přijatelném zkreslení. Pro nižší kmitočty je pro dosažení stejného akustického tlaku potřebná větší lineární výchylka než pro vyšší kmitočty.

Parametry hlubokotónového měniče jsou určující pro konstrukci celé reprosoustavy. Pro návrh ozvučnice jsou výchozími parametry celkový činitel jakosti měniče  $Q_{ts}$ , rezonanční frekvence měniče ve volném prostoru  $f_s$  a ekvivalentní objem  $V_{as}$ .

## 2.2 Středotónové měniče

Anglicky *Mid-range* jsou určeny pro reprodukci kmitočtů přibližně mezi 500 a 4000 Hz. Ve třípásmových reprosoustavách má středotónový měnič zásadní vliv na kvalitu reprodukce, protože pokrývá frekvenční pásmo, na které je lidské vnímání nejcitlivější. Dalším důvodem je statistické frekvenční složení hudebních a řečových signálů, díky kterému je středotónový měnič nejnamáhanějším z celé soustavy. Bývají provedeny buď s uzavřeným nebo otevřeným košem, s kuželovou membránou nebo kalotou (membrána tvaru kulového vrchlíku). Kalotové typy lépe přenášejí vyšší frekvence, mají v této frekvenční oblasti nižší zkreslení a vyrovnanější charakteristiku. Měniče s kuželovou membránou dokáží lépe přenášet nižší frekvence, ale na vyšších kmitočtech mají větší směrovost.

## 2.3 Vysokotónové měniče

Anglicky *Tweeter* mívají oproti ostatním měničům vyšší charakteristickou citlivost. Přivedení nižších kmitočtů, než pro které je měnič konstruován, hrozí jeho poškozením. Vlnové délky jsou již srovnatelné s rozměry membrány. Pro kvalitní audio aplikace se nejčastěji používají kalotové měniče.

## 2.4 Širokopásmové měniče

Anglicky nazývané *Full-Range*. Používají se především v méně náročných aplikacích, i když to není pravidlem. Mohou být provedeny bez přídavných částí, kdy se jedná v podstatě o klasickou konstrukci elektromagnetického systému, který je rozměrově a konstrukčně uzpůsoben pro přenos co nejširšího frekvenčního pásma nebo s přídavnými částmi. Přídavné části jsou především difuzory, které jsou připojeny ke stejné kmitací cívce a vytváří tak vlastně membránu vysokofrekvenční jednotky. Nebo mohou být provedeny jako koaxiální, případně triaxiální, kdy je v ose hlubokotónového měniče umístěna přídavná vysokotónová, případně středotónová jednotka.

Případem kvalitního koaxiálního měniče je Seas T18RE/XFCTV2, Obr. 1:



Obr. 1 Koaxiální měnič Seas T18RE/XFCTV2 [29]

### 3 Rozdělení podle principu činnosti a konstrukčního uspořádání měniče

Rozdělením podle principu činnosti se primárně rozumí rozdělení podle fyzikálního principu, který umožňuje přeměnu elektrické na mechanickou energii.

Rozdělením podle konstrukčního uspořádání se rozumí rozdělení podle principu a uspořádání, kterým je mechanická energie přeměněna na energii akustické vlny.

Obě tyto kategorie možného pohledu na elektroakustické měniče jsou hodnoceny společně v jedné kapitole proto, že je nelze úplně oddělit od sebe, protože každý princip vytvářející mechanickou energii vyžaduje specifický přístup v přeměně mechanické na akustickou energii. Přehled není vyčerpávající, je proveden s ohledem na cíl řešení práce.

#### Rozlišujeme měniče:

##### - Elektrodynamické:

- podle tvaru a provedení membrány
  - elektrodynamické s kuželovou membránou (kapitola 4)
  - elektrodynamické s kalotovou membránou
- podle dalších parametrů
  - elektrodynamické s uzavřeným košem
  - elektrodynamické s magnetickým stíněním
  - elektrodynamické s rozvinutelnou nebo nerozvinutelnou membránou

##### - Ostatní:

- Elektromagnetické
- Elektrostatické
- Piezoelektrické

### 3.1 Elektrodynamický systém s uzavřeným košem

Elektrodynamický systém obecně je nejpoužívanějším principem elektroakustických měničů.

Elektrodynamický systém s uzavřeným košem se používá často pro středotónové měniče. Membrána měniče je izolována od vnitřního prostoru ozvučnice a není ovlivňována zadní vlnou vyzářenou hlubokotónovým měničem. Měniče s otevřeným košem pokryjí i nižší frekvence, musíme pro ně ale vytvořit vlastní ozvučnici uvnitř velké ozvučnice hlubokotónového měniče. Takto můžeme dosáhnout pokrytí pásma od typicky přibližně 500 Hz oproti 800 Hz u měničů s uzavřeným košem.

### 3.2 Elektrodynamický systém s kalotovou membránou

Tuhost kaloty je důležitá pro přenos vyšších frekvencí, viz odstavec o diamantových kalotách (kapitola 4.1.4.). Pokud se kalota přestane pohybovat jako celek, okraje kaloty se budou pohybovat více než střed a směrová charakteristika bude více zvlněná. Pokud kalota kmitá jako celek, blíží se bodovému zářiči. Kalotové výškové měniče mají menší zkreslení než výškové měniče s kuželovou membránou. Používá se mnoho vzájemně nepatrně odlišných typů, v uvažovaném frekvenčním pásmu již ale jsou vyzařované vlnové délky srovnatelné s rozměry měniče, a tak i malá změna uspořádání a rozměrů může mít značný vliv na kvalitu reprodukce. Některé typy kalotových měničů jsou: s fázovou vsuvkou (s fázovým korektorem), dvoukomorové, se zkosenou přední deskou, s překrytým závěsem a další.

### 3.3 Elektrodynamický systém s magnetickým stíněním

Principem je umístění kompenzačních magnetů a stínícího krytu na zadní desku magnetu. Magnety jsou orientovány tak, aby se vzájemně odpuzovaly a rušily tak vnější magnetické pole. Zároveň zesilují magnetické pole ve štěrbině magnetu, čímž se zvyšuje účinnost měniče. Stínění je vyžadováno u reprosoustav, které mají být provozovány v blízkosti zobrazovačů s vakuovou obrazovkou a dalších přístrojů citlivých na magnetické pole.

### 3.4 Elektromagnetický systém

Někdy bývá zaměňován s elektrodynamickým systémem, například v [1]. Princip a provedení měničů jsou ale různé. Elektromagnetické měniče pracují na principu změny magnetického toku magneticky vodivými částmi, vyvolanými změnou elektrického proudu protékajícího budicí cívku [7]. Magnetický obvod se skládá z budicí cívky navinuté na pólovém nástavci, ke kterému je jednostranně připojena pružná magneticky vodivá kotva. Mezi kotvou a pólovým nástavcem na druhé straně je vzduchová mezera. Pólový nástavec je udržován ve své rovnovážné poloze pružným elastomerem. Při změně budicího proudu se

změní síla, kterou je přitahována kotva k pólovému nástavci a změní se tak i jejich vzdálenost. Jako membrána tedy u elektromagnetického systému pracuje kotva.

### 3.5 Elektrostatický systém

Síla uvádějící do pohybu tu část systému, která přenáší mechanické vibrace na okolní vzduch, je v případě elektrostatického systému síla generovaná mezi dvěma plošnými elektrodami o určité ploše a vzdálenosti [7], [31]. Měníče pracující na tomto principu mají menší zkreslení, plochou frekvenční *SPL* charakteristiku a překvapivě málo frekvenčně závislou impedanční charakteristiku kapacitního charakteru. Jsou použitelné spíše pro vyšší frekvenční pásma, protože pro dosažení vyšší citlivosti je potřebná vzdálenost mezi elektrodami malá a to je v rozporu s potřebnou velkou výchylkou pro nižší kmitočty. Plocha elektrod je požadována co největší.

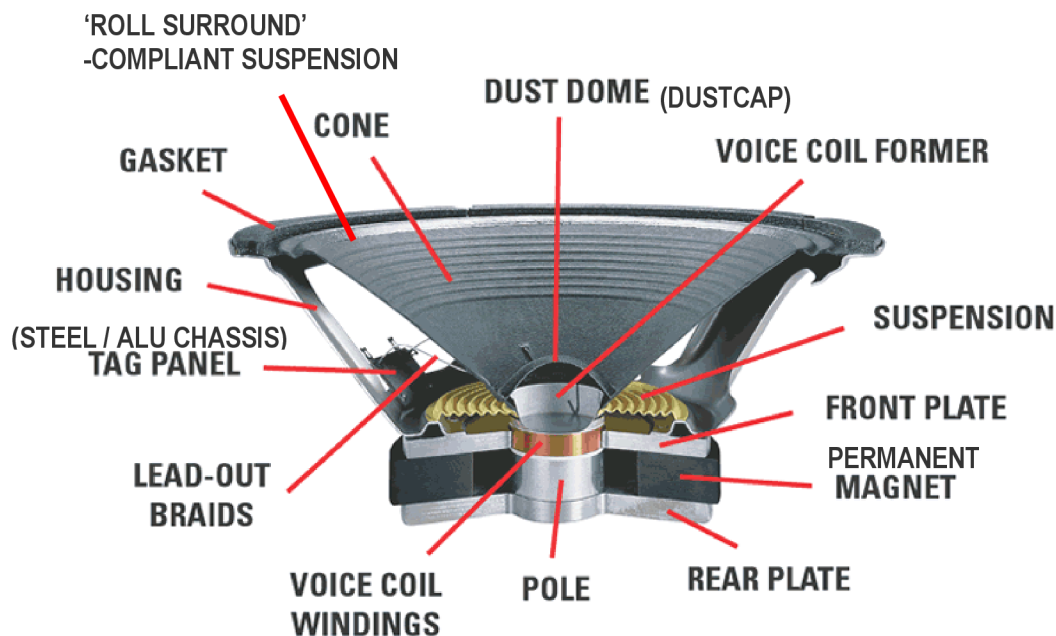
### 3.6 Piezoelektrický systém

Měníče pracují na principu [7] piezoelektrického jevu, tedy na rozměrových změnách krystalu piezokeramického materiálu v závislosti na změnách napětí přiváděného na jeho okraje. Na piezokeramické destičce je nanášena vrstvička kovu, jehož rozměry se změnou napětí nemění a obě vrstvy tedy oproti sobě pruží. K této části je pak připojena membrána, která je tímto pohybem poháněna. Piezoelektrické měniče jsou použitelné pro vyšší frekvence, mají velkou účinnost, ale zvlněnou frekvenční charakteristiku a nejsou proto z hlediska přenosu akustického signálu příliš kvalitní.

## 4 Elektrodynamický systém s kuželovou membránou

Většinou se používá membrána tvaru přibližně pláště komolého kužele, která je pružně zavěšena na koš měniče. Membrána je pevně spojena s kmitací cívkou, která je umístěna v silném magnetickém poli a do pohybu je uváděna silovým působením vybuzeným protékajícím proudem. Kmitací cívka společně s membránou jsou někdy označovány jako *motor structure*. Pohyb je omezen možným rozbalením pružného závěsu.

Řez elektrodynamickým systémem je na Obr. 2:



Obr. 2 Řez elektrodynamickým systémem [2]

**Části elektrodynamického systému:**

<i>gasket</i>	těsnění
<i>compliant suspension</i>	pružný závěs (horní závěs – <i>surround</i> , <i>upper suspension</i> )
<i>cone</i>	kužel (membrána)
<i>dust cup</i>	prachovka
<i>voice coil former</i>	kostra kmitací cívky
<i>suspension</i>	závěs (spodní závěs, středící membrána, někdy <i>spider</i> - pavouk)
<i>front plate</i>	přední deska
<i>permanent magnet</i>	permanentní magnet
<i>rear plate</i>	spodní deska
<i>pole</i>	pól (pólový nástavec – <i>pole piece</i> )
<i>voice coil windings</i>	vinutí kmitací cívky
<i>lead out braids</i>	pružné přívody
<i>tag panel</i>	terminál pro elektrické připojení
<i>housing</i>	koš měniče

**Funkce a vlastnosti jednotlivých částí:****4.1 Membrána**

je zřejmě nejdůležitější součástí mechaniky měniče. Ideální membrána by měla být nekonečně tuhá a měla by mít nulovou hmotnost.

Je součástí, která zprostředkovává vlastní přeměnu elektrické, respektive magnetické energie na energii akustickou a to svým pístovým pohybem, který periodicky zhušťuje a zředňuje vzduch.

Membrána bohužel vlivem své konečné tuhosti nekmitá jako netečný celek. V místě spojení membrány a kmitací cívky, tedy v místě, kde je membrána mechanicky buzena, dochází k její deformaci, která se šíří po membráně jako vlna. Šíření této vlny je závislé na vlastnostech membrány. Pokud je dostatečně tuhá, šíření rychle utlumí. Šířící se deformace se po čase ustálí a na membráně vznikne stojaté vlnění, které interferuje s pístovým pohybem. Deformační vlna se po membráně šíří tím rychleji, čím je membrána tužší a čím vyšší frekvencí je buzena. Tuhost membrány snižuje míru deformace.

Typické membrány mohou být tvaru kužele nebo kužele s prohnutým pláštěm, který může být prohnutý konvexně i konkávně. Někdy se tyto dva tvary označují jako rozvinutelný a nerozvinutelný kužel. U membrány tvaru nerozvinutelného kužele dochází k menším plastickým deformacím. Tvar membrány může být kuželový s kruhovou nebo eliptickou základnou s poměrem rozměrů 2:1. Druhý tvar je odolnější proti zkreslení vlivem subharmonických kmitočtů. V poslední době se lze setkat s membránami plochými nebo tvaru konkávního kulového vrchlíku.

Dalším způsobem omezení šíření deformací membrány je použití membrány s vlnkovaným (žebrovaným) profilem. Běžně se používají mělké kruhové vlnky soustředné kolem středu membrány tak, jak je zobrazeno na Obr. 2. Společnost THIEL Audio [35] používá pro své koaxiální středotónové měniče žebrování ve směru od středu membrány ke krajům, jak je zobrazeno na Obr. 3. Tento tvar zvyšuje pevnost aluminiové membrány od středu ke krajům, a tím omezuje vznik deformační vlny a zlepšuje tlumení jejího šíření.



Obr. 3 Středotónový koaxiální měnič THIEL Audio [35]

Pro výškové reproduktory se používají membrány tvaru konvexního kulového vrchlíku – kaloty.

Materiály používané pro výrobu membrán jsou hodnoceny z hlediska dostatečné tuhosti, která omezuje plastické deformace a nízké hmotnosti, která je potřebná pro dosažení dostatečné citlivosti měniče. Důležitý je útlum materiálu. Tuhost a tlumení může být zvýšeno impregnací, plněním nebo sandwichovou konstrukcí membrány.

#### 4.1.1 Materiály používané pro membrány basových měničů

Pro výrobu membrán basových měničů se používají především [1]:

##### **Papír**

Tento tradiční materiál byl a je stále používán. V porovnání s kovy (kromě berilia) má vzhledem k hmotnosti relativně vyšší tuhost. Proto byl po prvních 30 let jediným používaným



materiálem, a i dnes se s ním často setkáváme, a to i ve vysoce kvalitních měničích. Impregnované, případně sandwichové membrány mají v porovnání s jednoduchými membránami mnohem vyšší tuhost. Papírové membrány se vyrábějí nástřikem papírové suspenze na speciální síta. Papír se používá například v kombinaci s Kevlarem a vnějším hliníkovým nátěrem.

### Hliník (*Aluminium*)

Je vhodný pro svou stabilitu, homogenitu a vysokou reprodukovatelnost. Má nízké ztráty a vysokou pevnost. Výhodou je typicky nižší zvlnění *SPL* charakteristiky na kmitočtech pod *dome's break-up frequency*. Je to frekvence, za níž dochází vlivem zrychlení a síly kmitání k tvarovým deformacím membrány, a tedy k nežádoucímu zkreslení. Nevýhodou je nízké vlastní tlumení, které nepotlačuje rezonance membrány a znemožňuje tak použití hliníkových membrán na vyšších kmitočtech. Hliník se proto používá hlavně v kombinacích s dalšími materiály, například plasty a keramikou. Podobné vlastnosti mají další používané kovy.

### Uhlíkové vlákno (*Carbon fiber*)

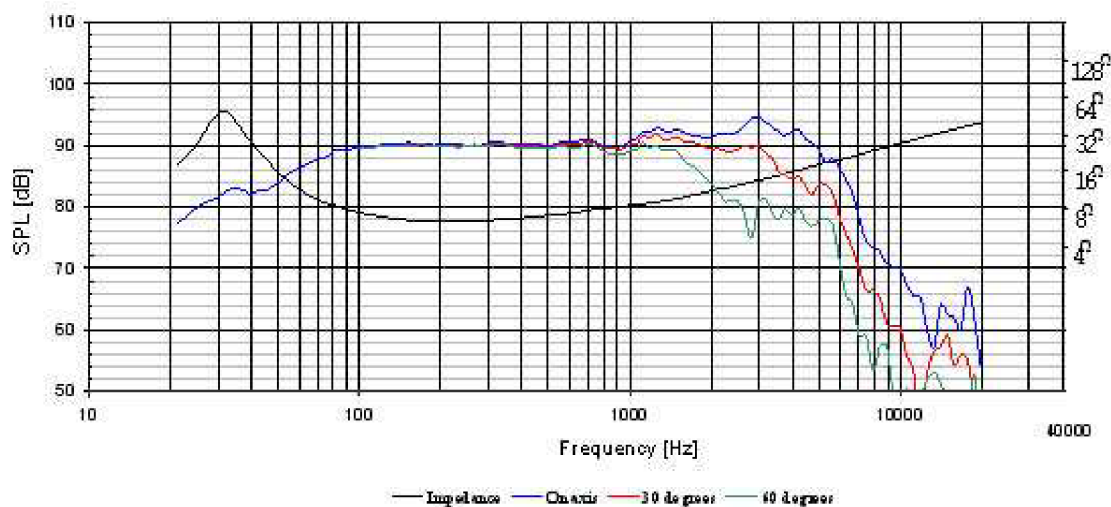
Membrány z tohoto materiálu se zhotovují vstřikovým litím a jsou velmi pevné, mají vysokou pevnost a tlumení.

### Hliník s keramickým povlakem

Vhodnou kombinací těchto dvou materiálů lze vytvořit velmi tuhou membránu, která pracuje bez plastických deformací i na vysokých kmitočtech.

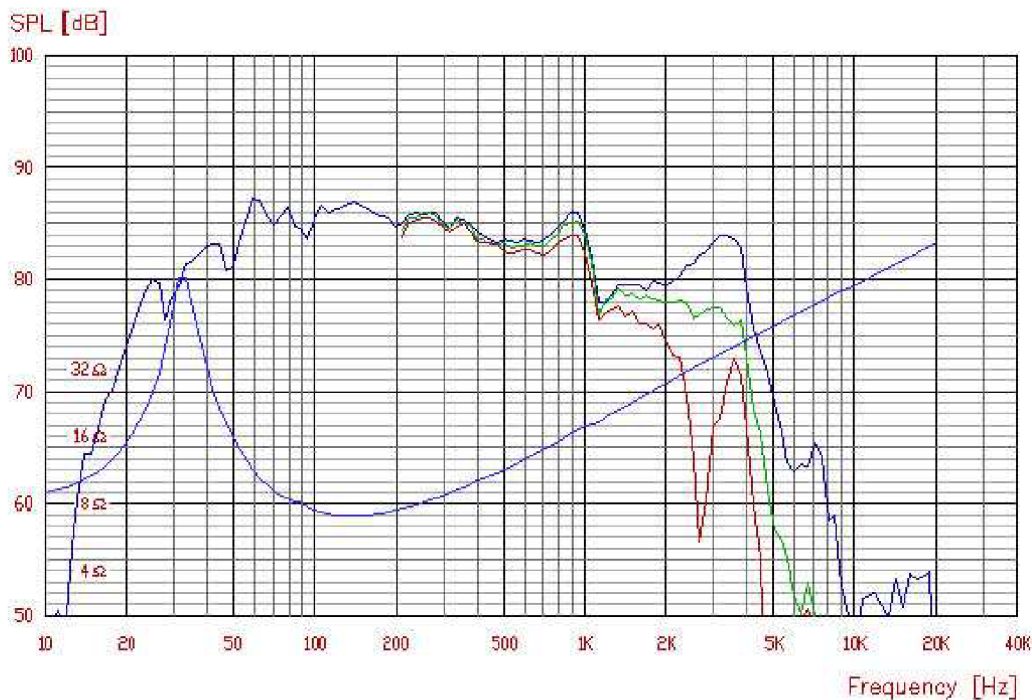
### Polypropylen

Jeho výhodou je levná výroba membrán, dostatečná tuhost a odolnost. Frekvenční charakteristika *SPL* je celkově vyrovnanější a s nižším nežádoucím převýšením na horním okraji přenášeného pásma. Tato vlastnost je pozorovatelná na zobrazených charakteristikách měničů Peerless, Obr. 4 a Obr. 5. Na Obr. 4 je průběh *SPL* charakteristiky měniče s polypropylenovou membránou:



Obr. 4 *SPL* char. HDS PPB Woofer830868 [3]

Na Obr. 5 je průběh *SPL* charakteristiky měniče s lakovanou papírovou membránou:



Obr. 5 *SPL* char. Woofwer PL22WR09-08 [3]

V obou příkladech se jedná o 8 palcové, 8  $\Omega$  měniče společnosti Peerless. Obr. 4 HDS PPB Woofer 830868 má membránu vyrobenou z polypropylenu, výrobcem nazývanou *PPB* (*Polypropylene Black*). Obr. 5 PL Woofwer PL22WR09-08 má membránu vyrobenou z lakovaného papíru (*Coated Paper*).

#### **Poly – uhlíková vlákna s hliníkovou injektáží (CFAID – Carbon fiber poly with aluminium ion deposit)**

Membrána vyrobená z uhlíkových vláken má nízkou hmotnost a je tlumena přidaným hliníkem.

### **4.1.2 Materiály používané pro membrány středotónových měničů**

Pro výrobu membrán středotónových měničů se používá podobných materiálů jako pro membrány basových měničů, například [1]:

#### **Papír**

Je použitelný pro velký frekvenční rozsah, má dobrou účinnost, impregnací lze dosáhnout dobré tuhosti.

#### **Titan (*Titanium*)**

Má vysokou pevnost vzhledem k hmotnosti a dobrou účinnost.

### **Textil**

Používají se různé textilní materiály, většinou impregnované, a to především pro kalotové membrány. Textil je použitelný pro velký frekvenční rozsah, má dobrou účinnost.

### **4.1.3 Materiály používané pro membrány vysokotónových měničů**

Pro výrobu membrán vysokotónových měničů se používají především: **papír, titan, textil, hliník, polyamidy, polymery, hliník s keramickým povlakem** a další.

### **4.1.4 Vypělé materiály používané pro výrobu membrán**

Příkladem vypělých materiálů mohou být materiály používané společností B&W [4]:

#### **Rohacell**

Jedná se o plastickou pěnu, používanou jako základ sandwichových konstrukcí v mnoha průmyslových odvětvích pro svou lehkost a vysokou mechanickou odolnost [5]. Společnost B&W pěnu používá jako jádro sandwiche membrán vyrobených z uhlíkových vláken. Výsledkem jsou velmi tuhé membrány s vysokým tlumením, používané pro hlubokotónové měniče.

#### **Kevlar**

Jedná se o nejznámější tkaninu z organických vláken Aramidu. Obchodní název Aramid vznikl spojením slov „aromatický polyamid“ [32]. Vlákná Aramidu mají vysokou pevnost a vysoký modul pružnosti v tahu. Dalšími vlastnostmi Kevlaru jsou [6] mimo jiné vysoká pevnost, rozměrová a strukturální stabilita při malé hmotnosti, schopnost účinně pohltit velké množství energie. Membrány impregnované speciálními pryskyřicemi jsou velmi odolné oproti plastickým deformacím a společnost B&W je používá pro středotónové měniče. Dalším materiálem vyrobeným z Aramidových vláken, používaným na výrobu membrán měničů, je Nomex [33], používaný společností Peerless / Tymphany [3].

#### **Diamant (Diamond)**

Požadavkem kladeným na membránu libovolného typu je nekonečná tuhost a formovatelnost do požadovaného tvaru s minimální tloušťkou membrány. Nekonečná tuhost je nedosažitelná, diamant má ale v porovnání s ostatními používanými materiály ke splnění tohoto požadavku nejbližší. Použití kalotové membrány je frekvenčně shora omezeno hodnotou *dome's break-up frequency*. Kaloty z běžných plastových nebo tkaninových materiálů mají hodnotu *dome's break-up frequency* v okolí 10 kHz. Kovové, někdy měděné, ale častěji hliníkové nebo titanové kaloty dosahují mezní frekvence přibližně 20 kHz, což je již vzhledem k slyšitelnému rozsahu sluchu mnohem lepší výsledek. Společnost B&W uvádí, že jejich *tweeter* s diamantovou kalotou má hodnotu *dome's break-up frequency* kolem 70 kHz. Ve složitých laboratorních podmínkách jsou z diamantu formovány krystaly tvaru kaloty. Používá se technologie zvaná CVD (*Chemical Vapour Deposition* – chemické usazování výparů), jejíž princip je podobný krystalizování vody na studeném skle. Při teplotách blízkých teplotě povrchu Slunce je krystalizací karbonu možno vyrobit čistý diamant složitých tvarů. Společnost B&W používá vysokotónových měničů s diamantovou kalotou v nejvyšších řadách svých reproduktorů.

#### 4.1.5 Specific modulus – parametr pro hodnocení materiálů membrán

Měřítkem při posuzování vhodnosti materiálu pro výrobu především vysokotónových kalot může být poměr  $E/\rho$  nazývaný *specific modulus*, od kterého se odvíjí hodnota *dome's break-up frequency*.

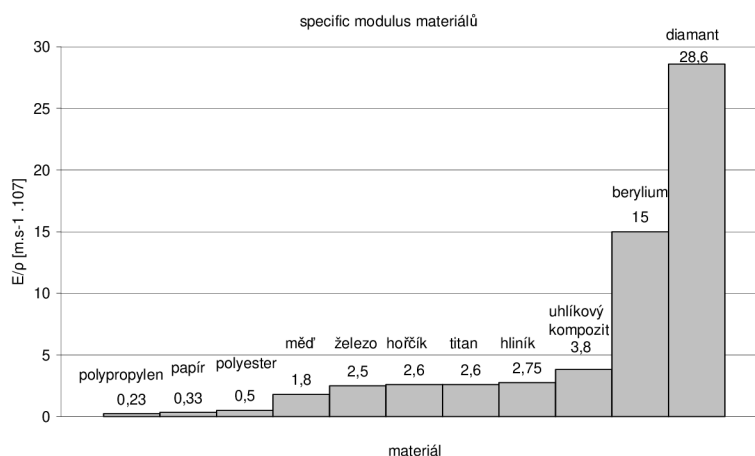
Modul pružnosti v tahu  $E$  požadujeme co nejvyšší a hustotu  $\rho$  co nejnižší.

Porovnání těchto parametrů [27] některých materiálů používaných pro výrobu membrán:

Tab. 1 Parametry materiálů používaných pro výrobu membrán

	hustota $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> .10 <sup>3</sup> ]	modul pružnosti $E$ [GPa]	<i>specific modulus</i> $E/\rho$ [m.s <sup>-1</sup> .10 <sup>7</sup> ]
hliník	2,7	75	2,75
beryllium	1,8	250	15
uhlíkový kompozit	0,26	10	3,8
měď	8,5	150	1,8
diamant	3,5	1000	28,6
železo	7,9	2000	2,5
hořčík	1,8	45	2,6
papír	0,15	0,5	0,33
polyester	1,4	7	0,5
polypropylen	1	2,3	0,23
titan	4,5	116	2,6

Grafické porovnání hodnot *specific modulus* materiálů používaných nebo použitelných pro výrobu membrán, Obr. 6:



Obr. 6 Porovnání hodnot *specific modulus* materiálů používaných pro výrobu membrán

Některé z těchto materiálů mohou být nebo jsou používané i pro výrobu ozvučnic. Výhodné mechanické vlastnosti berylia jsou tlačeny do pozadí jeho nákladným zpracováním a vysokou toxicitou.

## 4.2 Horní závěs membrány

Jeho funkcí je pružné upevnění horního okraje membrány ke koši měniče. Umožňuje kmitání membrány v ose a svou délkou při rozbalení vymezuje rozsah kmitavého pohybu. Závěs může být tzv. jednovlnkový, kde membrána je přilepena na vlnku z gumy, jejíž druhý konec je přilepen ke koši. Nebo vícevlnkový, kde je závěs tvořen několika menšími vlnkami. Výhodou tohoto závěsu oproti jednovlnkovému je omezení vlastních rezonancí závěsu, které mohou vzniknout a zkreslit vyzařovaný signál.

Horní závěs spolu se spodním závěsem a membránou určují [1] poddajnost, odpor a hmotnost kmitacího systému.

Požadavky kladené na oba závěsy jsou teplotní a časová stálost, optimální pružnost, vymezení rozsahu pohybu a jeho vystředění, zamezení dotyku kmitací cívky s pólovým nástavcem a horní deskou magnetu, optimální tlumení dynamického pohybu membrány.

## 4.3 Spodní závěs membrány – středící membrána

Udržuje kmitací cívku v ose vzduchové mezery magnetu a zabraňuje jejímu tření o magnetický obvod. Někteří výrobci (například Beyma) používají středící membrány i dvě.

## 4.4 Těsnění

Má za úkol hermeticky utěsnit otvor v ozvučnici, do kterého je měnič namontován. Těsnění je tvořeno obvykle měkkou pěnovou gumou a je umístěno na horní hraně koše. Má tedy význam pouze pokud je měnič připevněn pod stěnu ozvučnice – zevnitř. Pokud je měnič osazen z vnějšku, musí být těsnění pod spodní hranou koše. Hermetické utěsnění je velice důležité, netěsnosti produkují až překvapivě hlasité zkreslení.

## 4.5 Koš

Drží vše pohromadě a je tedy velmi důležité, aby nemohlo dojít k jeho deformaci. Ta by způsobila deformaci membrány, závěsů a mohla by tedy způsobit i dotyky kmitací cívky a magnetu. U levnějších měničů se používají plechové výlisky, u kvalitnějších měničů většinou odlitky z hliníkových slitin. Někdy bývá použit i plast. Tvar koše by měl co nejméně ovlivňovat proudění vzduchu hnaného membránou a měl by umožnit i pohyb vzduchu kolem spodního závěsu membrány, který pomáhá s chlazením kmitací cívky a magnetického obvodu.

## 4.6 Přívody a připojovací terminál

Přívody slouží k přivedení elektrického signálu do kmitací cívky. Přívody se pohybují spolu s cívkou, musí být tedy vyrobeny tak, aby neomezovaly pohyb cívky a mechanicky se neopotřebovávaly. Připojovací terminál musí být dostatečně teplotně odolný a dobře pájitelný.

## 4.7 Prachovka

Jejím hlavním úkolem je zamezit vstupu nečistot do prostoru magnetického obvodu a kmitací cívky. Požadujeme tuhost, neprostupnost prachu a prodyšnost. Může být provedena různě, může svým tvarem například zlepšovat vyzařování vyšších frekvencí, a nebo pokud je vyrobena například z mědi, může zlepšovat odvod tepla z kmitací cívky.

## 4.8 Magnetický obvod

Je velmi důležitou součástí měniče. Skládá se z horní desky, permanentního magnetu, zadní desky a magneticky měkkých pólových nástavců.

Pólové nástavce soustřeďují magnetickou energii do vzduchové mezery, ve které se pohybuje kmitací cívka. Pole v mezeře by mělo být co nejvíce homogenní. Magnet bývá vyroben z magneticky tvrdého feritu. V magnetu může být otvor, sloužící k lepšímu odvodu tepla a vyrovnávání tlaku vzduchu, který jinak klade odpor pohybu cívky.

Zejména ve velmi kvalitních měničích se používají neodymové (neodymium, železo a bór — Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B) permanentní magnety [36], které jsou oproti ostatním používaným magnetům silnější a lehčí. Jejich nevýhodou je, že mohou být zničeny teplotou nad 230° C. Z tohoto důvodu jsou v některých moderních reprosoustavách s vestavěnými zesilovači integrovány ochranné obvody pro kontrolu teploty a samočinné snížení přiváděného výkonu. Tyto ochranné systémy kontrolují i teplotu kmitací cívky a brání jejímu poškození.

## 4.9 Kmitací cívka

Rozkmitává membránu v rytmu elektrického signálu. Čím větší je součin  $Bl$  magnetické indukce a délky vodiče cívky, tím větší je charakteristická citlivost měniče. Čím je navinutý vodič delší, tím je také větší maximální výchylka, která souvisí s poklesem citlivosti na vyšších frekvencích oproti frekvencím nižším.

Kmitací cívka může být provedena mnoha způsoby. Může se lišit počet navinutých vrstev, použité jádro, profil vodiče, materiál vodiče, typ navinutí a podobně.

## 4.10 Kostra kmitací cívky

Má podstatný vliv na zatížitelnost měniče. Průchodem proudu se vodič ohřívá. Ohřevem může dojít k roztavení nebo spálení lepidla, kterým je vodič na jádro cívky přilepen. Musí mít dobrou tepelnou vodivost pro dobrý odvod tepla od vodiče a musí být lehká.

## 5 Materiály používané pro výrobu ozvučnic

Zásadním parametrem pro materiál ozvučnice je tuhost (*stiffness*), hustota (*density, mass*), vlastní útlum (*damping*) a odolnost proti vibracím (*vibration inertivity*).

Vliv působení mechanického namáhání na materiál lze popsat následujícími parametry:

### Modul pružnosti v tahu $E$ (*Youngův modul*)

(*modulus of elasticity*) udává sílu potřebnou k prodloužení tyče konstantního průřezu na dvojnásobnou délku. Závisí pouze na vlastnostech materiálu, nikoliv na jeho rozměrech. Je to jeden ze základních mechanických parametrů všech materiálů, který popisuje materiál v oblasti pružné deformace, jeho jednotkou je Pa. Při jeho stanovování měření se vzorky samozřejmě namáhají mnohem méně než by odpovídalo dvojnásobnému prodloužení, deformace musí zůstat pod hodnotou meze pružné deformace a modul pružnosti v tahu se dopočítává. Vztah mezi modulem pružnosti v tahu, relativní deformací a působícím mechanickým napětím je dán Hookovým zákonem [21].

Obdobně jako u materiálů používaných pro výrobu membrán i materiály pro výrobu ozvučnic je účelné hodnotit pomocí hodnot *specific modulus*. Stěny ozvučnic vyrobené z materiálů s vyšší hodnotou *specific modulus* mají vyšší kmitočty vlastních rezonancí [37].

### Tlumení

(*damping*) je vlastnost materiálu, která tlumí oscilace – vibrace. Odpovídá jí fyzikální vlastnost vnitřní tření [22]. Vnitřní tření například v pružině bez závaží, netlumené prostředím, způsobí její postupné (tlumené kmitání) zastavení. Ideální pružina kmitá netlumeně, reálná tlumeně. Vnitřní tření charakterizuje veličina viskozita (u kapalin) s jednotkou N.s.m<sup>-2</sup> nebo Pa.s.

Oba parametry, modul pružnosti v tahu i vnitřní tření požadujeme u materiálů pro výrobu ozvučnic co nejvyšší, zásadnější je pravděpodobně parametr vnitřní tření, jež je ale bohužel nesnadné získat. Nebývá uváděn u všech materiálů.

Dalšími parametry, které je třeba při volbě materiálu uvážit, jsou opracovatelnost materiálu do potřebného tvaru, možnost spojování, dosažitelná povrchová úprava a podobně. Výhodné jsou silné, tuhé konstrukce, u kterých je ale třeba uvážit hmotnost s ohledem na výrobu, manipulaci a dopravu.

### 5.1 Lat'ovka

Dříve hojně používaný materiál, populární pro svou dostupnost a opracovatelnost. Pro profesionální ozvučnice dnes již nepoužívaný kvůli své nedostatečné netečnosti k vibracím – nízkému vlastnímu tlumení.

Střed desek je vyrobený slepením dřevěných, smrkových nebo jiných latěk, který je ze stran překlížený silnou dýhou, tzv. překlížovačkou nebo poddyžkou. Konkrétní provedení závisí na výrobcí, mohou být použity různé dřeviny k vnějšímu odýhování, vícevrstvé

odýchování a podobně. Vlastností je značná pevnost při přijatelně nízké hustotě, rozměrová stabilita, dobrá a technologicky snadná spojovatelnost, například vruty, lepením, atd.

Typické parametry desek jsou přibližně: hustota kolem  $500 \text{ kg.m}^{-3}$ , smyková pevnost 2,5MPa.

## 5.2 Překližka

Pevný a tuhý materiál. Vlastnosti jsou závislé na použitém dřevě, počtu a tloušťce vrstev – jednotlivých dých. Překližka vznikne slepením loupaných dých s vzájemně kolmo orientovanými léty. Používají se například březové překližky, jejichž hustota se pohybuje kolem  $670 \text{ kg.m}^{-3}$ . Nevýhodou lepené překližky je možnost dutin mezi jednotlivými vrstvami, které mohou vzniknout slepením z vrstev s chybějícími kousky. Tato vada se může zvukově nepříznivě projevit.

Překližka může být libovolně povrchově upravena, například odýchována. Ozvučnice může být vyrobena slepením nebo sešroubováním z desek, nebo může být vyrobena slepením z dých ve formě cílového tvaru. Tuto možnost využívá pro některé své výrobky například společnost Bowers & Wilkins [4], příklad na Obr. 7. Současně ale používá důkladnou výztuhu maticí vyrobenou z MDF, na Obr. 8. Použití výztuhy je odůvodněno tím, že případné tlumící materiály, kterými bývají vnitřní stěny ozvučnice vystlány, pohlcují energii dopadající akustické vlny, ale nepohlcují vibrace přenášené na ozvučnici přímo z elektroakustických měničů. Použitá výztuha tak významně zvyšuje tuhost ozvučnice a jejím dalším přínosem je rozdělení stěn ozvučnice na malé segmenty. V případě rezonancí stěn ozvučnice pak nerezonuje celá ozvučnice, ale každý segment, což zvyšuje kmitočet případných rezonancí a snižuje intenzitu rezonancí.

Typická smyková pevnost 1,2 – 1,8 MPa



Obr. 7 Lepení ozvučnice reproduktoru B&W [4]



Obr. 8 Výztuha ozvučnice reproduktoru B&W [4]

## 5.3 M.D.F.

*Medium density fiber board* je dnes pravděpodobně nejpoužívanějším materiálem (například Meridian [8]). Vyrábí se z dřevěných vláken a jemných pilin lepením za tepla pod vysokým tlakem. Materiál má vysokou hustotu  $600\text{--}800 \text{ kg/m}^3$ , dobrou tuhost, pevnost a velké tlumení. Je dobře opracovatelný, protože je vyroben z jemných částecí, nemá výraznou vnitřní strukturu, proto se dobře řeže, je hladký a není problém s povrchovou úpravou. Společnost Dali [9] používá pro výrobu ozvučnic modelů *Euphonia* sandwich MDF a melaminu, který účinně pohlcuje vibrace.



## 5.4 Beton

Anglicky (*concrete*) je velmi těžký a tuhý materiál, jehož použití pro účely výroby ozvučnic je technologicky komplikované. Jeho jinak výhodné vlastnosti, zejména odolnost vůči vibracím, jsou tlačeny do pozadí velkou hmotností, lze se s ním proto setkat jen výjimečně. Tento materiál používá český výrobce reproduktorových soustav ArmageTone [10]. Jedná se o ozvučnici odlitou z betonu s tloušťkou stěn 30 mm, armovanou ocelovým sítím, Obr. 9. Hmotnost jednoho osazeného reproboxu je 101 kg. Vnitřní objem tohoto reproduktoru je 83 litrů.

Existuje mnoho standardních tříd betonu. Pro použití v ozvučnicích by byl pravděpodobně nejvhodnější typ hutný lehký beton, definovaný ČSN 73 1203 jako beton, ve kterém cementový tmel vyplňuje mezery mezi zrny kameniva a po zhuštění betonové směsi není objem pórů v cementovém tmelu u betonu větší než 2 %. Lehký beton je definován svou objemovou hustotou menší než  $2000 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Příklad vlastností standardního lehkého hutného betonu pevnostní třídy LB 3,5 [23], [24]:

Normovaná pevnost v tlaku: 2 MPa,  
Normovaná pevnost v tahu: 0,3 MPa,  
Modul pružnosti v tahu: 18 GPa.

## 5.5 Kámen

Má podobné vlastnosti jako beton. Podle [1] se k výrobě ozvučnic používá břidlice (*slate*), pískovec (*sandstone*), žula (*granite*), mramor (*marble*), vápenec (*limestone, calcite*). Kámen je obecně velmi tuhý a rezonanční kmitočty stěn ozvučnice jsou tedy spíše vyšší, tuhostí je snížena amplituda kmitů. V kombinaci s nepříliš dobrým vlastním tlumením přírodních kamenů obvykle může dojít k tomu, že ozvučnice „zvoní“ [25]. Výhodnější jsou proto „umělé kameny“, vytvořené z kamenné drti vyplněné speciálními syntetickými nebo cementovými pojivy, které mají lepší vnitřní tlumení. Pro výrobu umělého kamene mohou být použity například břidlice, mramor [27], [13] nebo čedič (*basalt*).

**Vlastnosti dvou použitelných druhů kamene pro výrobu umělého kamene jsou:**

**Čedič** (*basalt*) je vyvřelá hornina porfyrické (nestejně zrnité) nebo sklovité (amorfní) struktury. Textura bývá proudovitá nebo všesměrná (izotropní). Zrnitost je jemná, barva šedo – černá až černá. Z čediče se také vyrábějí vysoce pevná a ohebná vlákna a tkaniny používané ve stavebnictví, leteckém průmyslu i k výrobě zvukových izolací [39].

**Mramor** (*marble*) vznikl přeměnou vápenců vlivem vysokého tlaku a teploty v zemské kůře překrytím organogenního vápence. Není příliš tvrdý, je relativně izotropní a homogenní, odolný proti otřesům [40].

Hustoty kamenných materiálů jsou [11] jsou uvedeny v Tab. 2:

Tab. 2 Hustoty kamenných materiálů

	hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
břidlice	2691
pískovec	2323
žula	2691
mramor	2563
vápenec	2611
čedič	3010

Společnost Flinkstone [12] používá pro své výrobky mastek (*soapstone*), jehož hustota je přibližně  $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Flinkstone složení materiálu charakterizuje takto:

*„Soapstone, or steatite, is formed of 40-50% talcum, 40-50% magnesite and 5-8% penninite. The talcum makes the stone easy to carve whilst the magnesium makes it tough and strong.“*

Vybrané vlastnosti materiálu jsou:

Hustota:  $2980 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  
 Tepelná vodivost:  $6,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  
 Pevnost v tlaku: 25 MPa.

Na Obr. 9 je reprosoustava s ozvučnicí vyrobenou z betonu, na Obr. 10 je reprosoustava s ozvučnicí vyrobenou z mastku:



Obr. 9 Reprodukční soustava s ozvučnicí vyrobenou z betonu, společnost ArmageTone [10]      Obr. 10 Reprodukční soustava společnosti Flinkstone [12]

Společnost Green Mountain Audio používá materiál zvaný *Q-stone* [13], Obr. 11. Tento materiál popisuje jako velmi tuhý materiál vyrobený z jemného mramorového prachu pojeného speciálními polymery.



Obr. 11 Detail materiálu Q-stone používaného společností Green Mountain Audio [13]

## 5.6 Plasty

Používá se mnoho různých plastů, které mají různé vlastnosti. Většinou se využívá termoplastů, které se zpracovávají tlakovým vstřikováním do forem, a je tedy možné vyrábět velké série identických dílů. Mezi používané plasty patří:

### **ABS** (*acrylonitrile butadiene styrene*)

ABS je amorfní směs termoplastů [14]. Obsahuje 15 – 35 % akrylonitrylu, 5 – 30 % butadienu a 40 – 60 % styrenu. Jeho parametry závisí na vzájemných poměrech látek. Acrylonitril dodává směsi tepelnou a chemickou odolnost, guma – butadinen pružnost a nárazovou odolnost. Styren poskytuje lesklý povrch, snadnější strojní obrábění a snižuje cenu směsi. Celkově je ABS dobře nárazově odolné, a to i při nízkých teplotách. Má dostatečnou tuhost a rozměrovou stabilitu.

### **Polystyren**

Anglicky někdy též *high impact polystyrene* je plast používaný například společností Bang&Olufsen [17]. Polystyren je polymer vyrobený z monomeru styrenu (jednoduché organické sloučeniny schopné polymerovat na vysokomolekulární látku).

Typické parametry polystyrenu jsou [15]:

Hustota:	1050 kg.m <sup>-3</sup> ,
Pevnost v tahu:	46 – 60 MPa,
Modul pružnosti:	3 – 3,6 GPa.

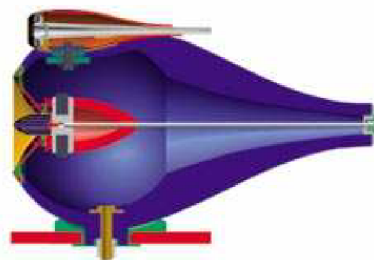
### **Marlan**

Moderní plast vyráběný v Holandsku, používaný například společností Bowers & Wilkins [4], Obr. 12. Vlastností je velká hustota, netečnost k vibracím, libovolná tvarovatelnost, a možnost povrchové úpravy. Jedná se o směs speciálních poly-pryskyřic (přibližně 35%) a vybraných minerálních plniv. Výrobce tvrdí, že Marlan se podobá kameni, například mramoru nebo žule, ale má tepelné vlastnosti podobné dřevu.

Parametry materiálu jsou [16]:

Hustota:	1650 – 1770 kg.m <sup>-3</sup> ,
Pevnost v tahu:	40 – 42 MPa,
Pevnost v ohybu:	57 – 54 MPa,
Modul pružnosti:	8,85 – 10,54 GPa.

Řez ozvučnicí reproduktoru vyrobenou z plastu Marlan je na Obr. 12:



Obr. 12 Řez ozvučnicí středopásmového reproduktoru společnosti B&amp;W [4]

## 5.7 Hliník (Aluminium)

Je to kov, který je v dnešní době velmi populární pro svou nízkou hustotu, která je v porovnání s železem přibližně třetinová. Není příliš tuhý, ale používá se ve slitinách (například dural) s jinými kovy. Slitiny pak mohou dosahovat pevnosti v tahu 70 až 700 MPa. Modul pružnosti v tahu [24] hliníku a jeho slitin je 68,6 GPa. Někdy jsou udávány i jiné, vyšší hodnoty.

Porovnání hustoty hliníku [18] s dalšími kovy je v tabulce:

Tab. 3 Hustoty kovových materiálů

kov	Al	Fe	Cu	Zn
hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2700	7900	8900	7100

Hliník používají například společnosti Celestion [19], Obr. 13 a Bang&Olufsen [17], Obr. 14:



Obr. 13 Reproductor Celestion [19]



Obr. 14 Reproductor B&amp;O [17]



Obr. 15 Reproductor Marten [20]

Společnost Celestion [19] používala pro omezení vibrací ozvučnic materiál zvaný Aeroweb (Aerolam, Hexlite). Jedná se o aluminiové desky struktury včelích pláství (*Aluminium Centered Honeycomb lightweight boards*). Vyznačují se vysokou pevností při velmi nízké hustotě. Hustota materiálu [34] je  $83 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 5.8 Další používané materiály, porovnání

Další používané materiály jsou všemožné tkaniny a lamináty. Kevlarová tkanina, karbonová tkanina, tkanina ze skelných vláken. Příkladem může být ozvučnice společnosti Marten [20] modelu *Coltrane* na Obr. 15, jehož zadní část ozvučnice je tvořena sandwichem kevlaru a karbonu.

### Porovnání hustot používaných materiálů:

Tab. 4 Porovnání hustot materiálů používaných pro výrobu ozvučnic

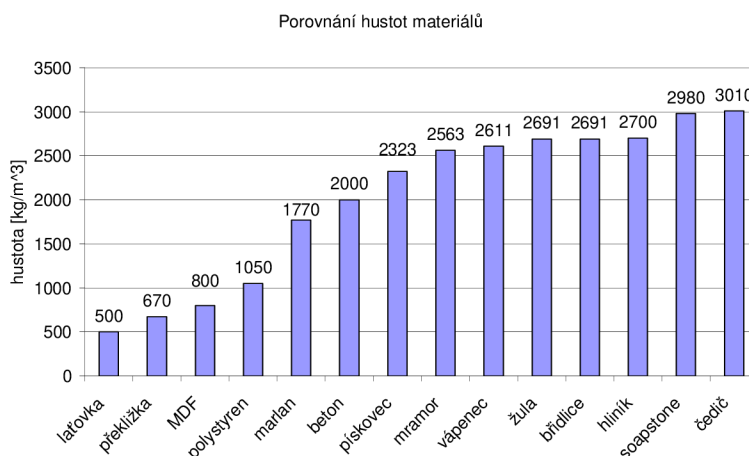
	laťovka	překližka	MDF	polystyren	marlan	beton	pískovec
kg m <sup>-3</sup>	500	670	800	1050	1770	2000	2323
	mramor	vápenec	žula	břidlice	hliník	soapstone	čedič
kg m <sup>-3</sup>	2563	2611	2691	2691	2700	2980	3010

### Porovnání hodnot zjištěných modulů pružností *E*:

Tab. 5 Porovnání hodnot modulů pružnosti v tahu

	polystyren	marlan	dřevo	beton	Al a slitiny
<i>E</i> [GPa]	3,6	10,54	12	18	68,6

Grafické porovnání hustot materiálů používaných pro výrobu ozvučnic je na Obr. 16:



Obr. 16 Porovnání hustot materiálů používaných pro výrobu ozvučnic

Z grafického porovnání hustot používaných materiálů vyplývá vhodnost kamenných materiálů z hlediska vysoké hustoty. Nevýhodou je nižší vlastní tlumení a obtížná opracovatelnost, která velmi komplikuje sériovou výrobu.

## 6 Ozvučnice

Hlavním účelem ozvučnice není, jak by se mohlo na první pohled zdát, pouhé mechanické upevnění elektroakustických měničů. Hlavní funkcí je oddělení přední a zadní zvukové vlny. Membrána měniče kmitá v rytmu frekvence zpracovávaného (přeměňovaného z elektrického na akustický) signálu kolem své rovnovážné polohy. Membrána tak periodicky stlačuje a zředňuje vzduch ve své blízkosti. Membrána má dvě strany. Přední, která je upevněna v ozvučnici směrem ven – do prostoru, který ozvučuje a zadní stranu, která je nasměrována dovnitř ozvučnice. Obě strany tedy produkují zvukovou vlnu, která se liší pouze opačnou fází. Pokud se tyto vlny v prostoru setkají, vzájemně se sčítají, mají tedy tendenci se vyrušit. Tento jev se označuje jako akustický zkrat. Vyloučení vzájemné interakce obou vln je hlavním úkolem ozvučnice.

Nejjednodušším a možná nejdokonalejším řešením je takzvaná desková ozvučnice. Lze si ji představit jako tuhou plochou desku nekonečných rozměrů, v níž je vestavěn měnič. Přední vyzářená akustická vlna se šíří prostorem na jedné straně desky, zadní vlna se šíří prostorem na druhé straně desky. Obě vlny jsou dokonale odděleny a nemohou se setkat. Nekonečně rozlehlou desku nelze realizovat, proto se používají deskové ozvučnice konečných rozměrů a to prakticky pouze pro měřicí účely.

### 6.1 Uzavřená ozvučnice

Uzavřená ozvučnice (*sealed, closed box*) je konstrukce, která prostor rozdělí na prostor uvnitř a vně ozvučnice. Ozvučnice musí být dokonale utěsněna, všechna energie zadní vlny zůstane v ozvučnici, kde je utlumena a přeměněna se na teplo. Využita je tedy pouze přední vlna. Nevýhodou této jinak velmi účinné konstrukce je její působení na vlastní měnič. Důležitou vlastností elektroakustických měničů je poddajnost závěsu membrány. Ke stlačování a zředování vzduchu uzavřeného v ozvučnici je potřeba přídavné síly, která se přičítá k síle potřebné pro pohyb membrány (pro pružnou deformaci závěsu) ve volném prostředí, vestavěním do uzavřené ozvučnice se tedy závěs membrány začne chovat více tuze. Tato přídavná tuhost se projeví zvýšením rezonanční frekvence [25] elektroakustického měniče podle vztahu:

$$f_b = f_s \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{V_{as}}{V_b}\right)}, \quad (6.1)$$

kde  $f_b$  je rezonanční frekvence měniče vestavěného v uzavřené ozvučnici,  $f_s$  je rezonanční frekvence měniče,  $V_{as}$  je ekvivalentní objem reproduktoru,  $V_b$  je objem ozvučnice. Veličina ekvivalentní objem reproduktoru popisuje tuhost závěsu měniče a je udávána jako jeden z parametrů měničů.

### 6.2 Ozvučnice typu Bassreflex

Hlavní výhodou Bassreflexové ozvučnice (*vented box*) je menší výchylka membrány v blízkosti rezonanční frekvence ozvučnice  $f_b$ , která poskytuje nižší zkreslení, jinak

způsobované velkou výchylkou membrány. Pod rezonanční frekvencí ale výchylka rychle roste a měnič je zde náchylný k snadnému mechanickému poškození. Výhodou je dosažení nižšího dolního mezního kmitočtu  $f_3$  (dolní mezní frekvence pro pokles přenosové charakteristiky o  $-3$  dB), než při použití měniče v uzavřené ozvučnici stejného objemu. Dalším kladem je vyšší účinnost. Velkou nevýhodou je citlivost návrhu na přesnost  $TS$  (*Thiele – Small*) parametrů.

Stejně jako u reprosoustavy s uzavřenou ozvučnicí je i u bassreflexové konstrukce dolní mezní kmitočet soustavy dán společným činitelem jakosti  $Q_{tc}$ . Pro použití v bassreflexové ozvučnici musíme vybírat měniče s celkovým činitelem jakosti  $Q_{ts}$  v rozsahu pouze 0,2 až 0,5. Orientačním parametrem pro posouzení vhodnosti daného měniče pro použití v daném typu ozvučnice je hodnota  $EBP$  (*Efficiency Bandwidth Product*) [26]:

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}}, \quad (6.2)$$

kde  $f_s$  je rezonanční frekvence reproduktoru ve volném prostoru,  $Q_{es}$  je elektrický činitel jakosti, který reprezentuje vliv elektrických ztrát v kmitací cívce.

Pokud je hodnota  $EBP = 50$  a méně, je měnič vhodný pro použití v uzavřené ozvučnici. Pokud je  $EBP$  vyšší, např. kolem  $EBP = 100$ , je měnič vhodný pro bassreflexovou ozvučnici.

### Aproximace ladění

Při návrhu bassreflexové ozvučnice vycházíme z takzvaných „aproximací ladění“. Jsou známy různé aproximace, s jejichž pomocí lze navrhnout objem a ladění bassreflexového nátrubku, podle předem zvoleného průběhu frekvenční charakteristiky. Prvotní rozdělení aproximačních přístupů je na *Assisted* (obsahují přidané aktivní elektronické obvody pro dosažení požadované  $SPL$  charakteristiky) a *Unassisted* (bez dalších elektronických obvodů). Používanější kategorií jsou pravděpodobně *Unassisted*, dále dělené na *Flat* a *Nonflat*. *Nonflat* aproximace používají vyšší hodnoty  $Q_{ts}$  a mají horší průběh frekvenční  $SPL$  charakteristiky, který lze v některých případech tolerovat vzhledem k dosažitelné dolní mezní frekvenci  $f_3$ . Pro kvalitní aplikace se používají *Flat* aproximace s měniči s hodnotou  $Q_{ts}$  do 0,4.

#### Aproximace ladění *Flat* [26]

- SBB4** *Super Boom Box* 4. řádu je charakteristický objemnou ozvučnicí, hlubokým laděním a dobrou přechodovou charakteristikou.
- SC4** *Sub-Chebyshev* 4. řádu používá stejný objem ozvučnice a dosahuje stejné  $f_3$  jako SBB4, používá ale jiné ladění nátrubku a má o něco horší přechodovou charakteristiku.
- QB3** *Quasy Butterworth* 3. řádu je nejběžněji používaným typem aproximace, protože poskytuje nízké  $f_3$  pro nejmenší objem ozvučnice a dané  $Q_{ts}$ . Má ale bohužel o něco horší přechodovou charakteristiku, než SBB4 nebo SC4.
- B4** (*Butterworth* 4. řádu), **BE4** (*Bessel* 4. řádu), **IB4** (*Butterworth Inter-Order*)  
– Tyto aproximace existují pouze pro diskrétní hodnoty  $Q_{ts}$ , nejlepší přechodovou charakteristiku má BE4.

Pravděpodobně nejlepším kompromisem je použití aproximace QB3, která při nejmenším objemu poskytuje obdobné  $f_3$ , přechodové charakteristiky a nejmenší výchylku membrány v porovnání s ostatními *flat* aproximacemi.

### Postup výpočtu parametrů ozvučnice a bassreflexového nátrubku

Po zvolení aproximace následuje výpočet parametrů ozvučnice. Parametry potřebné pro tento krok návrhu jsou [26]:

$f_s$  – rezonanční frekvence měniče bez ozvučnice ve volném prostoru (*free air resonance*)  
 $Q_{ts}$  – celkový činitel jakosti měniče zahrnující  $Q_{es}$  (elektrický činitel jakosti) a  $Q_{ms}$  (mechanický činitel jakosti) [27]:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}, \quad (6.3)$$

$V_{as}$  – ekvivalentní objem, definován jako objem vzduchu v uzavřené ozvučnici se stejnou hodnotou poddajnosti, jakou má  $c_{ms}$  (poddajnost kmitacího systému)

$X_{max}$  – maximální lineární výchylka kmitacího systému

$S_d$  – efektivní plocha membrány

$V_d$  – objem spolukmitajícího vzduchu

$$V_d = S_d \cdot X_{max}. \quad (6.4)$$

Tyto parametry bývají publikovány v katalogových listech měničů.

K vlastnímu výpočtu použijeme návrhové tabulky pro zvolený typ aproximace QB3 publikované v [26].

Nejprve se musíme rozhodnout pro hodnotu ztát ozvučnice. Ztráty ovlivňují návrh, ale nejsou dopředu dobře předvídatelné. Ztráty  $Q_B$  jsou dány jako [26]:

$$\frac{1}{Q_B} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_A} + \frac{1}{Q_P}, \quad (6.5)$$

kde  $Q_L$  jsou ztráty způsobené netěsností (*leakage*),  $Q_A$  ztráty způsobené tlumením (*absorption*),  $Q_P$  ztráty nátrubku (*port*). Nejvýznamnější složkou ztrát jsou ztráty způsobené netěsností  $Q_L$ , ostatní se obvykle neuvažují.  $Q_L$  bývá někdy také označováno jako „*Vented box enclosure quality factor*“ [38].

Typickou výchozí hodnotou je  $Q_L = 7$ . Tuto hodnotu použijeme pro návrh a po realizaci ozvučnice jí budeme chtít dosáhnout, nebo se budeme snažit dosáhnout lepší – vyšší hodnoty, například  $Q_L = 15$ .



Potom pro zvolené  $Q_L$  a  $Q_{ts}$  vybraného měniče vybereme z tabulky [26] hodnoty  $H$  poměr ladění (*tuning ratio*),  $\alpha$  poměr poddajností (*compliance ratio*),  $f_3/f_s$  poměr dolní mezní frekvence a rezonanční frekvence měniče bez ozvučnice.

Potřebné hodnoty dále vypočteme podle vztahů [26]:

$$V_b = \frac{V_{as}}{\alpha}, \quad f_b = H \cdot f_s, \quad f_3 = \left( \frac{f_3}{f_s} \right) \cdot f_s, \quad (6.6), (6.7), (6.8)$$

kde  $V_b$  je objem ozvučnice,  $f_b$  je rezonanční frekvence ozvučnice,  $f_3$  je dolní mezní frekvence. Minimální průměr  $d_v$  bassreflexového nátrubku je dán [26]:

$$d_v \geq \sqrt{f_b \cdot V_d}, \quad (6.9)$$

kde  $d_v$  je minimální použitelný průměr nátrubku,  $f_b$  je rezonanční frekvence ozvučnice,  $V_d$  je objem spolukmitajícího vzduchu.

Zvolíme průměr nátrubku splňující podmínku  $d > d_v$ . Délku vypočítáme podle [1]:

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732 \cdot d, \quad (6.10)$$

kde  $V_b$  je objem ozvučnice,  $f_b$  je rezonanční frekvence ozvučnice,  $d$  průměr nátrubku.

Průměr nátrubku je vzhledem ke zkreslení, způsobovanému turbulentním prouděním, vhodné volit co největší. Omezením je délka nátrubku, úměrná druhé mocnině průměru.

Podle [26] jsou vhodné průměry  $d$  bassreflexových nátrubků ve vztahu k průměrům měničů:

$$\begin{array}{lll} d = 2'' \rightarrow & 4'' \text{ a } 5'' & \text{měniče,} \\ d = 4'' \rightarrow & 8'' \text{ a } 10'' & \text{měniče,} \\ d = 6'' \rightarrow & 12'' \text{ a } 15'' & \text{měniče.} \end{array}$$

Z výše uvedeného doporučení vyplývá jedno z možných pravidel pro volbu průměru bassreflexového nátrubku  $d$ :

$$d \approx \left\langle \frac{D}{2,5}, \frac{D}{2} \right\rangle, \quad (6.11)$$

kde  $D$  je průměr měniče v odpovídajících jednotkách.

Vztah mezi délkovou jednotkou palec (" , *inch*) a metrickou jednotkou je:  
1 m = 39,3701 palců; 1 palec = 0,0254 m.

V poslední době jsou často používané bassreflexové nátrubky s rozšířeným jedním, nebo oběma konci. Tyto nátrubky jsou označovány *flared ports*.

Jejich výhody jsou zejména:

- nižší výkonová komprese, omezení turbulentního proudění vzduchu
- ladění nátrubku je pouze nepatrně závislé na rozšíření konců a závisí především na minimálním průřezu a celkové délce
- nejlepšího kompromisu mezi zkreslením a výkonovou kompresí lze dosáhnout asymetricky rozevřenými vyústěními nátrubku, s menším rozevřením vnitřního konce a větším rozevřením vnějšího vyústění nátrubku nebo s nátrubkem s minimálním průřezem v polovině jeho délky, který se směrem k vyústěním nepatrně rozšiřuje a má navíc zaoblené konce.

Společnost B&W [4] používá k omezení turbulentního proudění a tím k omezení rušivých zvuků nátrubky s mělkými prohlubněmi, podobně jako mají na svém povrchu golfové míčky.

Kruhový profil bassreflexového nátrubku není jediný možný, dále se používají například obdélníkové nebo elipsovité profily.

Vhodnější jsou nátrubky, jejichž délka je jen o málo větší než průměr. V příliš dlouhých nátrubicích mohou vznikat rušivé rezonance. Tyto rezonance jsou špatně předvídatelné, závisí na rozměrech nátrubku, poloze v ozvučnici, vzdálenosti od stěn a tlumicího materiálu. Umístění bassreflexového nátrubku na zadní stěně ozvučnice může omezit slyšitelnost rušivých zvuků, současně ale také posílení nižších kmitočtů.

## 7 Volba basového měniče

Při volbě byla nejprve uvažována nabídka měničů dostupných na českém trhu, zejména měničů o průměru do 10“ pro jejich menší potřebný objem ozvučnice, lepší dynamické vlastnosti, menší směrovost na vyšších kmitočtech a vyrovnanější frekvenční charakteristiku na vyšších kmitočtech, než obvykle mají měniče větších průměrů. Pokud bylo v nabídce měničů více podobných typů, byl uvažován typ s nejvyrovnanější *SPL* charakteristikou. V rámci výběru byly také proměřeny některé měniče, používané společností Bang & Olusen [17].

Místo původně uvažovaných měničů, popsanych v Příloha 1, byl nakonec zvolen měnič s průměrem 6,5“, značky Peerless, vyráběné společností Tymphany [3].

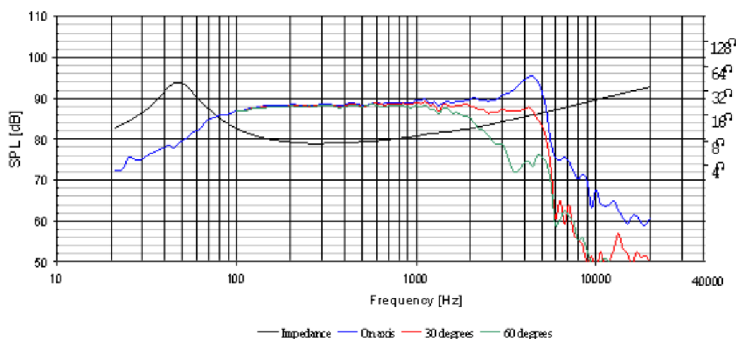
### Peerless HDS Nomex 6½ Midwoofer

Jedná se o měnič z kmitočtové řady *MIDWOOFER*, série *HDS (High Definition Sound)* s membránou vyrobenou z materiálu Nomex. Zkratovací kroužky omezují modulaci magnetického pole permanentního magnetu a spolu s větracím otvorem v magnetu snižují výkonovou kompresi a zkreslení. Výrobce jej doporučuje k použití v bassreflexových ozvučnicích. Cena měniče v internetovém obchodě [42] je 67 €.

Základní a *TS* parametry [3]:

Jmenovitá impedance	8 Ω	$f_s$ rezonanční frekvence	48,1 Hz
Minimální impedance	7,1 Ω	$R_e$ s. s. odpor cívky	6,4 Ω
Maximální impedance	44 Ω	$L_e$ indukčnost cívky	1,3 mH
Citlivost	88,6 dB	$Q_{ms}$ mech. činitel jakosti	2,67
		$Q_{es}$ el. činitel jakosti	0,45
		$Q_{ts}$ celk. činitel jakosti	0,39
Průměr cívky	33 mm	$V_{as}$ ekvivalentní objem	17,6 litrů
Hmotnost magnetu	0,68 kg	$C_{ms}$ mech. poddajnost závěsu	0,66 mm/N
<i>Bl</i> faktor	8,4 Tm	$R_{ms}$ mech. odpor závěsu	1,88 kg/s
$M_{ms}$ kmitající hmotnost	0,0166 kg	$X_{max}$ max. lin. výchylka	5,5 mm
		$S_d$ ef. plocha membrány	139 cm <sup>2</sup>

Měnič HDS Nomex 6½ a jeho frekvenční *SPL* a impedanční charakteristika jsou na Obr. 17 a Obr. 18:



Obr. 17 Měnič HDS Nomex 6½ [3]    Obr. 18 Frekvenční *SPL* a impedanční charakteristika měniče HDS Nomex 6½ [3]

*EBP (Efficiency Bandwith Product)* měniče HDS Nomex 6½ je (6.2):

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}} = \frac{48,1}{0,45} = 106,9 \quad (7.1)$$

Použité materiály:

Koš – tlakově litý hliník, membrána – Nomex, závěs – SBR guma (syntetický butadienstyrenový kaučuk [43], cívka – hliník.

## 7.1 Simulace impedanční charakteristiky měniče

Pro modelování průběhu impedanční charakteristiky měniče se používá náhradní obvod, obsahující prvky reprezentující elektrické a mechanické vlastnosti měniče bez ozvučnice.

Vliv elektrických vlastností je v náhradním obvodu reprezentován stejnosměrným odporem cívky  $R_e$  [ $\Omega$ ] a indukčností kmitací cívky  $L_e$  [H]. Vliv mechanických vlastností měniče je reprezentován mechanickým odporem  $R_m$  [N.s/m], mechanickou poddajností  $C_m$  [m/N] a mechanickou hmotností  $L_m$  [kg].

Hodnota indukčnosti kmitací cívky měniče je frekvenčně závislá, nelineární a v náhradním obvodu ji pro lepší shodu s reálnými vlastnostmi měniče můžeme nahradit několika, obvykle třemi indukčnostmi, přemostěnými rezistory. Rezistory se obvykle používají jen dva. Hodnoty indukčností a rezistorů je třeba určit simulací, přesně je vypočítat nelze. Obvykle se používají indukčnosti, jejichž hodnoty klesají ( $L_{e1} > L_{e2} > L_{e3}$ ) a rezistory, jejichž hodnoty stoupají ( $R2 < R3$ ). Detailní rozbor problematiky modelování nelinearity kmitací cívky měniče lze najít v [44].

Nelinearita indukčnosti je na jedné straně nežádoucí, komplikuje náhradní obvod měniče a způsobuje rozdílnost teoretických a reálných výsledků. Na druhé straně ale nelinearita způsobuje nižší strmost nárůstu impedance směrem k vyšším kmitočetům. To má za následek rozšíření použitelného kmitočtového pásma měniče.

Induktivní charakter měničů na vyšších kmitočtech způsobuje problémy s návrhem výhybek, které nejsou zatíženy jednoduchou odporovou zátěží. Induktivní charakter měničů proto bývá kompenzován.

Někteří výrobci používají měniče bez kompenzace impedanční charakteristiky a co nejjednodušší výhybky, které s induktivním charakterem měniče počítají.

Dané [3] a vypočtené prvky impedančního náhradního obvodu měniče [1] jsou:

$$R_e = R_e = 6,4 \Omega, \quad L_e = L_e = 1,3 \text{ mH}, \quad (7.2), (7.3)$$

$$R_m = Bl^2/R_{ms} = 8,4^2 / 1,88 = 37,53 \text{ N.s/m}, \quad (7.4)$$

$$L_m = C_{ms} \cdot Bl^2 = 0,66 \text{ m} \cdot 8,4^2 = 0,04657 \text{ kg}, \quad (7.5)$$

$$C_m = M_{ms}/Bl^2 = 0,0166 / 8,4^2 = 235,26 \mu\text{m/N}. \quad (7.6)$$

Dané [3] prvky a korigované prvky, nalezené simulací:

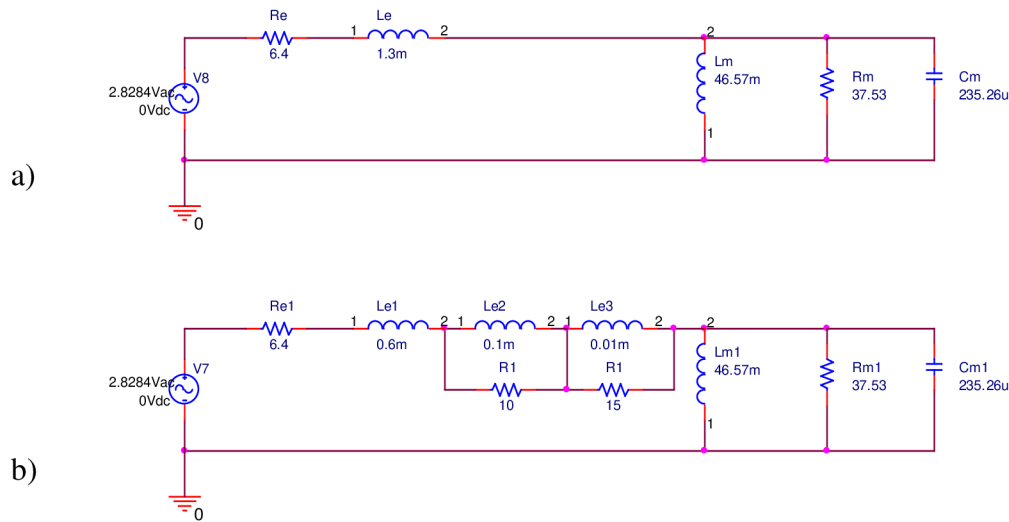
$$R_{e1} = 6,4 \Omega, \quad R_1 = 10 \Omega, \quad R_2 = 15 \Omega \quad (7.7), (7.8), (7.9)$$

$$L_{e1} = 0,6 \text{ mH}, \quad L_{e2} = 0,1 \text{ mH}, \quad L_{e3} = 0,01 \text{ mH}, \quad (7.10), (7.11), (7.12)$$

$$R2 = 10 \Omega, \quad R3 = 15 \Omega, \quad R_{m1} = 37,53 \text{ N.s/m}, \quad (7.13), (7.14), (7.15)$$

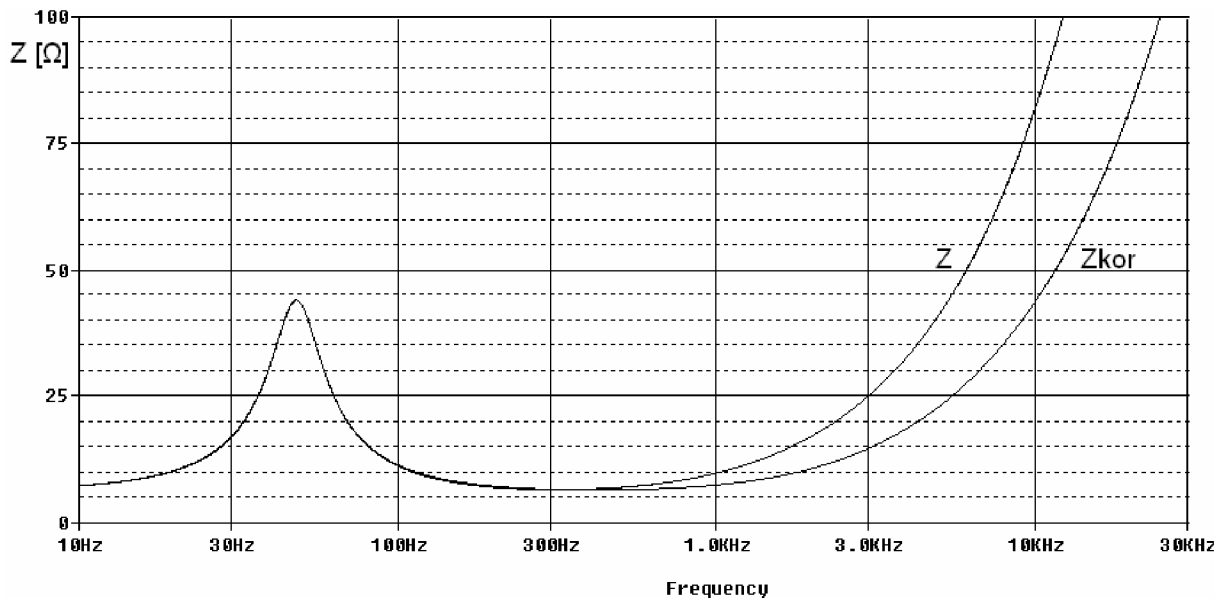
$$L_{m1} = 0,04657 \text{ kg}, \quad C_{m1} = 235,26 \mu\text{m/N}. \quad (7.16), (7.18)$$

Náhradní impedanční obvod měniče a korigovaný impedanční obvod měniče pro simulaci průběhů impedanční charakteristiky jsou na Obr. 19:



Obr. 19 a) Náhradní impedanční obvod měniče; b) korigovaný obvod měniče

Simulované průběhy impedancí náhradního obvodu a korigovaného náhradního obvodu měniče jsou na obrázku Obr. 20. Korekce průběhu impedance není dokonalá. Skutečnému průběhu se lze jen přiblížit a to tím lépe, čím menší hodnotu indukčnosti  $L_{e1}$  použijeme. Snižovat tuto indukčnost ale není příliš žádoucí, protože kmitací cívka je jedinou skutečnou elektrickou součástí měniče, ostatní prvky náhradního obvodu již jen simulují mechanické vlastnosti měniče.



Obr. 20 Simulované průběhy impedancí náhradního a korigovaného obvodu měniče

Na Obr. 20 vidíme srovnání simulovaných impedančních charakteristik měniče. Porovnáním s Obr. 18 vidíme, že průběh korigované impedanční charakteristiky lépe odpovídá impedanční charakteristice měniče publikované výrobcem [3].

## 8 Volba výškového měniče

Stejně jako v případě basového měniče byly nejprve uvažovány měniče dostupné na českém trhu. Tyto výškové měniče jsou popsány v Příloha 2.

### Peerless HDS 1“ Tweeter

Jedná se o měnič z kmitočtové řady *TWEETER*, série *HDS (High Definition Sound)* s lehkou membránou s vysokým tlumením, které omezuje rezonance membrány a poskytuje velmi vyrovnanou kmitočtovou *SPL* charakteristiku bez výrazných špiček nebo propadů. Měnič má velmi nízký rezonanční kmitočet, což umožňuje jeho použití v sestavě s nízkým dělicím kmitočtem.

Výrobce doporučuje jeho použití i ve studiových monitorech a ostatních kvalitních aplikacích. Cena měniče v internetovém obchodě RIVIERA ACOUSTICS [42] je 81 €.

Základní a *TS* parametry [3]:

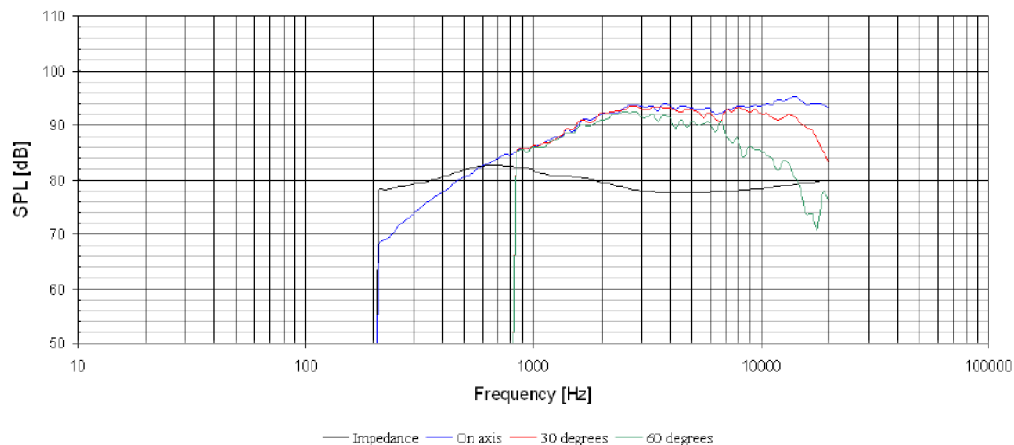
Jmenovitá impedance:	8 $\Omega$ ,
$f_s$ rezonanční frekvence:	700 Hz,
$R_e$ s.s. odpor cívky:	5,6 $\Omega$ ,
Citlivost:	93 dB,
Průměr cívky:	1“.

Obrázek měniče Peerless HDS Tweeter je na Obr. 21:



Obr. 21 Peerless HDS Tweeter [3]

Průběh frekvenční *SPL* a impedanční charakteristiky je na Obr. 22:



Obr. 22 Frekvenční *SPL* a impedanční charakteristika Peerless HDS Tweeter [3]

Na Obr. 22 vidíme průběh impedanční charakteristiky, který je velmi plochý v celém kmitočtovém rozsahu, bez výrazné rezonanční špičky. Podle tohoto s kmitočtem jen málo proměnného průběhu a také podle toho, že výrobce neudává dostatek potřebných  $TS$  parametrů pro simulaci impedanční charakteristiky, můžeme usuzovat, že nebude nutné kompenzovat průběh impedanční charakteristiky.

## 9 Návrh parametrů ozvučnice a bassreflexového nátrubku

**Při použití měniče HDS Nomex 6 $\frac{1}{2}$  s  $Q_{ts} = 0,39$ ,  $Q_L = 7$  a aproximaci QB3 jsou parametry pro výpočet objemu a ladění [26] bassreflexové ozvučnice:**

$$H = 1,0335 \quad \alpha = 1,2300 \quad f_3/f_s = 1,0674$$

Výpočet objemu a ladění podle vztahů (6.6), (6.7), (6.8):

$$V_b = \frac{V_{as}}{\alpha} = \frac{17,6}{1,23} = 14,31 \text{ litrů}, \quad (9.1)$$

$$f_b = H \cdot f_s = 1,0335 \cdot 48,1 = 49,7 \text{ Hz}, \quad (9.2)$$

$$f_3 = \left( \frac{f_3}{f_s} \right) \cdot f_s = 1,0674 \cdot 48,1 = 51,3 \text{ Hz}, \quad (9.3)$$

kde  $V_b$  je objem ozvučnice,  $f_b$  je rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice,  $f_3$  je dolní mezní frekvence.

Pokud není objem spolukmitajícího vzduchu udáván přímo v katalogovém listu, vypočteme ho podle (6.4):

$$V_d = S_d \cdot X_{\max} = 0,0139 \cdot 0,0055 = 76,45 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^3; \text{m}^2, \text{m]}, \quad (9.4)$$

kde  $V_d$  je objem spolukmitajícího vzduchu,  $S_d = 0,139 \text{ m}^2$  [3] je efektivní plocha membrány,  $X_{\max} = 0,0055 \text{ m}$  [3] je maximální lineární výchylka membrány.

Minimální průměr  $d_v$  bassreflexového nátrubku (6.9):

$$d_v \geq \sqrt{f_b \cdot V_d} = \sqrt{49,7 \cdot 0,00007645} = 0,062 \text{ [m; Hz, m}^3], \quad (9.5)$$

kde  $d_v$  je minimální použitelný průměr nátrubku,  $f_b$  je rezonanční frekvence ozvučnice,  $V_d$  je objem spolukmitajícího vzduchu.

Výrobce doporučuje použití bassreflexového nátrubku průměru  $d = 0,07$  m. Bassreflexový nátrubek daného průměru prodává společnost Dexon [30]. Délku vypočteme (6.10):

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732 \cdot d = \frac{2361 \cdot 0,07^2}{49,7^2 \cdot 0,01431} - 0,732 \cdot 0,07 = 0,276 \text{ [m; m, Hz, m}^3\text{]}, \quad (9.6)$$

kde  $l$  je délka bassreflexového nátrubku,  $d$  je průměr nátrubku,  $f_b$  je rezonanční frekvence ozvučnice,  $V_b$  je objem ozvučnice.

Plocha průřezu nátrubku (portu)  $S_p$  o průměru  $d = 0,07$  m je:

$$S_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,07^2}{4} \approx 0,00385 \text{ [m}^2\text{; m]}. \quad (9.7)$$

Efektivní plocha membrány  $S_d$  o efektivním průměru  $D = 0,133$  m je  $S_d = 0,0139 \text{ m}^2$  [3].

Vzájemný poměr  $S_d / S_p$  je:

$$S_d / S_p = 0,0139 / 0,00385 = 3,61 \text{ [- ; m, m]}, \quad (9.8)$$

což je podle [26] dostatečná hodnota, ideálně by však tento poměr měl být vyšší. Důvodem pro použití pokud možno menších průměrů nátrubků  $d$  je jejich délka  $l$ , která je přímo úměrná kvadrátu průměru  $d$  podle (6.10).

**Při použití měniče s  $Q_{ts} = 0,39$ ,  $Q_L = 15$  a aproximaci QB3 jsou parametry pro výpočet objemu a ladění [26]:**

$$H = 1,0059 \quad \alpha = 1,2777 \quad f_3/f_s = 1,0125$$

Výpočet objemu a ladění podle vztahů (6.6), (6.7), (6.8):

$$V_b = \frac{V_{as}}{\alpha} = \frac{17,6}{1,2777} = 13,77 \text{ litrů}, \quad (9.9)$$

$$f_b = H \cdot f_s = 1,0059 \cdot 48,1 = 48,4 \text{ Hz}, \quad (9.10)$$

$$f_3 = \left( \frac{f_3}{f_s} \right) \cdot f_s = 1,0125 \cdot 48,1 = 48,7 \text{ Hz}, \quad (9.11)$$

kde  $V_b$  je objem ozvučnice,  $f_b$  je rezonanční frekvence ozvučnice,  $f_3$  je dolní mezní frekvence.



Minimální průměr  $d_v$  bassreflexového nátrubku (6.9):

$$d_v \geq \sqrt{f_b \cdot V_d} = \sqrt{48,4 \cdot 0,00007645} = 0,0608 \text{ [m; Hz, m}^3\text{]}, \quad (9.12)$$

kde  $d_v$  je minimální použitelný průměr nátrubku,  $f_b$  je rezonanční frekvence ozvučnice,  $V_d = 76,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$  je objem spolukmitajícího vzduchu, vypočtený podle (6.4).

Opět zvolíme doporučený [3] průměr bassreflexového nátrubku  $d = 0,07 \text{ m}$ . Délku vypočteme (6.10):

$$l = \frac{2361 \cdot d^2}{f_b^2 \cdot V_b} - 0,732 \cdot d = \frac{2361 \cdot 0,07^2}{48,4^2 \cdot 0,01377} - 0,732 \cdot 0,07 = 0,307 \text{ [m; m, Hz, m}^3\text{]}, \quad (9.13)$$

kde  $l$  je délka bassreflexového nátrubku,  $d$  je průměr nátrubku,  $f_b$  je rezonanční frekvence ozvučnice,  $V_b$  je objem ozvučnice.

Výrobce doporučený objem ozvučnice a ladění bassreflexového nátrubku je následující [3]:

$$V_b = 15,3 \text{ litrů}, \quad d = 0,07 \text{ m}, \quad l = 0,223 \text{ m}, \quad f_3 = 49,4 \text{ Hz}.$$

Je zřejmé, že výše vypočtené hodnoty objemu a ladění bassreflexového nátrubku jsou odlišné od hodnot doporučených výrobcem. Výrobce ale neudává typ aproximace ladění a odlišnost doporučených hodnot, proto může být dána použitím jiného typu aproximace ladění než QB3, pro který jsou výše uvedené hodnoty vypočteny. Také není zmíněna hodnota ztrát netěsností ozvučnice  $Q_L$ , a protože je doporučený objem větší než vypočtený, lze předpokládat, že je zvětšen o vlastní objem měniče a bassreflexového nátrubku, které v ručně vypočítaném objemu nejsou započítány. Návrh mechanického řešení ozvučnice bude proveden s ohledem na všechny tři výše uvedené varianty tak, aby mohla být ozvučnice po realizaci přizpůsobena variantě, která bude poskytovat nejlepší výsledky.

## 10 Simulace průběhu SPL frekvenční charakteristiky měniče v bassreflexové ozvučnici

Pro simulaci průběhu *SPL* charakteristiky měniče v bassreflexové ozvučnici použijeme akustický náhradní obvod [45], mírně modifikovaný podle [46].

Použité fyzikální veličiny:

$$\rho_0 = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 344 \text{ m/s}$$

hustota vzduchu [45],

rychlost šíření zvuku ve vzduchu o teplotě 21°C [47].

Uvažované  $TS$  parametry [3]:

$R_e = 6,4 \Omega$	stejnoseměrný odpor kmitací cívky,
$L_e = 1,3 \text{ mH}$	indukčnost kmitací cívky,
$Bl = 8,4 \text{ Tm}$	$Bl$ faktor,
$M_{md} = M_{ms} = 0,0166 \text{ kg}$	kmitající hmotnost membrány,
$R_{ms} = 1,88 \text{ kg/s}$	mechanický odpor,
$C_{ms} = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ m/N}$	mechanická poddajnost,
$S_w = S_d = 0,0139 \text{ m}^2$	efektivní plocha membrány.

## 10.1 Výpočet prvků akustického náhradního obvodu nezávislých na $Q_L$

Parametry související s vlivem bassreflexové ozvučnice [45], [3] jsou:

$$S_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,07^2}{4} = 0,00385 \text{ m}^2, \quad (10.1)$$

kde  $S_p$  je plocha portu – bassreflexu,  $d$  je průměr bassreflexového nátrubku.

Hmotnost spolukmitajícího vzduchu na zadní stěně membrány je dána [45]:

$$M_{ab} = \frac{\rho_0 \cdot d_b \cdot S_w}{3 \cdot S_b^2} + \frac{8\rho_0 \left(1 - \frac{S_w}{S_b}\right)}{3\pi\sqrt{\pi \cdot S_w}}, \quad (10.2)$$

kde  $M_{ab}$  je hmotnost spolukmitajícího vzduchu na zadní stěně membrány (*air-load mass on back of woofer diaphragm*),  $d_b$  je hloubka ozvučnice,  $S_b$  je plocha vnitřní stěny, ve které je měnič připevněn,  $S_w$  je efektivní plocha membrány a  $\rho_0$  je hustota vzduchu.

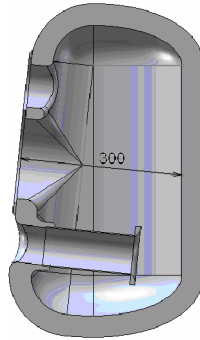
Je zřejmé, že tento parametr bude vypočten jen velmi orientačně, daný vztah uvažuje jinou (obdélníkovou/kvádrovou) geometrii ozvučnice.

Hloubka ozvučnice v ose měniče viz kapitola 12.1 a Obr. 23 je:

$$d_b = 0,30 - 0,04 = 0,26 \text{ m}, \quad (10.3)$$

kde  $d_b$  je hloubka ozvučnice.

Řez ozvučnicí pro určení hloubky ozvučnice v místě basového měniče je na Obr. 23:



Obr. 23 Řez ozvučnicí, boční pohled

Na Obr. 23 je řez ozvučnicí pro přiblížení geometrie ozvučnice pro výpočet hloubky ozvučnice  $d_b$  a plochy vnitřní stěny ozvučnice.

Plocha vnitřní stěny  $S_b$ :

$$S_b = \frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot r \cdot v_v + \frac{1}{2} \cdot 4\pi \cdot r^2 - (\pi \cdot r_t^2 + \pi \cdot r_w^2 + \pi \cdot r_p^2)$$

$$S_b = \frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot 0,075 \cdot 0,39 + \frac{1}{2} \cdot 4\pi \cdot 0,075^2 - (\pi \cdot 0,04^2 + \pi \cdot 0,075^2 + \pi \cdot 0,035^2) =$$

$$= 0,09189 + 0,03534 - 0,02655 \approx 0,1 \text{ m}^2 \quad (10.4)$$

kde  $r = 0,075$  m je poloměr vnitřní stěny válcové části ozvučnice,  $v_v = 0,39$  m je výška válcové části,  $r_t = 0,04$  m je poloměr válcového otvoru pro výškový měnič,  $r_w = 0,075$  m je poloměr válcového otvoru pro basový měnič,  $r_p = 0,035$  m je poloměr bassreflexu.

Plocha vnitřní stěny  $S_b$  se skládá ze dvou částí – plochy poloviny válce a plochy dvou čtvrtin koule. Nakonec jsou odečteny plochy odpovídající otvorům pro oba měniče a bassreflex.

Hmotnost spolukmitajícího vzduchu na zadní stěně membrány podle (10.2) je:

$$M_{ab} = \frac{\rho_0 \cdot d_b \cdot S_w}{3 \cdot S_b^2} + \frac{8\rho_0 \left(1 - \frac{S_w}{S_b}\right)}{3\pi\sqrt{\pi \cdot S_w}} = \frac{1,18 \cdot 0,26 \cdot 0,0139}{3 \cdot 0,1^2} + \frac{8 \cdot 1,18 \cdot \left(1 - \frac{0,0139}{0,1}\right)}{3\pi\sqrt{\pi \cdot 0,0139}} =$$

$$= 0,14215 + 4,12688 \approx 4,269 \text{ kg/m}^4 \quad (10.5)$$

kde  $M_{ab}$  je hmotnost spolukmitajícího vzduchu na zadní stěně membrány,  $d_b$  je hloubka ozvučnice,  $S_b$  je plocha vnitřní stěny,  $S_w$  je efektivní plocha membrány a  $\rho_0$  je hustota vzduchu.

Koeficient vzájemného vlivu měniče na bassreflex je [45]:

$$k_w = 3\pi \cdot \frac{a_w}{16 \cdot d_{pw}} = 3\pi \cdot \frac{0,0665}{16 \cdot 0,157} = 0,2495, \quad (10.6)$$

kde  $a_w = 0,0665$  m je efektivní poloměr membrány basového měniče,  $d_{pw} = l_{bb} = 0,157$  m je osová vzdálenost měniče a bassreflexu, viz kapitola 12.1.

Koeficient vzájemného vlivu bassreflexu na měnič je [45]:

$$k_p = 3\pi \cdot \frac{a_p}{16 \cdot d_{pw}} = 3\pi \cdot \frac{0,035}{16 \cdot 0,157} = 0,1313, \quad (10.7)$$

kde  $a_p = 0,035$  m je poloměr bassreflexu,  $d_{pw} = 0,157$  m je osová vzdálenost měniče a bassreflexu.

**Následující prvky modelují akustickou impedanci zatěžující membránu [45]:**

$$M_{a1w} = \frac{8 \cdot \rho_0}{3 \cdot \pi^2 \cdot a_w} = \frac{8 \cdot 1,18}{3 \cdot \pi^2 \cdot 0,0665} = 4,7943 \text{ kg/m}^4, \quad (10.8)$$

$$R_{a2w} = \frac{\rho_0 \cdot c}{\pi \cdot a_w^2} = \frac{1,18 \cdot 344}{\pi \cdot 0,0665^2} = 29217,8 \text{ N.s/m}^5, \quad (10.9)$$

$$R_{a1w} = \frac{128 \cdot \rho_0 \cdot c}{9\pi^3 \cdot a_w^2} - R_{a2w} = \frac{128 \cdot 1,18 \cdot 344}{9\pi^3 \cdot 0,0665^2} = 12885,4 \text{ N.s/m}^5, \quad (10.10)$$

$$C_{a1w} = \frac{5,94 \cdot a_w^3}{\rho_0 \cdot c^2} = \frac{5,94 \cdot 0,0665^3}{1,18 \cdot 344^2} = 1,2600 \cdot 10^{-8} \text{ m}^5/\text{N}, \quad (10.11)$$

kde  $\rho_0$  je hustota vzduchu, je poloměr basového měniče,  $c$  je rychlost šíření zvuku ve vzduchu.

**Následující prvky modelují akustickou impedanci zatěžující bassreflex [45]:**

$$M_{a1p} = \frac{8 \cdot \rho_0}{3 \cdot \pi^2 \cdot a_p} = \frac{8 \cdot 1,18}{3 \cdot \pi^2 \cdot 0,035} = 9,1093 \text{ kg/m}^4, \quad (10.12)$$

$$R_{a2p} = \frac{\rho_0 \cdot c}{\pi \cdot a_p^2} = \frac{1,18 \cdot 344}{\pi \cdot 0,035^2} = 105476,2 \text{ N.s/m}^5, \quad (10.13)$$

$$R_{a1p} = \frac{128 \cdot \rho_0 \cdot c}{9\pi^3 \cdot a_p^2} - R_{a2p} = \frac{128 \cdot 1,18 \cdot 344}{9\pi^3 \cdot 0,035^2} = 46516,3 \text{ N.s/m}^5, \quad (10.14)$$

$$C_{a1p} = \frac{5,94 \cdot a_p^3}{\rho_0 \cdot c^2} = \frac{5,94 \cdot 0,035^3}{1,18 \cdot 344^2} = 1,8239 \cdot 10^{-9} \text{ m}^5/\text{N}, \quad (10.15)$$

kde  $\rho_0$  je hustota vzduchu, je poloměr bassreflexového nátrubku,  $c$  je rychlost šíření zvuku ve vzduchu.

## 10.2 Výpočet prvků akustického náhradního obvodu závislých na $Q_L$

Pro výpočet dalších prvků musíme uvažovat hodnotu ztrát netěsností  $Q_L$ .

**Pro  $Q_L = 7$  je  $V_b = 14,31 \text{ l} = 0,01431 \text{ m}^3$  (9.1),  $f_b = 49,7 \text{ Hz}$  (9.2).**

Akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici [45] je:

$$C_{ab} = \frac{V_b}{\rho_0 \cdot c^2} = \frac{0,01431}{1,18 \cdot 344^2} = 102,48 \cdot 10^{-9} \text{ m}^5 / \text{N}, \quad (10.16)$$

kde  $C_{ab}$  je akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici,  $V_b$  je objem ozvučnice,  $\rho_0$  hustota vzduchu,  $c$  rychlost šíření zvuku.

Úhlová rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice je:

$$\omega_b = 2\pi \cdot f_b = 2\pi \cdot 49,7 = 312,27 \text{ rad/s}, \quad (10.17)$$

kde  $\omega_b$  je úhlová rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice,  $f_b$  je rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice.

Akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu (*acoustic mass of port including air load*) [45] je:

$$M_{ap} = \frac{1}{\omega_b^2 \cdot C_{ab}} = \frac{1}{312,27^2 \cdot 1,0248 \cdot 10^{-7}} = 100,0664 \text{ kg/m}^4, \quad (10.18)$$

kde  $M_{ap}$  je akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu,  $\omega_b$  je úhlová rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice,  $C_{ab}$  je akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici.

Akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu s korekcí o akustickou impedanci zatěžující bassreflex je [45]:

$$M'_{ap} = M_{ap} - M_{alp} = 100,0664 - 9,1093 = 90,9571 \text{ kg/m}^4, \quad (10.19)$$

kde  $M'_{ap}$  je korigovaná hmotnost vzduchu v bassreflexu,  $M_{ap}$  je akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu,  $M_{alp}$  reprezentuje vliv akustické impedance zatěžující bassreflex.

Akustický odpor netěsností ozvučnice  $R_{al}$  vypočteme po úpravě vztahu pro výpočet  $Q_L$  [38]:

$$Q_L = R_{al} \sqrt{\frac{C_{ab}}{M_{ap}}} \quad \rightarrow \quad R_{al} = \frac{Q_L}{\sqrt{\frac{C_{ab}}{M_{ap}}}}, \quad (10.20), (10.21)$$

kde  $Q_L$  je hodnota ztrát netěsností ozvučnice,  $R_{al}$  je akustický odpor netěsností ozvučnice,  $C_{ab}$  je akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici,  $M_{ap}$  je akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu.

Akustický odpor netěsností ozvučnice (*acoustic resistance modeling air-leaks in enclosure*) je (10.21):

$$R_{al} = \frac{Q_L}{\sqrt{\frac{C_{ab}}{M'_{ap}}}} = \frac{7}{\sqrt{\frac{1,0248 \cdot 10^{-7}}{90,9571}}} = 208543,5606 \text{ N.s/m}^5, \quad (10.22)$$

kde  $R_{al}$  je akustický odpor netěsností ozvučnice,  $Q_L$  je hodnota ztrát netěsností ozvučnice,  $C_{ab}$  je akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici,  $M'_{ap}$  je korigovaná hmotnost vzduchu v bassreflexu.

Pro výpočet  $R_{al}$  byla zvolena korigovaná hmotnost vzduchu v bassreflexu, přestože vztah (10.21) v [38] korekci neuvažuje. V [38] je volen jednodušší přístup k modelování vlivu bassreflexu na kvality ozvučnice, reprezentované  $R_{al}$ .

**Pro  $Q_L = 15$  je  $V_b = 13,77 \text{ l} = 0,01377 \text{ m}^3$  (9.9),  $f_b = 48,4 \text{ Hz}$  (9.10).**

Akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici je [45]:

$$C_{ab} = \frac{V_b}{\rho_0 \cdot c^2} = \frac{0,01377}{1,18 \cdot 344^2} = 86,13 \cdot 10^{-9} \text{ m}^5 / \text{N}, \quad (10.23)$$

kde  $C_{ab}$  je akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici,  $V_b$  je objem ozvučnice,  $\rho_0$  hustota vzduchu,  $c$  rychlost šíření zvuku.

Úhlová rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice je:

$$\omega_b = 2\pi \cdot f_b = 2\pi \cdot 48,4 = 304,11 \text{ rad/s}, \quad (10.24)$$

kde  $\omega_b$  je úhlová rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice,  $f_b$  je rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice.

Akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu (*acoustic mass of port including air load*) je [45]:

$$M_{ap} = \frac{1}{\omega_b^2 \cdot C_{ab}} = \frac{1}{304,11^2 \cdot 0,8613 \cdot 10^{-7}} = 125,5406 \text{ kg/m}^4, \quad (10.25)$$

kde  $M_{ap}$  je akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu,  $\omega_b$  je úhlová rezonanční frekvence bassreflexové ozvučnice,  $C_{ab}$  je akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici.

Akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu s korekcí o akustickou impedanci zatěžující bassreflex je [45]:

$$M'_{ap} = M_{ap} - M_{a1p} = 125,5406 - 9,1093 = 116,4313 \text{ kg/m}^4, \quad (10.26)$$

kde  $M'_{ap}$  je korigovaná hmotnost vzduchu v bassreflexu,  $M_{ap}$  je akustická hmotnost vzduchu v bassreflexu,  $M_{a1p}$  reprezentuje vliv akustické impedance zatěžující bassreflex.

Akustický odpor netěsností ozvučnice  $R_{al}$  (10.21):

$$R_{al} = \frac{Q_L}{\sqrt{\frac{C_{ab}}{M'_{ap}}}} = \frac{15}{\sqrt{\frac{0,8613 \cdot 10^{-7}}{116,4313}}} = 551504,3074 \text{ N.s/m}^5 \quad (10.27)$$

kde  $R_{al}$  je akustický odpor netěsností ozvučnice,  $Q_L$  je hodnota ztrát netěsností ozvučnice,  $C_{ab}$  je akustická poddajnost objemu vzduchu v ozvučnici,  $M'_{ap}$  je korigovaná hmotnost vzduchu v bassreflexu.

Pro simulaci použijeme vypočtené hodnoty prvků akustického náhradního obvodu, budeme uvažovat korigované zapojení indukčnosti kmitací cívky.

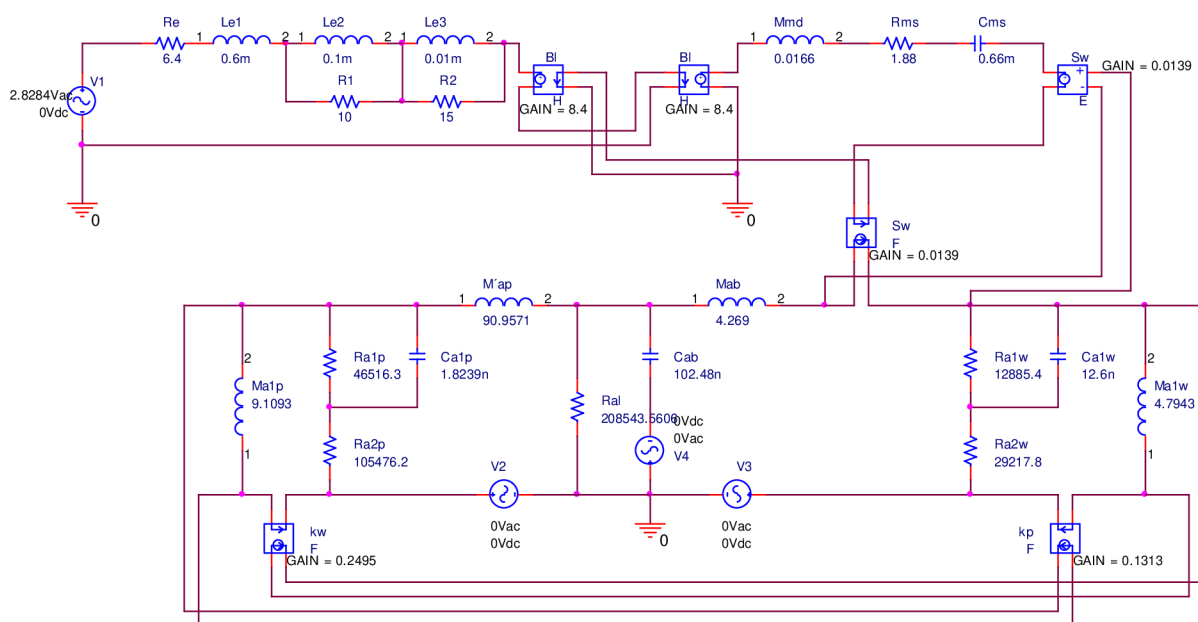
Simulace jsou platné pouze pro nízké kmitočty, na vyšších kmitočtech se projevují rezonance membrány, jejichž vliv nelze modelovat a také zvyšující se směrovost měniče.

Při výpočtu objemu ozvučnice, návrhu parametrů ladění bassreflexového nátrubku a výpočtu prvků náhradního akustického obvodu je uvažována hodnota ztrát netěsností  $Q_L$ . Tato hodnota je ale předem neznámá a závisí na provedení ozvučnice a jejích mechanických kvalitách. Simulované průběhy odpovídají dvěma nejčastěji užívaným hodnotám ztrát

netěsností  $Q_L$ , jež musí být po realizaci změřeny a ozvučnice upravena tak, aby se hodnota  $Q_L$  přiblížila jedné z použitých hodnot a tím výsledkům simulací. Běžně používanou hodnotou je  $Q_L = 7$ . Uvažujeme-li ozvučnici vyrobenou jako jeden kus, lze předpokládat lepší hodnotu  $Q_L = 15$ .

### 10.3 Simulace průběhu SPL frekvenční charakteristiky měniče v bassreflexové ozvučnici s $Q_L = 7$

Náhradní akustický obvod měniče s prvky vypočtenými pro  $Q_L = 7$  je na Obr. 24:



Obr. 24 Zapojení náhradního akustického obvodu měniče v bassreflexové ozvučnici s  $Q_L = 7$

Výstupní akustický tlak  $p$  v ose a ve vzdálenosti  $r$  je vypočítán podle vztahu [45]:

$$|p_r(f)| = \frac{\rho_0 \cdot f}{r} |U|, \quad (10.28)$$

kde  $p_r$  je akustický tlak [Pa],  $r$  je vzdálenost, ve které počítáme hodnotu  $p_r$ ,  $\rho_0$  hustota vzduchu,  $f$  kmitočet,  $U$  objemová rychlost (*volume velocity*).

Hodnota elektroakustické proměnné  $U$  je v náhradním obvodu reprezentována proudem, protékajícím napěťovými zdroji  $V_2$ ,  $V_3$  a  $V_4$ . Hodnota  $I(V_2)$  odpovídá objemové rychlosti  $U_P$  bassreflexového nátrubku, hodnota  $I(V_3)$  odpovídá objemové rychlosti  $U_W$  měniče a hodnota  $I(V_4)$  odpovídá celkové objemové rychlosti  $U_B$  měniče spolu s bassreflexovým nátrubkem.



Průběh  $SPL$  charakteristiky v dB je vypočten a zobrazen podle vztahu [45]:

$$SPL_r(f) = 20 \log \frac{|p_r(f)|}{p_0}, \quad (10.29)$$

kde  $SPL_r$  je hladina akustického tlaku ve vzdálenosti  $r$ ,  $p_r$  je akustický tlak,  $p_0$  je referenční prahová hodnota akustického tlaku  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .

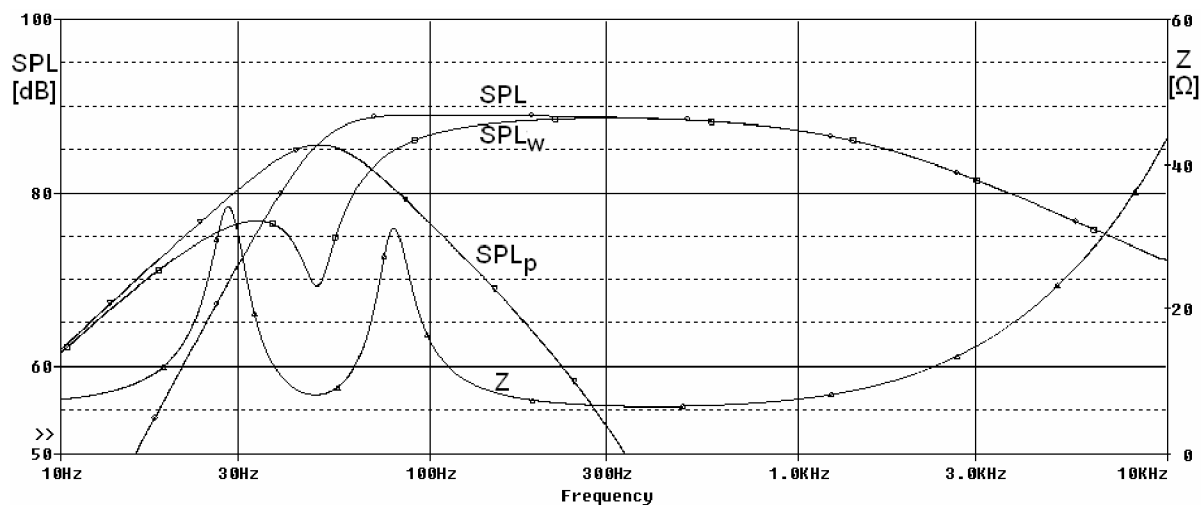
Zobrazené charakteristiky jsou vypočítané pro vzdálenost  $r = 1 \text{ m}$ , jak je obvyklé, vstupní svorky měniče jsou buzeny napětím  $U_{IN} = 2,8284 \text{ V}$ . Tato hodnota napětí se užívá pro dodání výkonu  $1 \text{ W}$  do měniče s nominální impedancí  $Z_{NOM} = 8 \Omega$ . Tyto parametry vychází z definice citlivosti měniče, která odpovídá výstupnímu akustickému tlaku měniče v dB ve vzdálenosti  $1 \text{ m}$  při buzení výkonem  $1 \text{ W}$ .

Hladiny akustického tlaku  $SPL$  jsou po dosažení vzdálenosti  $r = 1 \text{ m}$ ,  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  a odpovídajících  $U \approx I(V)$  vypočteny a zobrazeny podle vztahu:

$$SPL(f) = 20 \log \frac{\rho_0 \cdot f \cdot |U|}{p_0} = 20 \log \frac{1,18 \cdot f \cdot |I(V)|}{20 \cdot 10^{-6}} = 20 \log(59000 \cdot f \cdot |I(V)|), \quad (10.30)$$

kde  $SPL(f)$  je kmitočtová charakteristika hladiny akustického tlaku ve vzdálenosti  $r = 1 \text{ m}$ ,  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$  je referenční prahová hodnota akustického tlaku,  $f$  je kmitočet,  $U$  objemová rychlost,  $I(V)$  proud protékající zdrojem, reprezentující dané  $U$ .

Průběhy simulovaných  $SPL$  charakteristik měniče v bassreflexové ozvučnici, bassreflexového nátrubku, výsledná  $SPL$  kmitočtová charakteristika a průběh impedance měniče s náhradním obvodem dle Obr. 24 jsou na Obr. 25:



Obr. 25 Průběh simulované  $SPL$  charakteristiky a impedance měniče v bassreflexové ozvučnici s  $Q_L = 7$

Na Obr. 25 reprezentuje průběh označený  $SPL$  celkovou kmitočtovou charakteristikou měniče v bassreflexové ozvučnici,  $SPL_W$  průběh charakteristiky měniče,  $SPL_P$  průběh charakteristiky bassreflexového nátrubku a  $Z$  impedanční charakteristiku měniče v bassreflexové ozvučnici.

Měniče osazené v ozvučnici mohou být na nízkých kmitočtech přibližně modelovány filtračním obvodem typu horní propust [27]. Měnič v uzavřené ozvučnici se přibližně chová jako obvod druhého řádu se strmostí 12 dB/oktávu, měnič v bassreflexové ozvučnici se přibližně chová jako obvod čtvrtého řádu se strmostí 24 dB/oktávu, jak je patrné z Obr. 25.

#### Důležité hodnoty $SPL$ odečtené z průběhu na Obr. 25 jsou:

pro  $f = 300$  Hz je  $SPL = 88,7$  dB, což přibližně odpovídá průměrné citlivosti 88,6 dB [3];

maximum  $SPL = 89$  dB nastává na kmitočtu 99,3 Hz;

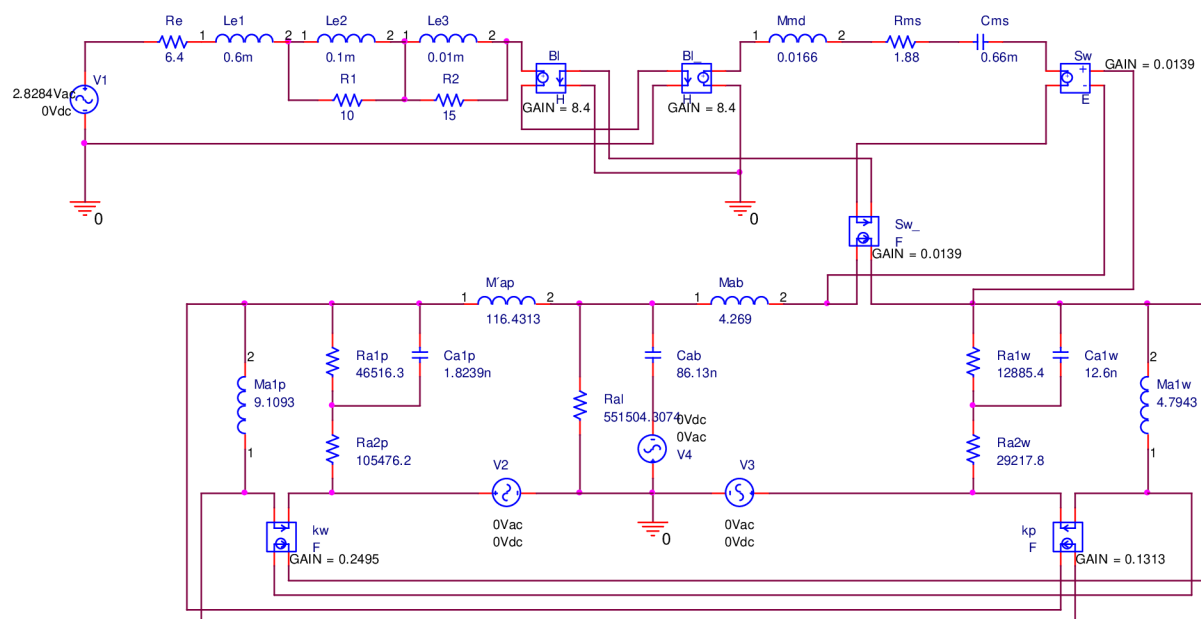
pokles  $SPL$  o 3 dB od maximální hodnoty pozorujeme na kmitočtu 51,2 Hz, což odpovídá  $f_3 = 51,3$  Hz, vypočtené podle (9.3);

$SPL_{20Hz} = 57,9$  dB,  $SPL_{40Hz} = 80,4$  dB, rozdíl  $SPL_{40Hz} - SPL_{20Hz} = 81,4 - 57,9 = 23,5$  dB, což se blíží strmosti 24 dB obvodu čtvrtého řádu;

maximum  $SPL$  charakteristiky bassreflexového nátrubku  $SPL_p$  nastává při kmitočtu 49,5 Hz a blíží se hodnotě  $f_b = 49,7$  Hz vypočtené podle (9.2).

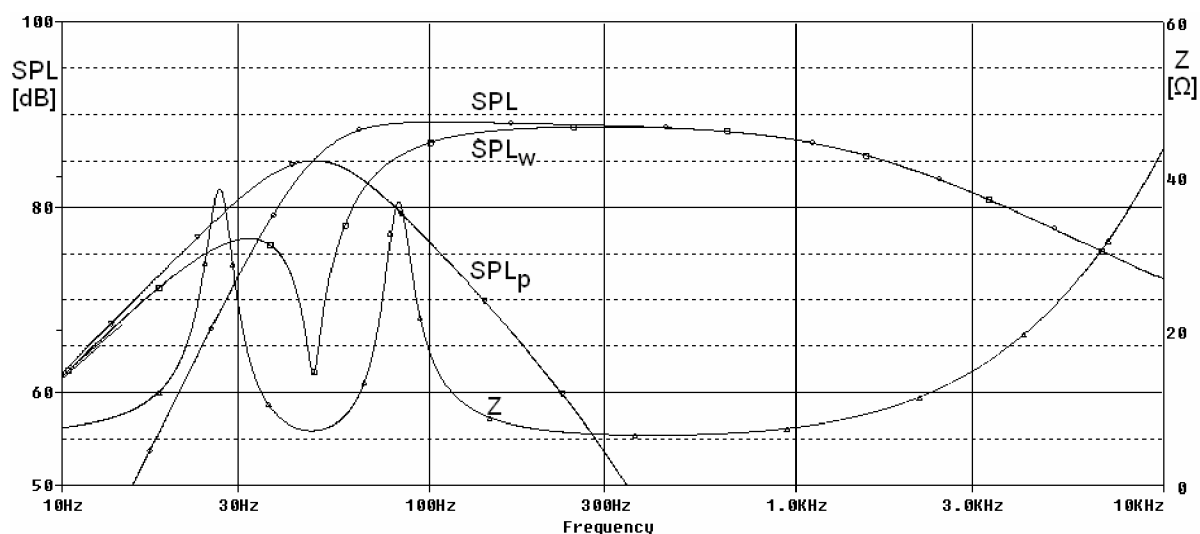
## 10.4 Simulace průběhu $SPL$ frekvenční charakteristiky měniče v bassreflexové ozvučnici s $Q_L = 15$

Schéma náhradního akustického obvodu s hodnotami prvků vypočtenými pro  $Q_L = 15$  je na Obr. 26:



Obr. 26 Zapojení náhradního akustického obvodu měniče v bassreflexové ozvučnici s  $Q_L = 15$

Průběhy simulovaných  $SPL$  charakteristik měniče v bassreflexové ozvučnici, bassreflexového nátrubku, výsledná  $SPL$  kmitočtová charakteristika a průběh impedance měniče s náhradním obvodem dle Obr. 26 jsou na Obr. 27:



Obr. 27 Průběh simulované  $SPL$  charakteristiky a impedance měniče v bassreflexové ozvučnici s  $Q_L = 15$

Na Obr. 27 reprezentuje průběh označený  $SPL$  celkovou kmitočtovou charakteristiku měniče v bassreflexové ozvučnici,  $SPL_W$  průběh charakteristiky měniče,  $SPL_p$  průběh charakteristiky bassreflexového nátrubku a  $Z$  impedance charakteristiku měniče v bassreflexové ozvučnici.

#### Důležité hodnoty $SPL$ odečtené z průběhu na Obr. 27 jsou:

pro  $f = 300$  Hz je  $SPL = 88,8$  dB, což přibližně odpovídá průměrné citlivosti 88,6 dB [3];

maximum  $SPL = 89,2$  dB nastává na kmitočtu 105 Hz;

pokles  $SPL$  o 3 dB od maximální hodnoty pozorujeme na kmitočtu 52,2 Hz, což se od hodnoty vypočtené podle (9.11)  $f_3 = 48,7$  Hz liší o 3,5 Hz.

$SPL_{20Hz} = 58,8$  dB,  $SPL_{40Hz} = 80,8$  dB, rozdíl  $SPL_{40Hz} - SPL_{20Hz} = 81,8 - 58,8 = 23$  dB, což se blíží strmosti 24 dB obvodu čtvrtého řádu;

maximum  $SPL$  charakteristiky bassreflexového nátrubku  $SPL_p$  nastává při kmitočtu  $f_b = 48,4$  Hz a je shodné s výpočtem podle (9.10).

#### Na $SPL$ charakteristice pozorujeme čtyři typické oblasti viz Obr. 25 a Obr. 27.

Na nízkých kmitočtech – pod rezonančním kmitočtem měniče je  $SPL$  charakteristika závislá na kmitající hmotnosti a mechanické poddajnosti, strmost  $SPL$  charakteristiky je v uzavřené ozvučnici 12 dB/oktávu, v bassreflexové ozvučnici 24 dB/oktávu [27].

V kmitočtové oblasti rezonance měniče dochází k přechodu, jehož tvar je dán činitelem jakosti. Následuje teoreticky plochá oblast  $SPL$  charakteristiky, která vymezuje kmitočtovou oblast použitelnosti měniče.

Na vyšších kmitočtech  $SPL$  charakteristika klesá teoreticky se strmostí 6 dB/oktávu, prakticky však obvykle mnohem vyšší. Pokles charakteristiky je teoreticky dán rostoucí impedancí indukčnosti cívky. Kmitočtová nelinearita indukčnosti a směrovost měniče na vyšších kmitočtech typicky způsobuje méně strmý (téměř nulový) pokles  $SPL$  až do určitých kmitočtů, kdy se objevují obvykle ostré špičky a propady  $SPL$  (způsobené rezonancemi membrány a *dome's brake up*) a dále strmý pokles, který končí přenášené pásmo kmitočtů.

Srovnáním simulovaných průběhů *SPL* charakteristik na Obr. 25 a Obr. 27 s průběhem z katalogového listu měniče na Obr. 18, vidíme, že skutečný průběh charakteristiky na vyšších kmitočtech je odlišný od simulovaného, což potvrzuje platnost náhradního akustického obvodu pouze pro nižší kmitočty. Náhradní akustický obvod simuluje celkový akustický výstup měniče do prostoru a nereflktuje směrové vlastnosti měniče. Měnič na vyšších kmitočtech soustřeďuje vyzařovaný akustický tlak před sebe, kde je tedy jeho hladina vyšší, než by tomu bylo, kdyby byl vyzářen nesměrově. Skutečné změřené *SPL* kmitočtové charakteristiky v ose měniče proto obvykle prezentují širší použitelné kmitočtové pásmo.

Zvolený měnič vyniká neobvykle vyrovnanou a plochou *SPL* bez ostrých anomálií. Jako horní mezní kmitočet lze uvažovat 3 kHz, ve speciálních případech, zejména v případě že poslechová osa bude svírat úhel  $30^\circ$  s osou měniče, i vyšší.

## 11 Návrh mechanického řešení ozvučnice

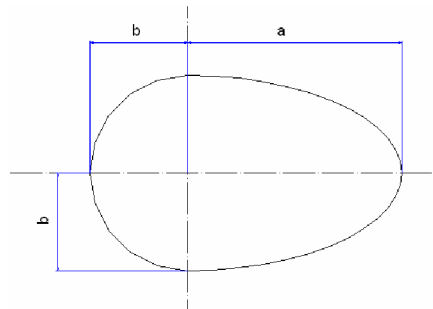
Výchozím parametrem pro návrh mechanického řešení ozvučnice je objem. Požadovaný objem ozvučnice pro daný měnič závisí na typu použité aproximace a hodnotě ztrát netěsností  $Q_L$ . Ozvučnice bude navržena tak, aby její objem byl pokud možno větší než největší z hodnot  $V_b = 15,3$  litrů, doporučený výrobcem [3].

Nutnost volit hodnotu ztrát ozvučnice  $Q_L$  je velkou nevýhodou řešení. Hodnota  $Q_L$  nelze dopředu odhadnout. V profesionální praxi je tento nedostatek zpravidla řešen stavbou mnoha prototypů. Při stavbě jediného (nebo málo) páru reproduktorů může být řešením výroba ozvučnice většího objemu (přibližně o 25 %). Po změření hodnoty  $Q_L$  následuje postupné vyplnění objemu ozvučnice vhodným materiálem, dokud se hodnota  $Q_L$  neblíží hodnotě, pro níž byla aproximace provedena, nebo dokud nebude výstupní *SPL* charakteristika na dolním okraji přenášeného kmitočtového pásma přijatelná pro zamýšlený účel použití navrhované reprosoustavy.

Tvar ozvučnice významně ovlivňuje celkovou kvalitu zvuku reprosoustavy. I při použití nejkvalitnějších měničů s absolutně plochou frekvenční *SPL* charakteristikou, celková *SPL* charakteristika reprosoustavy obvykle obsahuje špičky a propady, způsobené především stojatým vlněním uvnitř ozvučnice, které rozkmitává stěny a je jimi vyzařováno do okolí, kde interferuje se zvukem vyzařovaným měniči. Dalším významným negativním vlivem ozvučnice jsou difrakce, které deformují především na vyšších kmitočtech směrovou charakteristiku reprosoustavy.

## 11.1 Půdorys dutiny ozvučnice

Základní půdorys dutiny ozvučnice vychází z kruhu a elipsy, dle Obr. 28:



Obr. 28 Základní tvar půdorysu ozvučnice

Tento tvar byl zvolen z následujících důvodů:

- Vyšší tuhost stěn v porovnání s plochými deskami.
- Vlastní rezonanční kmitočty stěn ozvučnice výše než u běžných stěn obvyklých pravouhlých tvarů, kde první rezonanční kmitočet je dán polovinou vlnové délky odpovídající rozměru stěny [48]:

$$f_{1.rez} = \frac{c}{\lambda_{1.rez}} = \frac{c}{0,5 \cdot l}, \quad (11.1)$$

kde  $f_{1.rez}$  je kmitočet první rezonance ploché desky ozvučnice,  $c$  rychlost šíření zvuku ve vzduchu,  $\lambda_{1.rez}$  vlnová délka kmitočtu první rezonance ploché desky ozvučnice,  $l$  delší rozměr stěny ozvučnice.

Malá plocha přední stěny ozvučnice v porovnání se zadní stěnou. Pokud dojde k rozkmitání stěn ozvučnice, větší část parazitního zvuku je vyzářována zadní částí ozvučnice, tedy mimo obvyklou osu poslechu.

Povrch válcové plochy s půlkruhovou podstavou:

$$S_K = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot b \cdot v_V, \quad (11.2)$$

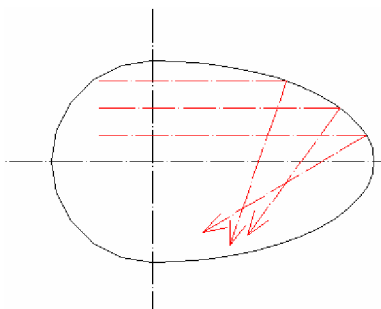
kde  $S_K$  je povrch válcové plochy s půlkruhovou podstavou,  $b$  poloměr kružnice viz Obr. 28,  $v_V$  výška válce.

Povrch válcové plochy s půleliptickou podstavou:

$$S_E = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \left[ \frac{3}{2} \cdot (a+b) - \sqrt{a \cdot b} \right] \cdot v_V, \quad (11.3)$$

kde  $S_E$  je povrch válcové plochy s půlkruhovou podstavou,  $a$  délka hlavní poloosy elipsy,  $b$  délka vedlejší poloosy elipsy viz Obr. 28,  $v_V$  výška válce.

Absence paralelních ploch, od nichž je zvuková vlna po dopadu odrážena do stejného směru, a mezi nimiž vzniká stojaté vlnění. Situace odrazů od zakřivených stěn je znázorněna na Obr. 29:



Obr. 29 Odrazy zvukových vln od zakřivených stěn ozvučnice

Tato vlastnost je platná zejména pro vyšší kmitočty, kdy vlnová délka je vyšší než poloměry křivostí stěn. Pro dlouhé vlnové délky se zakřivení neuplatní a stojaté vlnění musí být potlačeno obložím stěn akusticky pohltivým materiálem.

Rozměry hlavních os vychází z takzvaného „*Golden Ratio*“ pravidla, které je považováno za ideální vzhledem k minimalizaci vzniku stojatého vlnění.

Poměry os podle „*Golden Ratio*“ jsou [49]:

$$s : h : v = 1 : 1,6 : 2,6, \quad (11.4)$$

kde  $s$  je šířka,  $h$  je hloubka,  $v$  je výška.

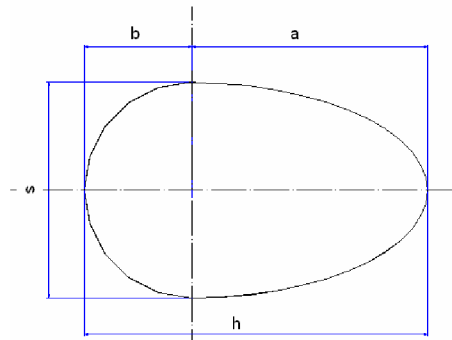
## 11.2 Objemový tvar ozvučnice

Výška ozvučnice je volena tak, aby bylo při daném základním půdorysu dutiny dosaženo požadovaného objemu. Ve výšce je zohledněno „*Golden Ratio*“ pravidlo.

Přední stěna je odkloněna od zadní stěny pro nerovnoběžnost stěn a s ní související odrazové vlastnosti. Pokud nebudou přední stěna, ve které je osazen měnič, a zadní stěna vzájemně rovnoběžné, zvuková vlna vyzářená zadní stěnou membrány měniče nebude dopadat na zadní stěnu ozvučnice kolmo a bude odražena jiným směrem než zpět na zadní stěnu membrány. Odkloněním přední stěny ozvučnice je zároveň zvětšen objem dutiny a sklonem je předpřipravena kompenzace časového rozdílu mezi zvukem vyzářovaným basovým a výškovým měničem.

Objem byl přibližně počítán v mnoha krocích, kdy byly zohledněny rozměry měničů, „*Golden Ratio*“ pravidlo a odklonění přední stěny ozvučnice.

Značení poloos podstavy a poměrů podle „*Golden Ratio*“ pravidla je znázorněno na Obr. 30:



Obr. 30 Osy podstavy ozvučnice

Na Obr. 30 je znázorněno značení os  $a$  a  $b$  podstavy ozvučnice s vyznačením odpovídajících poměrů  $s$  a  $h$  podle „*Golden Ratio*“ pravidla.

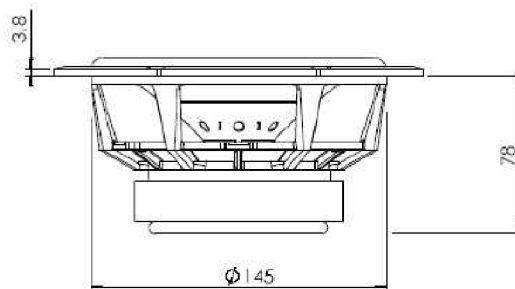
Hlavní poloosa elipsy  $a$  a zároveň poloměr kružnice  $b$  odpovídá polovině šířky  $s$  podle „*Golden Ratio*“ pravidla:

$$s = 2b. \quad (11.5)$$

Součet poloměru kružnice  $b$  a hlavní poloosy elipsy  $a$  odpovídá hloubce  $h$  podle „*Golden Ratio*“ pravidla:

$$h = b + a. \quad (11.6)$$

Minimální potřebný průměr, který umožňuje montáž vybraného basového měniče, vyplývá z technické dokumentace měniče, viz Obr. 31 [3]:



Obr. 31 Bokorys měniče HDS Nomex 6½ [3]

Průměr koše měniče podle Obr. 31 je  $\varnothing = 145$  mm. Pro lepší proudění vzduchu je zvolen poloměr kružnice a vedlejší poloosa elipsy  $b = 0,75$  dm.

Ze vztahů pro poměry os podle „*Golden Ratio*“ (11.4) a jejich vztahům k poloosám elipsy a poloměru kružnice podle vztahů (11.5) a (11.6) vyplývá:

$$a = h - b = s \cdot 1,6 - b = 1,5 \text{ dm} \cdot 1,6 - 0,75 \text{ mm} = 1,65 \text{ dm}, \quad (11.7)$$

kde  $a$  je hlavní poloosa elipsy,  $h$  je hloubka a  $s$  je šířka podle „*Golden Ratio*“,  $b = 0,75 \text{ dm}$  poloměr kružnice a vedlejší poloosa elipsy.

Výšku  $v$  válcových částí ozvučnice vypočteme podle (11.4) a (11.5):

$$v_v = s \cdot 2,6 = 2b \cdot 2,6 = 1,5 \text{ dm} \cdot 2,6 = 3,9 \text{ dm}, \quad (11.8)$$

kde  $v_v$  je výška válcových částí ozvučnice,  $s$  šířka podle „*Golden Ratio*“.

### Objem válcových částí dutiny ozvučnice

Objem poloviny válce s kruhovou podstavou a danými rozměry je:

$$V_{pK} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot b^2 \cdot v_v = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 0,75^2 \cdot 3,9 = 3,4459 \text{ litrů}, \quad (11.9)$$

objem poloviny válce s eliptickou podstavou a danými rozměry je:

$$V_{pE} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot v_v = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 1,65 \cdot 0,75 \cdot 3,9 = 7,5811 \text{ litrů}, \quad (11.10)$$

kde  $V_{pK}$  je objem poloviny válce s kruhovou podstavou,  $b$  je poloměr kružnice a vedlejší poloosa elipsy,  $v_v$  je výška válce,  $V_{pE}$  je objem poloviny válce s eliptickou podstavou,  $a$  je poloměr hlavní poloosy elipsy.

Objem obou půlválců je:

$$V_V = V_{pK} + V_{pE} = 3,4459 + 7,5811 = 11,0270 \text{ litrů}, \quad (11.11)$$

kde  $V_V$  je objem obou půlválců,  $V_{pK}$  je objem poloviny válce s kruhovou podstavou,  $V_{pE}$  je objem poloviny válce s eliptickou podstavou.

### Zakončení válcových částí dutiny ozvučnice vrchlíky

Pro minimalizaci difrakcí je horní část ozvučnice zakončena kulovým vrchlíkem v části nad válcem s kruhovou podstavou a eliptickým vrchlíkem v části nad válcem s eliptickou podstavou. Kulový tvar ozvučnice je nejvhodnějším tvarem pro omezení difrakcí [50].



Ozvučnice bude zakončena přibližně stejnými vrchlíky v horní i dolní části. Každý z těchto dvou vrchlíků se skládá z jedné čtvrtiny koule a jedné čtvrtiny rotačního elipsoidu.

Objem dvou čtvrtin koule, tedy jedné poloviny je:

$$V_{pK} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot b^3 = \frac{4}{6} \cdot \pi \cdot 0,75^3 = 0,8836 \text{ litrů}, \quad (11.12)$$

kde  $V_{pK}$  je objem poloviny koule,  $b$  je poloměr kružnice (koule).

Objem dvou čtvrtin rotačního elipsoidu, tedy jedné poloviny je:

$$V_{pE} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a \cdot b^2 = \frac{4}{6} \cdot \pi \cdot 1,65 \cdot 0,75^2 = 1,9439 \text{ litrů}, \quad (11.13)$$

kde  $V_{pE}$  je objem poloviny rotačního elipsoidu,  $a$  je hlavní poloosa rotačního elipsoidu,  $b$  je vedlejší poloosa rotačního elipsoidu.

Přibližný objem součtu obou vrchlíků (11.12) a (11.13) je:

$$V_{vrch} = V_{pK} + V_{pE} = 0,8836 + 1,9439 = 2,8275 \text{ litrů}, \quad (11.14)$$

kde  $V_{vrch}$  je přibližný objem součtu obou vrchlíků,  $V_{pK}$  je objem poloviny koule,  $V_{pE}$  je objem poloviny rotačního elipsoidu.

Hodnota  $V_{vrch}$  není přesná, protože nepočítá se zmenšením kulové části horního vrchlíku vlivem odklonění přední stěny a zvětšením objemu dolního vrchlíku o klín vložený při odklonění, viz dále.

Objem obou válcových částí (11.11) a obou vrchlíků (11.14) je:

$$V_{v+v} = V_V + V_{vrch} = 11,0270 + 2,8275 = 13,8545 \text{ litrů}, \quad (11.15)$$

kde  $V_{v+v}$  je objem válcových částí a vrchlíků,  $V_V$  je objem obou půlválců,  $V_{vrch}$  je přibližný objem součtu obou vrchlíků.

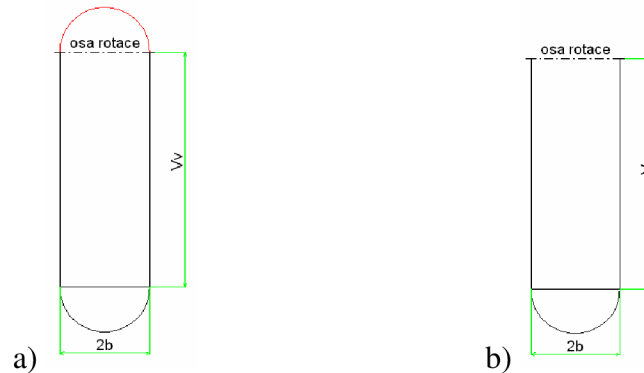
Tato hodnota  $V_{v+v} = 13,8545$  litrů (11.15) již přesahuje objem potřebný pro ozvučnici s  $Q_L = 15$ , která je  $V_b = 13,77$  litrů (9.9). Jak již bylo uvedeno, hodnota  $Q_L$  není dopředu známá a je třeba objem ozvučnice dále zvýšit, minimálně na hodnotu  $V_b = 15,3$  litrů, doporučenou výrobcem [3].

### **Odklonění přední stěny a vložení klínu mezi obě válcové části**

Plochy, kterými se vzájemně dotýkají válcové části dutiny s kruhovou podstavou a eliptickou podstavou jsou obdélníkového tvaru, rozměrů  $2b = 1,5$  dm a  $v_v = 3,9$  dm. Pokud navíc budeme uvažovat i oba vrchlíky, plocha bude obdélníková s polovinami kružnic po

obou kratších stranách. Přední válec s půlkruhovou podstavou bude od zadního válce s půleliptickou podstavou odkloněn podle osy, procházející horní hranou délky  $2b$ , oddělující od sebe oba válce. Tvar dutiny po odklonění obou válcových částí se tedy bude směrem dolů rozšiřovat, vzniklý prostor mezi odkloněnými půlválci a vrchlíky bude vyplněn klínem.

Tvar plochy klínu, vloženého mezi odkloněné části je na Obr. 32 a):



Obr. 32 a) Plocha klínu vloženého mezi odkloněné části; b) Plocha přičítaného klínu

Na Obr. 32 a) vidíme plochu obdélníku a půlkruhových částí klínu, vloženého mezi obě odkloněné části. Horní kruhová část je kreslena jinou barvou, protože po odklonění ploch je objem horního kulového vrchlíku zmenšen o objem odpovídající dané kruhové ploše a odklonění.

Objem bude vypočten přibližně, odčítaný objem horní kruhové části je malý, a proto je zanedbán, viz Obr. 32 b).

Plocha obdélníku, kterým se dotýkají obě válcové části:

$$S_o = 2b \cdot v_v = 1,5 \cdot 3,9 = 5,85 \text{ dm}^2, \quad (11.16)$$

Plocha jedné půlkruhové části:

$$S_p = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot b^2 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 0,75^2 = 0,88 \text{ dm}^2, \quad (11.17)$$

kde  $S_o$  je obsah obdélníku,  $b$  poloměr kružnice podstavy a vedlejší poloosa elipsy podstavy,  $v_v$  je výška válcových částí,  $S_p$  je obsah jedné půlkružnice.

Plocha vloženého klínu je:

$$S_K = S_o + S_p = 5,85 + 0,88 = 6,73 \text{ dm}^2, \quad (11.18)$$

kde  $S_K$  je plocha vloženého klínu,  $S_o$  je obsah obdélníku,  $S_p$  je obsah jedné půlkružnice.

Objem klínu, vloženého mezi obě válcové části, musí mít hodnotu nejméně:

$$V_{Kmin} = V_b - V_{v+v} = 15,3 - 13,8545 = 1,4455 \approx 1,5 \text{ litrů,} \quad (11.19)$$

kde  $V_{Kmin}$  je minimální požadovaný objem vloženého klínu,  $V_b$  objem ozvučnice doporučený výrobcem [3],  $V_{v+v}$  objem válcových částí a vrchlíků.

Pokud bychom místo o klínu uvažovali o kvádru s podstavou plochy  $S_K = 6,73 \text{ dm}^2$  a objemu  $V_{Kmin} = 1,5$  litrů, bude jeho výška:

$$v_{kv} = \frac{V_{Kmin}}{S_K} = \frac{1,5}{6,73} = 0,223 \text{ dm,} \quad (11.20)$$

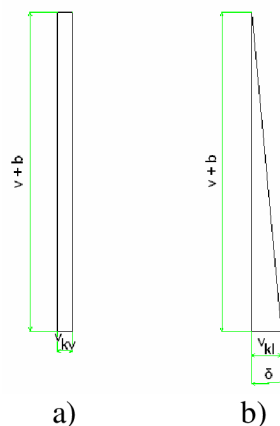
kde  $v_{kv}$  je výška kvádru daného objemu,  $V_{Kmin}$  je minimální požadovaný objem vloženého klínu,  $S_K$  je plocha vloženého klínu.

Nebudeme vkládat kvádr, ale klín, proto pro zachování stejného objemu při stejné ploše musíme jeho výšku zdvojnásobit na hodnotu:

$$v_{kl} = 2 \cdot v_{kv} = 2 \cdot 0,223 = 0,446 \text{ dm,} \quad (11.21)$$

kde  $v_{kl}$  je výška klínu,  $v_{kv}$  je výška kvádru daného objemu.

Uvažovaný kvádr a klín stejného objemu jsou na Obr. 33:



Obr. 33 a) Kvádr uvažovaného objemu; b) Klín uvažovaného objemu

Na Obr. 33 a) je znázorněn kvádr o stejném objemu  $V_{Kmin} = 1,5$  litrů jako má klín vložený mezi válcové části dutiny ozvučnice na Obr. 33 b), avšak s rozdílnou výškou.

Úhel  $\delta$  je možné spočítat pomocí goniometrické funkce *tangens*:

$$\delta = \arctg \frac{v_{kl}}{(v_v + b)} = \arctg \frac{0,446}{(3,9 + 0,75)} = 5,47^\circ, \quad (11.22)$$

kde  $\delta$  je úhel odklonu přední části ozvučnice od zadní,  $v_{kl}$  je výška klínu,  $v_v$  je výška válcové části,  $b$  je poloměr kružnice.

Objem klínu je vypočítán jen přibližně, ve skutečnosti má vložený objem boční tvar kruhové výseče. Tento rozdíl můžeme zanedbat, ozvučnice bude odkloněna o úhel  $\delta = 6^\circ$  a její objem bude kontrolován při tvorbě trojrozměrného modelu ve 3D vývojovém prostředí.

## 12 Model ozvučnice

Po stanovení tvaru a rozměrů vnitřní dutiny ozvučnice a výpočtu jejího objemu je třeba vytvořit vhodný 3D model ozvučnice – její skutečnou a realizovatelnou podobu.

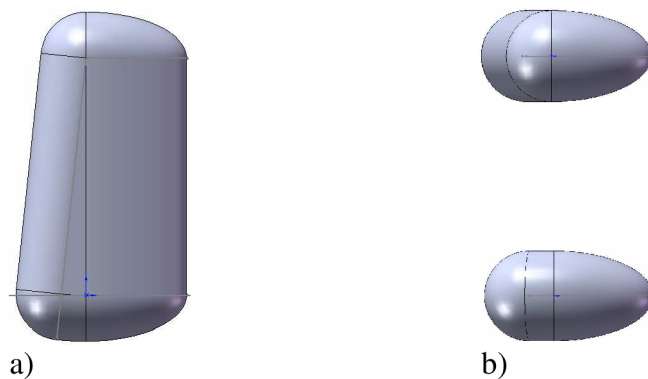
Je třeba vhodně vyřešit umístění obou měničů a bassreflexu a navrhnout mechanickou podobu ozvučnice s dutinou daného tvaru a objemu. Ozvučnice musí být navržena s ohledem na minimalizování negativních jevů, které degradují zvukovou kvalitu reprosoustavy.

Návrh také musí respektovat zvolený materiál a danou technologii výroby, tedy umělý kámen a jeho odlévání.

### 12.1 Vytvoření 3D modelu ozvučnice

Model je vytvořen v prostředí SolidWorks, které umožňuje výstup dat ve formátech určených pro programování CNC obráběcích strojů.

Prvním krokem tvorby modelu bylo vytvoření tělesa tvořícího dutinu ozvučnice, skládající se z dvou půlválcových částí, dvou vrchlíků a klínu, s rozměry vypočtenými výše:

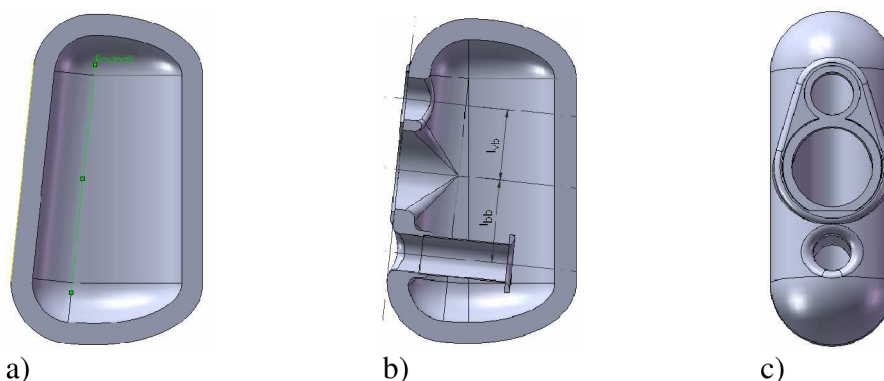


Obr. 34 a) Boční pohled tělesa dutiny ozvučnice

b) Horní a dolní pohled tělesa dutiny ozvučnice

Model tělesa dutiny ozvučnice je na Obr. 34. Objem modelu dutiny je  $V_{md} = 15,41$  litrů. Požadovaný objem  $V_b = 15,3$  litrů je tedy překonán o 0,11 litru. To je dáno zvoleným větším úhlem vloženého klínu  $\delta = 6^\circ$ .

Dále byla z modelu dutiny ozvučnice vytvořena vnější skořepina tloušťky  $t = 4$  cm a bylo vytvořeno osazení pro oba měniče a pro osazení bassreflexového nátrubku zevnitř:



Obr. 35 a) Skořepina ozvučnice      b) Otvory v ozvučnici      c) Osazení pro měniče

Na Obr. 35 a) je zobrazen boční pohled skořepiny ozvučnice v řezu, tedy základní těleso ozvučnice. Na Obr. 35 b) jsou znázorněny otvory v ozvučnici pro výškový a basový měnič a osazení bassreflexového nátrubku. Na Obr. 35 c) je vnější přední pohled ozvučnice, kde je vidět osazení měničů v rámečku na povrchu válcové stěny ozvučnice a otvor bassreflexu.

Tloušťka stěn ozvučnice  $t = 4$  cm byla volena s ohledem na možnosti odlévání z umělého kamene.

Výškový měnič je v přední stěně ozvučnice umístěn tak, aby okraj předního panelu měniče byl na hranici válcové části předního panelu a kulového vrchlíku.

Při volbě umístění basového měniče byla uvažována potřeba co nejbližšího umístění s výškovým měničem pro dosažení vyzařování měničů, podobající se co nejvíce bodovému zdroji. Osová vertikální vzdálenost obou měničů je  $l_{vb} = 136$  mm.

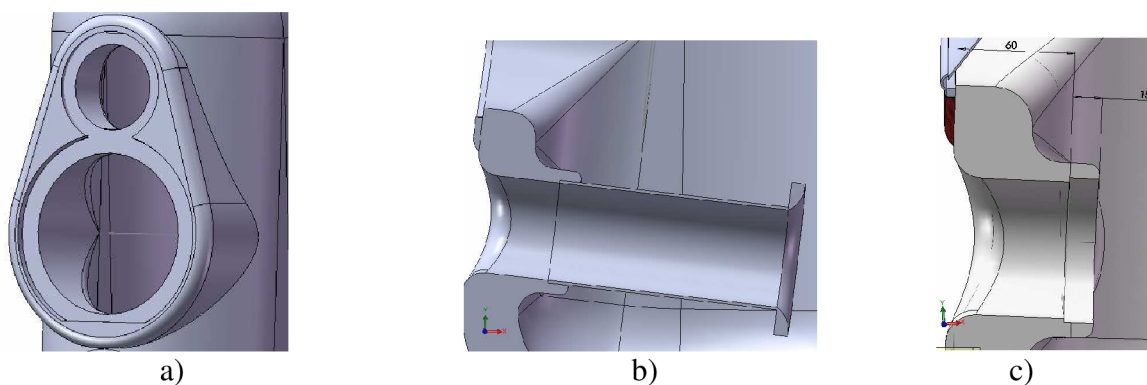
Otvor pro výškový měnič je průměru  $D_v = 80$  mm, ve výšce  $v_v = 338$  mm měřené od podstavy válce s kruhovou podstavou, otvor pro basový měnič je průměru  $D_b = 150$  mm ve výšce  $v_b = 202$  mm měřené od podstavy válce. Vnitřní hrana otvoru pro basový měnič je zaoblena pro lepší proudění vzduchu bez turbulencí, hrana otvoru pro výškový měnič je zaoblena především z technologických důvodů.

Kolem obou měničů je na povrchu válcové plochy vytvořen plochý rámeček, který umožňuje zapuštění a zarovnání předních ploch košů obou měničů do jedné roviny k omezení difrakcí od hran nezarovnaných do hladké plochy. Další funkcí rámečku je vyztužení osazení měničů silnější vrstvou materiálu, který tvoří pevnou oporu pohybu měničů a omezuje rozkmitávání ozvučnice v místě montáže měničů.

Další výhodou je rozrušení jednotnosti přední stěny ozvučnice. Rozrušením jednoty ozvučnice se posouvají případné rezonance ozvučnice na vyšší kmitočty [37] a snižuje se jejich amplituda. Mnoho rezonancí na různých kmitočtech se vzájemně vyruší a jsou pak méně zvukově obtěžující než jediná rezonance, vznikající na tvarově jednoduchých stěnách.

Proto jsou složité a nepravidelné tvary ozvučnic vhodnější než pravidelné. Hrany rámečku jsou zaobleny pro omezení vzniku difrakcí. Rámeček osazení měničů je na Obr. 36 a).

Průměr bassreflexového otvoru je  $D_{bsr} = d = 70$  mm, ve výšce  $v_{bsr} = 45$  mm. Osová vertikální vzdálenost mezi basovým měničem a bassreflexem je  $l_{bb} = 157$  mm. Otvor bassreflexového otvoru je prodloužen dovnitř ozvučnice a je uzpůsoben osazení bassreflexovým nátrubkem zevnitř. Osazení je uzpůsobeno bassreflexovému nátrubku vnitřního průměru  $D_{bsr} = d = 70$  mm doporučeného výrobcem [3], s tloušťkou stěny  $t_{bsr} = 2$  mm dodávaným [30]. Vnější i vnitřní vyústění bassreflexu jsou zaoblena (*flared port*) pro omezení turbulentního proudění vzduchu, viz Obr. 36 b).



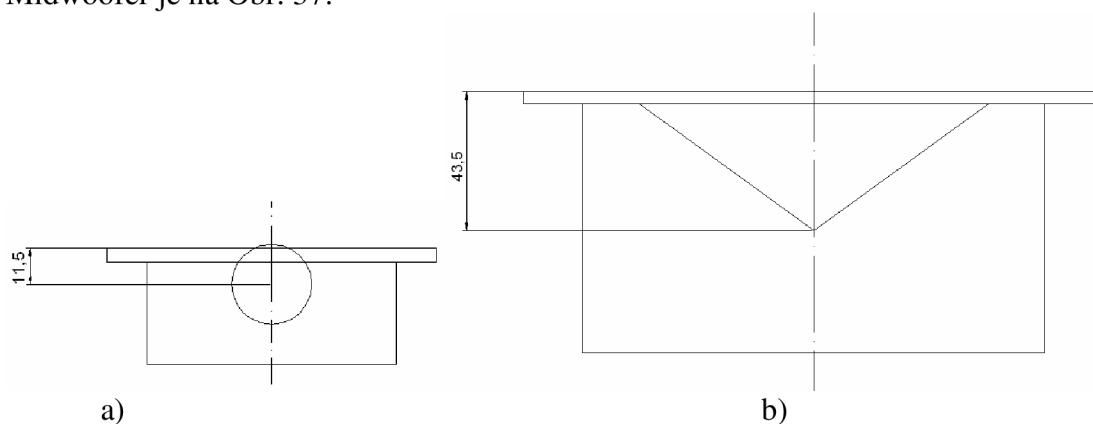
Obr. 36 a) Rámeček osazení měničů  
b) Otvor bassreflexu a osazení bassreflexového nátrubku  
c) Detail osazení bassreflexového nátrubku

Rámeček osazení měničů je na Obr. 36 a) a působí jako výztuha přední stěny ozvučnice.

Osazení bassreflexového nátrubku zevnitř je na Obr. 36 b) a c). Toto řešení umožňuje snadné naladění bassreflexu jeho zkracováním nebo prodlužováním, podle výsledků akustického měření realizované ozvučnice a reálných měničů. Na Obr. 36 c) je detail osazení bassreflexového nátrubku s kótami délky bassreflexového otvoru, které umožňují stanovení délky bassreflexového nátrubku pro dosažení požadované celkové délky bassreflexové trubice.

Za místo vzniku zvukové vlny (místo s nulovou fází) nelze považovat přední plochu koše měniče [26], [27]. U basového měniče leží bod místa vzniku zvukové vlny vzadu za membránou, přibližně v místě hypotetického vrcholu kuželu. U výškového měniče lze za místo vzniku zvukové vlny považovat střed koule tvořící kalotu. Je zřejmé, že u obou typů měničů leží bod vzniku zvukové vlny v jiné vzdálenosti od přední hrany koše. Tento rozdíl, způsobující zpoždění zvukové vlny vyzařované basovým měničem za vlnou vyzařovanou výškovým měničem se obvykle řeší skloněním přední stěny ozvučnice tak, aby basový měnič byl předsazen o odpovídající vzdálenost, nebo její stupňovitostí. Schodovitá/stupňovitá přední stěna ozvučnice ale zavádí hrany, které způsobují difrakce. Ve složitých reprosoustavách je toto zpoždění vyrovnáváno elektronicky.

Přibližné stanovení místa vzniku zvukové vlny měničů HDS 1“ Tweeter a HDS Nomex 6½ Midwoofer je na Obr. 37:



Obr. 37 a) Stanovení bodu vzniku zvukové vlny výškového měniče HDS 1“ Tweeter  
b) Stanovení bodu vzniku zvukové vlny basového měniče HDS Nomex Midwoofer

Z Obr. 37 a) vyplývá, že bod vzniku zvukové vlny výškového měniče leží 11,5 mm za přední hranou koše, z Obr. 37 b) vyplývá, že bod vzniku zvukové vlny basového měniče leží 43,5 mm za přední hranou koše měniče. Tyto vzdálenosti vycházejí z technických výkresů měničů [3].

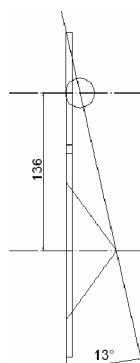
Rozdíl vzdáleností je  $z = 32$  mm, což odpovídá časovému zpoždění:

$$t_z = \frac{z}{v} = \frac{0,032}{344} = 93 \cdot 10^{-3} \text{ s}, \quad (12.1)$$

kde  $t_z$  je zpoždění zvukové vlny basového měniče za zvukovou vlnou výškového měniče,  $z$  je rozdíl vzdáleností bodů vzniku zvukové vlny,  $v$  je rychlost šíření zvuku ve vzduchu.

Tento rozdíl bude kompenzován skloněním přední stěny ozvučnice o úhel, který bude při dané vertikální vzdálenosti měničů  $l_{vb} = 136$  mm kompenzovat horizontální rozdíl vzdáleností bodů vzniku zvukové vlny  $z = 32$  mm.

Situace vertikálního umístění měničů a úhel mezi přední stěnou ozvučnice a přímkou proloženou oběma body vzniku zvukové vlny je na Obr. 38:



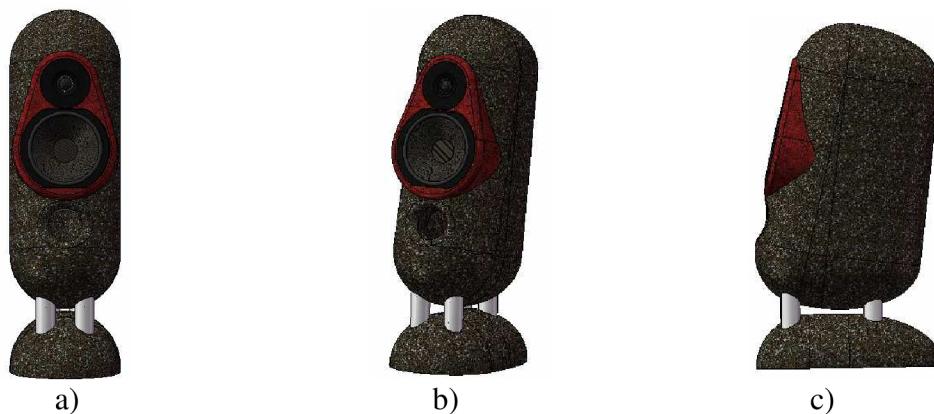
Obr. 38 Vertikální vzdálenost měničů a úhel pro odklonění přední stěny

Na Obr. 38 vidíme, že pro dané měniče, jejich vertikální vzdálenost  $l_{vb} = 136$  mm a horizontální rozdíl vzdáleností bodů vzniku zvukové vlny  $z = 32$  mm musí být přední stěna skloněna o  $13^\circ$ .

Při návrhu objemu byla přední stěna ozvučnice odkloněna vložением klínu o úhel  $\delta = 6^\circ$ . Celá ozvučnice bude tedy dodatečně odkloněna o úhel  $\beta = 7^\circ$  tak, aby součtem byl sklon přední stěny ozvučnice  $\gamma = 13^\circ$ .

Odkloněná ozvučnice bude stát na čtyřech nožičkách na podstavci, ve kterém budou skryty výhybky, které by při umístění v ozvučnici ubíraly prostor, byly by zbytečně mechanicky namáhané a mohly by být zdrojem specifického zvukového rušení, označovaného „RUB & BUZZ“. Nožičky budou vyrobeny ze silnostěnných nerezových trubek a budou vyplněné pískem [27] pro omezení přenosu vibrací z ozvučnice na podstavec a dále na podlahu.

Vizualizace ozvučnice osazené měniči, s podstavcem a texturou kamene je na Obr. 39:



Obr. 39 a) Přední pohled vizualizace osazené reprosoustavy  
b) Přední – boční pohled vizualizace osazené reprosoustavy  
c) Boční pohled vizualizace osazené reprosoustavy

Na Obr. 39 je vizualizovaný trojrozměrný model reprosoustavy.

Objem tělesa ozvučnice je přibližně  $V_{oz} = 18,1$  litrů, což při použití umělého kamene s hustotou přibližně  $\rho = 2500$  kg.m<sup>-3</sup> odpovídá hmotnosti neosazené ozvučnice:

$$m = V_{oz} \cdot \rho = 0,0181 \cdot 2500 = 45,25 \text{ kg}, \quad (12.2)$$

kde  $m$  je hmotnost neosazené ozvučnice,  $V_{oz}$  objem tělesa ozvučnice,  $\rho$  předpokládaná hustota umělého kamene.

Hustota materiálu je jen odhadovaná, použitý materiál je směs s různými hustotami jednotlivých složek.

Tento model bude výchozím podkladem pro tvorbu modelů odlévacích forem.



## 12.2 Známé nedostatky návrhu

Model byl vytvořen hlavně pro potřeby detailního návrhu ozvučnice, umístění měničů a bassreflexu. Snahou bylo dodržení všech pravidel pro minimalizování negativních jevů spojených s vlivem ozvučnice na kvalitu reprodukce, bohužel ne všechny mohly být uplatněny v plné míře.

Například osová vzdálenost výškového a středotónového (basového) měniče by neměla přesáhnout čtvrtinu vlnové délky dělicího kmitočtu výhybky [25]. Vlnová délka pro předběžně uvažovaný dělicí kmitočet okolo  $f_{del} = 1,5$  kHz je:

$$\lambda_{del} = \frac{c}{f_{del}} = \frac{344}{1500} = 0,229 \text{ m}, \quad (12.3)$$

kde  $\lambda_{del}$  je vlnová délka dělicího kmitočtu,  $c$  je rychlost šíření zvuku ve vzduchu,  $f_{del}$  dělicí kmitočet.

Měniče by tedy neměly být vzdáleny více než 57 mm, což je vzhledem k jejich fyzickým rozměrům [3] nemožné.

Dalším doporučením, které bylo splněno jen přibližně, je umístění basového měniče. Pro minimalizování buzení stojatého vlnění v ozvučnici je doporučeno umístit basový měnič do výšky mezi 1/2 a 1/3 výšky ozvučnice [26].

Celková výška dutiny ozvučnice sestává z výšky válcové části  $v_v = 390$  mm a dvou kulových vrchlíků s poloměrem  $b = 75$  mm:

$$v_o = v_v + 2b = 390 + 2 \cdot 75 = 540 \text{ mm}, \quad (12.4)$$

kde  $v_o$  je celková výška dutiny ozvučnice,  $v_v$  je výška válcové části,  $b$  je poloměr kulového vrchlíku.

Basový měnič by tedy měl být umístěn ve výšce:

$$v_b \approx \left\langle \frac{1}{3}, \frac{1}{2} \right\rangle v_o = \langle 180, 270 \rangle \text{ mm}, \quad (12.5)$$

kde  $v_b$  je umístění basového měniče v ozvučnici,  $v_o$  výška dutiny ozvučnice.

Výška vztažená k podstavě válce je o 75 mm nižší, měnič by tedy měl být umístěn ve výšce:

$$v_b \approx \langle 105, 195 \rangle \text{ mm}, \quad (12.6)$$

Namísto toho je umístěn ve výšce  $v_b = 202$  mm měřené od podstavy válce, což je vzhledem k ostatním vlastnostem ozvučnice pravděpodobně stále akceptovatelná výška.

## 13 Realizace ozvučnice

### 13.1 Materiál

Ozvučnice je provedena odlitím z umělého kamene jako jeden kus. Jako směs pro umělý kámen byly vybrány dvě velikostní frakce kamenné drti čediče (*basalt*) a bílého mramoru (*white marble*) a jako pojivo portlandský cement. Pro obarvení byl použit černý pigment.

Oba druhy kamene byly vybrány pro své specifické vlastnosti, jako jsou pevnost, tvrdost, hustota, homogenita a izotropie, velikost krystalů.

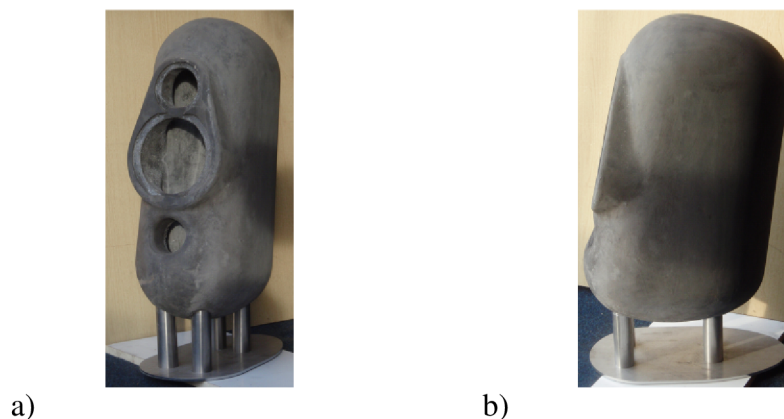
Byla požadována velká, ale rozdílná pevnost a hustota, aby vzniklá směs byla kompaktní, ale pokud možno amorfní, aby šířící se vibrace byly účinně tlumeny.

Tvrдость obou druhů kamene je podobná jako tvrdost portlandského cementu, při broušení tedy nedochází k přílišnému vylamování jednotlivých kamenných zrn a zvolená kombinace se tak jeví jako ideální. Vlastnosti mramoru i čediče jsou zmíněny v kapitole 5.5.

Hustota čediče je přibližně  $3010 \text{ kg.m}^{-3}$ , hustota mramoru přibližně  $2563 \text{ kg.m}^{-3}$  [11]. Velikost zrn použité čedičové drti je 1–1,6 mm, velikost zrn mramorové drti je 1,5–2,4 mm.

Portlandský cement se vyrábí stejně jako ostatní cementy pálením vápence a dalších látek. Byl zvolen pro svou nižší hustotu, dobrou pevnost a tvrdost a rychlejší nástup tvrdnutí [41]. Hustota portlandského cementu je přibližně  $1506 \text{ kg.m}^{-3}$  [11].

Fotografie realizované ozvučnice jsou na Obr. 40:



Obr. 40 a) Přední boční pohled realizované ozvučnice; b) Boční pohled realizované ozvučnice

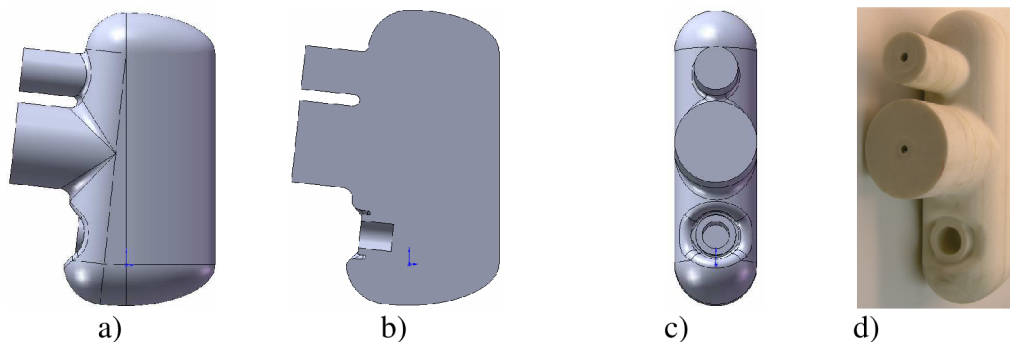
Na Obr. 40 jsou fotografie realizované ozvučnice. Povrch je třeba obrousit, vyleštit a nalakovat, pro viditelnost struktury kamene a dosažení vysokého lesku. Po odlévání do formy jsou jednotlivá kamenná zrna obtečena a schována cementem. Ozvučnice stojí na stojanu z nerezových trubek a nerezového plechu, jehož tvar byl vyříznut plazmou.

## 13.2 Formy

Formy pro odlití ozvučnice byly vyrobeny podle předlohy, odvozené z trojrozměrného modelu ozvučnice.

Byl vytvořen model dutiny, modifikovaný tak, aby jej bylo možno sesadit s formou vnějšího tvaru ozvučnice. Tento počítačový model posloužil jako pozitivní model pro tvorbu dutého jádra, které zůstalo uvnitř ozvučnice a po odlití a zatuhnutí materiálu bylo otvory pro měniče rozbito a vyjmuto ven – takzvané ztracené jádro.

Počítačový model dutiny ozvučnice je na Obr. 41:



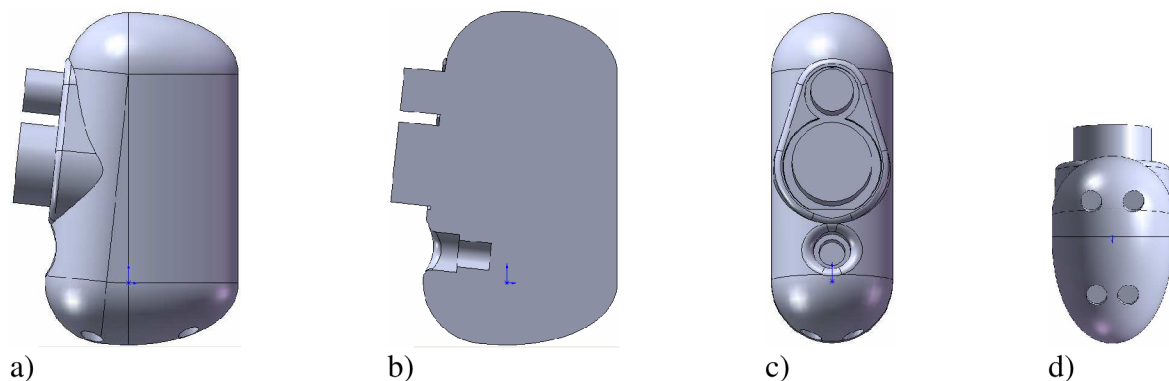
Obr. 41 a) Boční pohled modelu dutiny ozvučnice; b) Boční pohled modelu dutiny ozvučnice v řezu; c) Přední pohled modelu dutiny ozvučnice; d) Skutečný model dutiny

Na Obr. 41 je model dutiny ozvučnice, jehož pozitiv byl použit jako ztracené jádro při odlévání. Válcové vystupující z těla modelu vymezují otvory pro měniče ve stěně ozvučnice tloušťky  $t = 4$  cm a za jejich zbytek bylo jádro zasazeno a připevněno ve formě vnějšího tvaru.

Válce jsou poměrně dlouhé a silné, protože vztlak materiálu při odlévání je vysoký a má tendenci zvedat jádro. Otvor v části bassreflexu je navržen tak, aby po spojení s vnější formou vytvořil osazení pro bassreflex a zároveň fungoval jako další spojení s vnější formou. Válec v tomto případě nevychází z jádra, jako je tomu u válců pro otvory výškového a basového měniče, ale z formy vnějšího tvaru.

Druhý vytvořený počítačový model je model vnějšího tvaru ozvučnice modifikovaný tak, aby po vyrobení jeho negativu vznikla forma vnějšího tvaru ozvučnice, umožňující sesazení s modelem jádra.

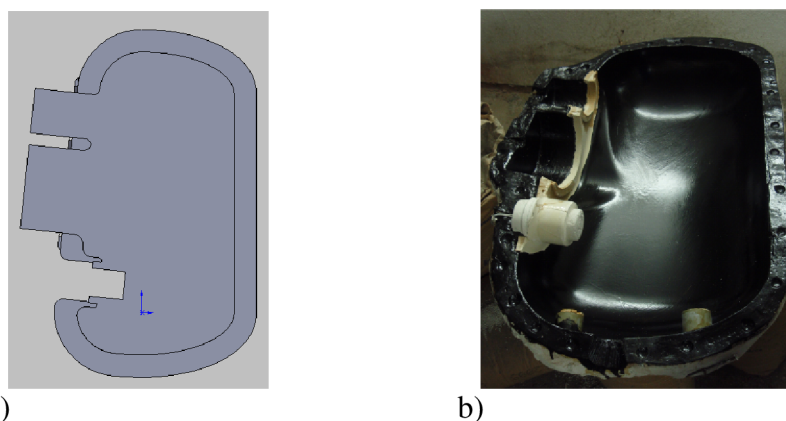
Počítačový model vnějšího tvaru ozvučnice je na Obr. 42:



Obr. 42 a) Boční pohled modelu vnějšího tvaru ozvučnice; b) Boční pohled modelu vnějšího tvaru ozvučnice v řezu; c) Přední pohled modelu vnějšího tvaru ozvučnice; d) Spodní pohled modelu vnějšího tvaru ozvučnice

Na Obr. 42 je model vnějšího tvaru ozvučnice, jehož negativ byl použit jako předloha pro formu vnějšího tvaru při odlévání. Válcové vystupující z těla modelu vymezují otvory pro zasazení jádra dutiny. Na Obr. 42 d) jsou díry v ozvučnici pro zasazení trubek nožiček. Jednou z trubek povedou do ozvučnice kabely se signálem z výhybek.

Model dutiny umístěný ve formě společně s odlitkem ozvučnice a skutečná forma jsou na Obr. 43:



Obr. 43 a) Model dutiny a formy vnějšího tvaru; b) Forma vnějšího tvaru

Na Obr. 43 a) je model dutiny a formy vnějšího tvaru, který ukazuje, jak odlitek ozvučnice vzniká. Forma vnějšího tvaru je vyznačena světlejší barvou, k ní je pomocí válců výškového a basového měniče a bassreflexu přichyceno jádro. Vlastní ozvučnice vznikne vyplněním prostoru vymezeného vnější formou a jádrem. Na Obr. 43 b) je skutečná forma vnějšího tvaru. Forma je vyrobena ze sádry, pouze v oblasti osazení měničů je použita speciální plastická hmota. Sádra je natřena pro separaci odlitku.

Modely byly podle počítačové předlohy vyrobeny na CNC obráběcím stroji a byla podle nich vyrobena dvojdielná odlévací forma a jádro.

Ozvučnice byla odlita do formy, směs umělého kamene byla ztuhněna na vibračním stole pro vyhnání vzduchových bublin ze směsi a co nejtěsnější poskládání se kamenných zrn. Forma byla rozebrána po 5 dnech tuhnutí směsi. Po opatrném rozbití a vyjmutí jádra nebylo s ozvučnicí ještě několik dní manipulováno, doba do úplného ztuhnutí (zrání) cementu je několik týdnů.

### 13.3 Problémy při realizaci ozvučnice

#### CNC obrábění

Prvním problémem bylo zajištění vyrobení modelů podle počítačové předlohy. Většina výrobců CNC obrobků je orientována na automobilový průmysl a/nebo na velké zakázky. Poptávaná výroba dvou relativně malých kusů modelů nebyla pro většinu výrobců zajímavá a zakázku buď odmítli, nebo předražili.

Po nalezení výrobce ochotného modely realizovat byl jako materiál zvolen extrudovaný polystyren. Tento materiál byl zvolen pro svou jednodušší a tedy rychlejší opracovatelnost. Rychlost obrábění je důležitá, protože cena zakázky se odvíjí od počtu hodin práce CNC stroje. Volba materiálu se nakonec neukázala jako šťastná, kvalita opracování povrchu nedosahovala přesnosti a hladkosti potřebné pro výrobu odlévací formy. Povrch musel proto být mnohokrát natírán, stříkán, tmelen a broušen, než byl dostatečně hladký a bylo možné vyrobit podle něj sádrovou odlévací formu.

Dalším problém nastal při obrábění, kdy byl kvádrový blok materiálu pro obrábění upnut do obráběcího stroje se špatnou orientací. Obráběcí stroj tak v jednom směru ubíral materiál a v dalším směru materiál chyběl. Problém musel být řešen dolepováním nesprávně odebraného materiálu a dodatečným obráběním.

#### Odlévání

Při odlévání a současném zhutňování směsi na vibračním stole byla proražena forma vnějšího tvaru a odlitek tím byl deformován. Po rozebrání formy muselo být deformované místo doplněno směsí umělého kamene. Doplněná hmota není dokonale spojená s ostatním materiálem a má jinou kresbu materiálu umělého kamene.

## 14 Výhybky

Použití kmitočtových elektrických filtrů v oblasti reproduktorové techniky nazývaných výhybky je dáno nutností rozdělení celkového kmitočtového pásma elektrického signálu do několika dílčích pásem, směřovaných jednotlivým elektroakustickým měničům.

Klasičtějším a stále ještě častěji používaným typem výhybek jsou pasivní výkonové výhybky, na jejichž vstup přivádíme výkonový signál ze zesilovače a na jejichž výstupu je zapojen měnič, určený pro reprodukci daného akustického kmitočtového pásma. Jejich výhodou je univerzálnost použití reproduktorové soustavy s volitelným zesilovačem, nevýhodou jsou výkonové ztráty na součástkách a obtížná realizovatelnost složitějších tvarů přenosové charakteristiky.

Modernějším přístupem je použití nevýkonových aktivních výhybek, zařazených před zesilovače, budící rozděleným a následně zesíleným signálem jednotlivé měniče. Nevýkonové výhybky mohou být buď analogové nebo číslicové. Použití nevýkonových výhybek přináší výhodu především ve snadné realizaci přenosu požadovaného tvaru, který může být i značně

složité a může například kompenzovat vlastní *SPL* charakteristiku elektroakustického měniče, nebo může umožňovat adaptivní kompenzaci nedostatků poslechové místnosti.

Reposoustavy s nevýkonovými výhybkami bývají konstruovány jako aktivní se zabudovaným zesilovačem pro každý z měničů soustavy. Použití číslicových filtrů je pravděpodobně směr, kterým se budou v blízké budoucnosti ubírat výrobci „*high performance*“ reposoustav.

Používané kmitočtové filtry pro měniče daných kmitočtových pásem jsou:

- dolní propust pro basový měnič,
- pásmová propust pro středotónový měnič,
- horní propust pro vysokotónový měnič.

Podle počtu pásem reposoustavy se vyskytují především kombinace dolní propusti a horní propusti pro dvoupásmové reposoustavy a kombinace dolní propusti, pásmové propusti a horní propusti pro třípásmové reposoustavy. Lze se setkat i s vícepásmovými reposoustavami.

Někdy se používá také horní propust s dělicím kmitočtem blízkým rezonančnímu kmitočtu basového měniče, která chrání měnič před mechanickým poškozením. Výchylna membrány měniče je přímo úměrná druhé mocnině vlnové délky, a pokud je měnič, třeba jen na okamžik, zatížen velmi nízkým kmitočtem, může dojít k jeho mechanickému poškození překročením maximální možné výchylky.

Používané reproduktorové výhybky se liší použitou strmostí – řádem filtru. Řád filtru prakticky značí počet neslučitelných reaktančních prvků filtru. Řádem filtru je dána jeho strmost. Vyšší strmost filtrů snižuje šířku pásma přenášeného současně oběma měniči a tím i pásma, kde se měniče vzájemně (negativně) ovlivňují.

V reproduktorové technice se častěji používá vyjádření strmosti filtrů v dB na oktávu [dB/okt] namísto obecně používané strmosti dB na dekádu [dB/dek]. Oktáva je interval mezi dolním kmitočtem a jeho dvojnásobkem nebo horním kmitočtem a jeho polovinou. Strmost filtru prvního řádu je 20 dB/dek = 6 dB/okt, strmost filtru druhého řádu je 40 dB/dek = 12 dB/okt, strmost filtru třetího řádu je 60 dB/dek = 18 dB/okt. Filtry vyšších řádů se obvykle nepoužívají. Filtry prvního řádu mají příliš nízkou strmost, proto se v kvalitních reposoustavách obvykle nepoužívají jinde než pro ochranu basového měniče před poškozením nízkými kmitočty (vysokotónový měnič musí být ochráněn výhybkou vyšší strmosti). Není to však pravidlem. Zatímco v minulosti se v kvalitních reposoustavách používaly filtry vysokých řádů, v dnešní době se někteří výrobci vracejí k co nejjednodušším filtrům. Podmínkou možnosti jejich použití jsou ale velmi kvalitní měniče a pečlivý návrh filtrů, které s charakterem měničů a jejich nedokonalostmi přímo počítají. Příkladem reposoustavy s výhybkami prvního řádu může být model *Signature Diamond* společnosti B&W [4].

Filtry lichého řádu [26] mají plochou součtovou charakteristiku při shodném kmitočtu  $f_{-6dB}$  obou filtrů. Filtry lichého řádu mají plochou součtovou charakteristiku při shodném kmitočtu  $f_{-3dB}$  obou filtrů.

Dalším rozdělovacím kritériem je použitá aproximace. V praxi se pro reproduktorové výhybky používají převážně filtry vycházející z aproximací typu Linkwitz – Rille pro výhybky druhého řádu nebo typu Butterworth pro výhybky třetího řádu.

Filtry typu Linkwitz – Riley mají konstantní součtovou amplitudovou charakteristiku. Filtry jsou označovány jako fázovací články (*all pass filter*), fázová charakteristika je frekvenčně závislá. Činitel jakosti filtru je  $Q = 0,5$ .

Filtry Butterworthova typu mají maximálně plochou přenosovou charakteristiku a při použití DP a HP se stejným dělicím kmitočtem také konstantní součtovou výkonovou charakteristiku. Činitel jakosti filtru je  $Q = 0,707$ .

Výhybky mohou být sériové nebo paralelní, obvyklejším typem jsou paralelní.

## 14.1 Butterworth třetího řádu

Pro své výhodné vlastnosti byly zvoleny výhybky typu Butterworth Třetího řádu.

Jejich výhodou je zejména plochá součtová přenosová charakteristika při shodném dělicím kmitočtu  $f_{3dB}$ . Součtová přenosová charakteristika nezávisí na pólování měničů, zapojení s opačnou vzájemnou polaritou obou měničů má ale plošší součtové skupinové zpoždění a je proto preferováno. V některých případech nevhodnou, pro realizovanou reposoustavu však velmi cennou vlastností je sklon vertikální vyzařovací charakteristiky o  $15^\circ$  nahoru při zapojení měničů se shodnou polaritou a sklon o  $15^\circ$  dolů, při zapojení měničů s opačnou polaritou. Ozvučnice má sklon přední stěny ozvučnice  $\gamma = 13^\circ$ . Při zapojení měničů s opačnou polaritou bude tedy maximum vyzařování jen  $2^\circ$  od horizontální osy.

Vzorce pro výpočet hodnot součástí dolní propusti a horní propusti Butterworth třetího řádu jsou [26]:

$$C_1 = \frac{0,1061}{R_v \cdot f_d}, \quad C_2 = \frac{0,3183}{R_v \cdot f_d}, \quad C_3 = \frac{0,2122}{R_b \cdot f_d}, \quad (14.1), (14.2), (14.3)$$

$$L_1 = \frac{0,1194 \cdot R_v}{f_d}, \quad L_2 = \frac{0,2387 \cdot R_b}{f_d}, \quad L_3 = \frac{0,0796 \cdot R_b}{f_d}, \quad (14.4), (14.5), (14.6)$$

kde  $C_1$ ,  $C_2$  a  $L_1$  jsou hodnoty prvků horní propusti,  $C_3$ ,  $L_2$  a  $L_3$  jsou hodnoty prvků dolní propusti,  $R_v$  je nominální odpor výškového měniče,  $R_b$  nominální odpor basového měniče,  $f_d$  dělicí kmitočet výhybek.

## 14.2 Kompenzace indukčnosti kmitací cívky basového měniče

Součástí obvodů realizujících funkci výhybek bývají obvody, kompenzující indukční charakter měničů, zejména basových. Zatížení výhybky nekompenzovaným měničem znehodnotí její přenos.

Kompenzace se provádí paralelním připojením sériového spojení kondenzátoru a odporu, jejichž hodnoty přibližně určíme podle [1]:

$$R_k \approx \left\langle R_e, \frac{3}{2} R_e \right\rangle, \quad (14.7)$$

$$C_k = \frac{L_e}{R_k^2}, \quad (14.8)$$

kde  $R_k$  je kompenzační odpor,  $R_e$  stejnosměrný odpor kmitací cívky,  $C_k$  kompenzační kapacita,  $L_e$  indukčnost kmitací cívky.

Výpočet kompenzačního rezistoru pro měnič HDS Nomex Midwoofer s  $R_e = 6,4 \Omega$  a  $L_e = 1,3 \text{ mH}$  [3] podle vztahu (14.7):

$$R_k \approx \left\langle R_e, \frac{3}{2} R_e \right\rangle = \langle 6,4; 9,6 \rangle \Omega, \quad (14.9)$$

kde  $R_k$  je kompenzační odpor,  $R_e$  stejnosměrný odpor kmitací cívky.

Z řady E12 odpovídají hodnoty  $6,8 \Omega$  a  $8,2 \Omega$ . Hodnoty odpovídajících kapacit jsou (14.8):

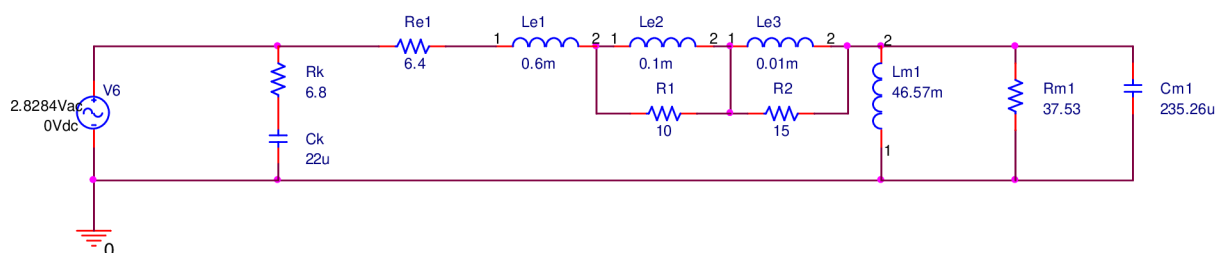
$$C_k = \frac{L_e}{R_k^2} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3}}{6,8^2} = 28,1 \mu\text{F}, \quad (14.10)$$

$$C_k = \frac{L_e}{R_k^2} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3}}{8,2^2} = 19,3 \mu\text{F}, \quad (14.11)$$

kde  $C_k$  je kompenzační kapacita,  $L_e$  indukčnost kmitací cívky,  $R_k$  je kompenzační odpor.

Z řady E12 vybíráme hodnotu kondenzátoru  $C_k = 22 \mu\text{F}$ , simulace průběhu kompenzované impedanční charakteristiky vychází lépe pro hodnotu odporu  $R_k = 6,8 \Omega$ .

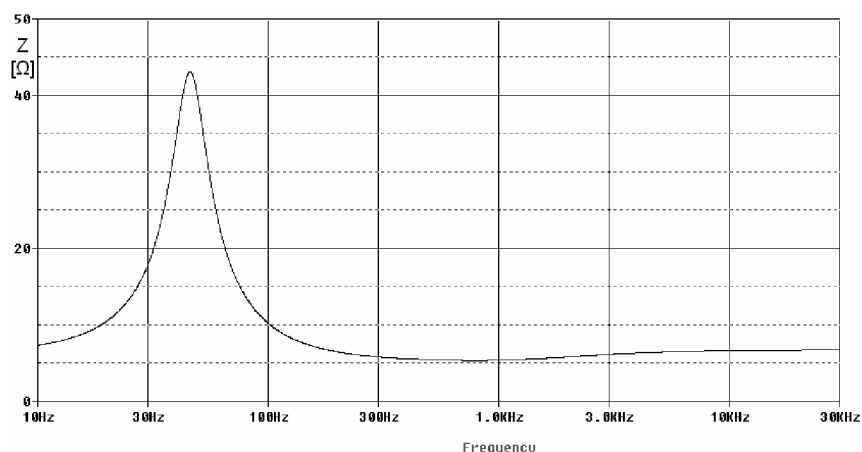
Kompenzované náhradní zapojení impedance měniče HDS Nomex Midwoofer je na Obr. 44:



Obr. 44 Náhradní impedanční obvod měniče s kompenzací indukčnosti



Průběh simulované impedanční charakteristiky měniče s kompenzovanou indukčností je na Obr. 45:



Obr. 45 Simulovaný průběh impedance měniče s kompenzací indukčnosti

Ze simulovaného průběhu impedance na Obr. 45 vyplývá, že kompenzovaný měnič bude kolem uvažovaného dělicího kmitočtu  $f_d \approx 1500$  Hz zatěžovat výhybku odporem přibližně  $R_b = 5,5 \Omega$ .

### 14.3 Snížení citlivosti výškového měniče

Výškové měniče mají obvykle vyšší citlivost než středové a basové a jejich citlivost musí být snížena. Snížení citlivosti odporovým děličem také omezuje vliv impedance měniče na výhybku.

Citlivost měniče HDS Nomex Midwoofer je  $S_b = 88,6$  dB. Citlivost měniče HDS 1“ Tweeter je  $S_v = 93$  dB. Požadovaný útlum je  $A = S_b - S_v = 88,6 - 93 = -4,4$  dB.

Ke snížení se používá jednoduchý odporový dělič, hodnoty odporů děliče vypočítáme [1]:

$$R_{tp} = 10^{\frac{A}{20}} \cdot \frac{R_e}{1 - 10^{\frac{A}{20}}} = 10^{\frac{-4,4}{20}} \cdot \frac{5,6}{1 - 10^{\frac{-4,4}{20}}} = 8,49 \Omega, \quad (14.12)$$

$$R_{ts} = R_e - \frac{1}{\frac{1}{R_{tp}} + \frac{1}{R_e}} = 5,6 - \frac{1}{\frac{1}{8,49} + \frac{1}{5,6}} = 2,22 \Omega, \quad (14.13)$$

kde  $A$  je požadovaný útlum děliče,  $R_e = 5,6 \Omega$  stejnosměrný odpor kmitací cívky [3],  $R_{tp}$  odpor tlumící paralelní,  $R_{ts}$  odpor tlumící sériový.

Hodnoty odporů vybrané z řady E12 jsou  $R_{tp} = 8,2 \Omega$  a  $R_{ts} = 2,2 \Omega$ .

Útlum děliče s  $R_{tp} = 8,2 \Omega$  a  $R_{ts} = 2,2 \Omega$  pak bude:

$$A = 20 \log \frac{\frac{R_e \cdot R_{tp}}{R_e + R_{tp}}}{\frac{R_e \cdot R_{tp}}{R_e + R_{tp}} + R_{ts}} = 20 \log \frac{\frac{5,6 \cdot 8,2}{5,6 + 8,2}}{\frac{5,6 \cdot 8,2}{5,6 + 8,2} + 2,2} = -4,408 \text{ dB}, \quad (14.14)$$

a bude zatěžovat výhybku stejnosměrným oporem:

$$R_z = R_{ts} + \frac{R_e \cdot R_{tp}}{R_e + R_{tp}} = 2,2 + \frac{5,6 \cdot 8,2}{5,6 + 8,2} = 5,53 \Omega, \quad (14.15)$$

kde  $R_z$  je zatěžující stejnosměrný odpor,  $R_{ts}$  odpor tlumící sériový,  $R_e$  stejnosměrný odpor kmitací cívky,  $R_{tp}$  odpor tlumící paralelní.

## 14.4 Návrh výhybek

Na internetu existuje mnoho online skriptů pro výpočet součástek elektrických filtrů různých řádů a aproximací, například [51]. Není tedy problém mnohokrát a rychle provádět výpočty hodnot součástek pro různé dělicí kmitočty tak, aby se výsledné hodnoty součástek, především kapacit, co nejvíce blížily hodnotám součástek z E12. Hodnoty indukčností je možné upravit odmotáním drátu z cívky s vyšší indukčností.

Jako výchozí hodnota dělicího kmitočtu  $f_d$  byla použita předem uvažovaná hodnota  $f_d = 1500 \text{ Hz}$  a postupnými změnami oběma směry byl zvolen dělicí kmitočet  $f_d = 1470 \text{ Hz}$ , pro který jsou hodnoty součástek podle vztahů (14.1), (14.2), (14.3), (14.4), (14.5), (14.6):

$$C_1 = \frac{0,1061}{R_v \cdot f_d} = \frac{0,1061}{5,53 \cdot 1470} = 13,1231 \mu\text{F}, \quad (14.16)$$

$$C_2 = \frac{0,3183}{R_v \cdot f_d} = \frac{0,3183}{5,53 \cdot 1470} = 39,3692 \mu\text{F}, \quad (14.17)$$

$$C_3 = \frac{0,2122}{R_b \cdot f_d} = \frac{0,2122}{5,5 \cdot 1470} = 26,2461 \mu\text{F}, \quad (14.18)$$

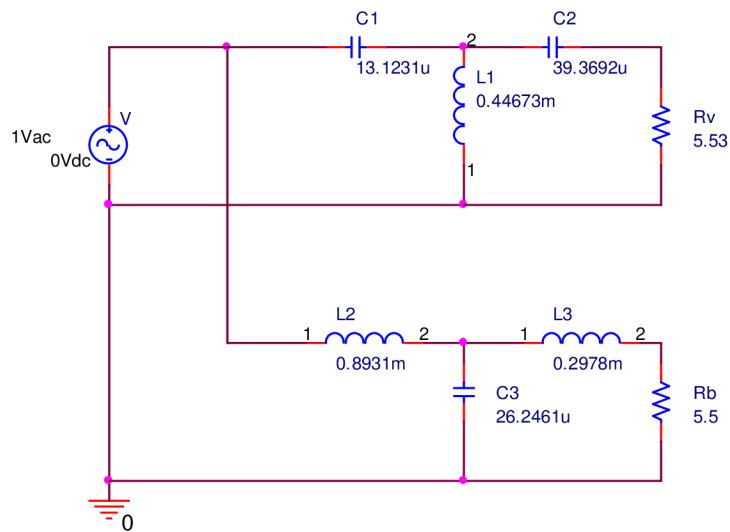
$$L_1 = \frac{0,1194 \cdot R_v}{f_d} = \frac{0,1194 \cdot 5,53}{1470} = 0,4467 \text{ mH}, \quad (14.19)$$

$$L_2 = \frac{0,2387 \cdot R_b}{f_d} = \frac{0,2387 \cdot 5,5}{1470} = 0,8931 \text{ mH}, \quad (14.20)$$

$$L_3 = \frac{0,0796 \cdot R_b}{f_d} = \frac{0,0796 \cdot 5,5}{1470} = 0,2978 \text{ mH}, \quad (14.21)$$

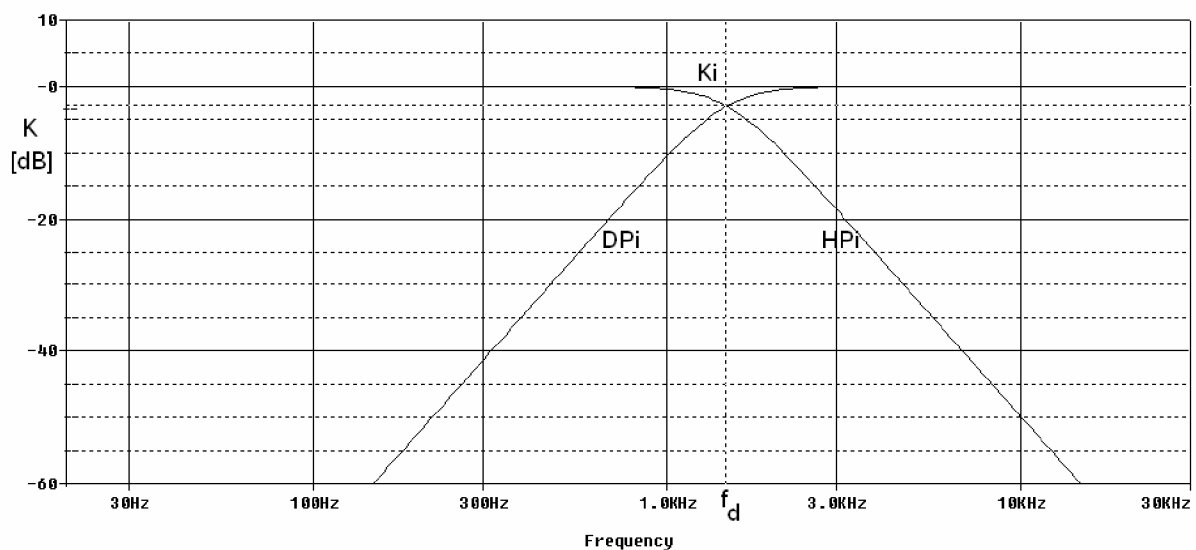
kde  $C_1$ ,  $C_2$  a  $L_1$  jsou hodnoty prvků horní propusti,  $C_3$ ,  $L_2$  a  $L_3$  jsou hodnoty prvků dolní propusti,  $R_v = R_z = 5,53 \Omega$  je stejnosměrný odpor, kterým výškový měnič zatěžuje výhybku,  $R_b = 5,5 \Omega$  je stejnosměrný odpor, kterým basový měnič zatěžuje výhybku,  $f_d$  dělicí kmitočet výhybek.

Simulované zapojení výhybek s vypočítanými hodnotami součástek a zatížené odpory  $R_v$  a  $R_b$  je na Obr. 46:



Obr. 46 Zapojení výhybek s vypočtenými hodnotami součástek

Výsledky simulace přenosových charakteristik DP a HP s vypočtenými hodnotami prvků jsou na Obr. 47:

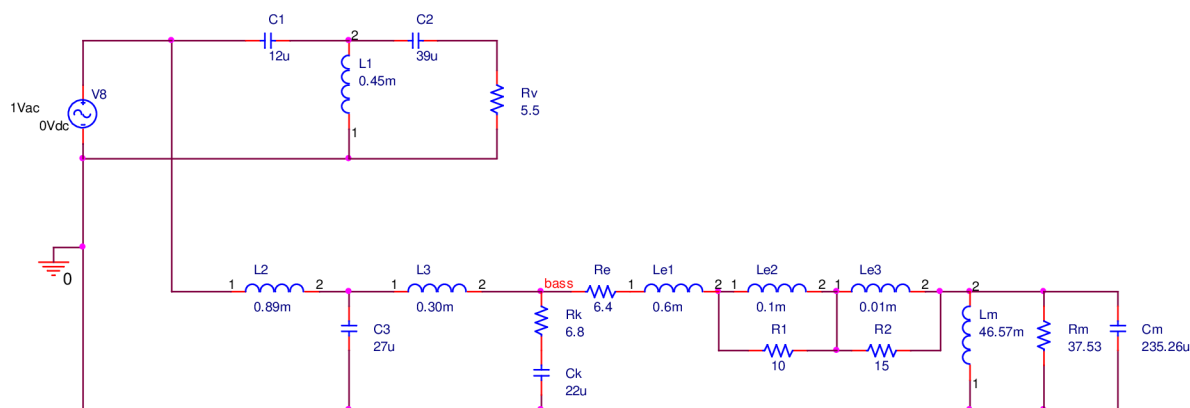


Obr. 47 Simulované přenosové charakteristiky filtrů s ideálními hodnotami prvků

Na Obr. 47 jsou simulované přenosové charakteristiky dolní propusti  $DP_i$  a horní propusti  $HP_i$  typu Butterworth třetího řádu s přesně vypočtenými (ideálními) hodnotami prvků a součet přenosů obou filtrů  $K_i$ . Filtry byly zatíženy odpory s hodnotami  $R_v = 5,53 \Omega$  ve výškové větvi a  $R_b = 5,5 \Omega$  ve větvi basového měniče. Odečtený dělicí kmitočet je  $f_d = 1470 \text{ Hz}$ .

Hodnoty součástek filtrů musí být voleny z řady E12 a výstupy filtrů budou zatíženy měniči namísto odporů. Impedanční náhradní zapojení měniče HDS Nomex Midwoofer známe a jeho kompenzovanou variantu použijeme pro simulaci. Impedanční náhradní zapojení měniče HDS 1“ Tweeter neznáme, jako zátěž filtru použijeme odpor  $R_v = 5,53 \Omega$ .

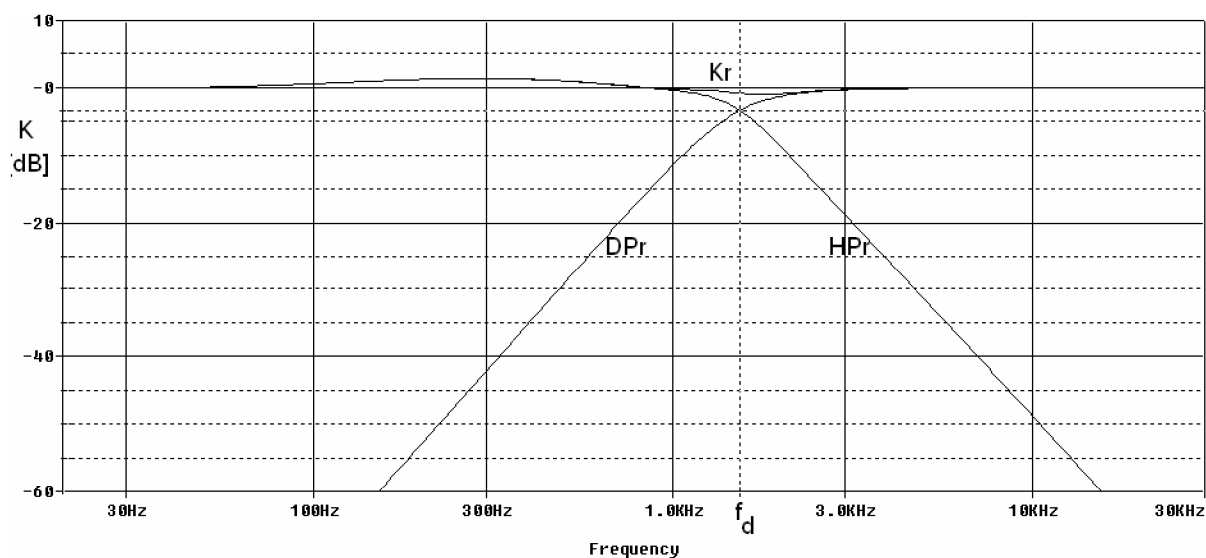
Schéma simulovaného obvodu s kapacitami z E12, zaokrouhlenými hodnotami indukčností a zátěží náhradním impedančním zapojením měniče HDS Nomex Midwoofer je na Obr. 48:



Obr. 48 Zapojení výhybek se součástkami z E12

Na Obr. 48 je simulované zapojení výhybek s kapacitami z E12, zatížené náhradním impedančním obvodem měniče HDS Nomex Midwoofer s kompenzovanou indukčností.

Průběh přenosových charakteristik simulovaného zapojení je na Obr. 49:



Obr. 49 Simulované přenosové charakteristiky filtrů s hodnotami součástek z E12

Na Obr. 49 jsou simulované přenosové charakteristiky dolní propusti  $DP_r$  a horní propusti  $HP_r$  typu Butterworth třetího řádu s hodnotami součástí z E12 a součet přenosů obou filtrů  $K_r$ . Filtry byly zatíženy odpory s hodnotami  $R_v = 5,53 \Omega$  ve výškové větvi a náhradním impedančním zapojením basového měniče s kompenzovanou indukčností. Odečtený dělicí kmitočet je  $f_d = 1525$  Hz pro pokles přenosu  $-3,36$  dB. Přenosová charakteristika  $DP_r$  a tím i součtová přenosová charakteristika  $K_r$  přesahuje o přibližně 1,3 dB do kladných hodnot na kmitočtu kolem 300 Hz. V oblasti mírně nad dělicím kmitočtem je na součtové přenosové charakteristice  $K_r$  propad o přibližně 1dB. Tento propad vymizí při souhlasném polování měničů, současně ale ztrácíme výhodu ve sklonu vertikální vyzářovací charakteristiky.

## 14.5 Součástky

Pro realizaci výhybek je třeba použít odpovídající součástky, dostatečně výkonově dimenzované. Obvykle se používají cívky na vzduchovém jádře, kondenzátory s plastovým dielektrikem a drátové odpory [25].

## Závěr

Cílem diplomové práce a předchozích semestrálních projektů není plně objasnit a vysvětlit všechny možné přístupy a aspekty návrhu reproduktorových soustav. Proto jsou popisovány jen konkrétní kroky návrhu. Je zřejmé, že některé používané parametry nejsou plně objasněny (například náhradní elektrické zapojení měničů, vycházející z tzv. akusticko – elektrické a mechanicko – elektrické analogie). Důvodem je především samotné zadání, jehož úkolem je návrh a pokus o realizaci reproduktorové soustavy. Velmi široký záběr problematiky návrhu a konstrukce reproduktorových soustav přesahuje možný rozsah diplomové práce a lze jej vyhledat v uvedené literatuře.

V diplomové práci jsou popsány používané elektroakustické měniče a používané či použitelné materiály pro výrobu ozvučnic. Vzhledem k typu řešené reproduktorové soustavy nejsou detailně popsány všechny typy měničů, které se vyskytují, ale především ty, se kterými se lze setkat v domácích reproduktorových soustavách. Některé popisované aplikace, ať už elektroakustických měničů nebo materiálů ozvučnic, jsou doplněny konkrétními příklady použití. Všechny použité fotografie komerčních výrobků jsou dostupné na internetových stránkách uváděných společností, odkazy na tyto stránky jsou uvedeny na konci tohoto textu.

Z porovnávaných materiálů, které se používají pro výrobu ozvučnic, jsou z hlediska hustoty pravděpodobně nejvhodnější kamenné materiály a hliník. Jinou otázkou je vhodnost z hlediska možného opracování a vlastního tlumení materiálů. Z tohoto pohledu jsou velmi vhodné plasty, u nichž lze v dnešní době dosáhnout téměř libovolných vlastností.

Při výběru měničů byla určujícím kritériem *SPL* charakteristika. Ceny měničů s membránami z nejkvalitnějších materiálů přesahují uvažované finanční možnosti. Z vybíraných hlubokotónových měničů se pro svou velmi plochou *SPL* charakteristiku a poměrně nízkým potřebným objemem ozvučnice jevil nejlépe měnič Peerless HDS Nomex 6½ Midwoofer. Z vysokotónových měničů byl pro svou příznivou *SPL* charakteristiku a velmi nízký rezonanční kmitočet vybrán měnič Peerless HDS 1“ Tweeter. Nízký rezonanční kmitočet byl požadován, protože je účelné, aby kmitočtové pásmo od přibližně 2000 Hz do 4000 Hz, tedy oblast nejcitlivějšího vnímání zvuku, přenášel jediný měnič. V případě vícepásmových reprosoustav toto pásmo obvykle přenáší středotónový měnič, v dvoupásmové reprosoustavě je pásmo buď rozděleno mezi oba měniče, nebo jako v případě tohoto návrhu je přenášeno vysokotónovým měničem.

Byla navržena a realizována ozvučnice z umělého kamene, který byl vybrán pro své vhodné akustické vlastnosti. Tvar ozvučnice byl navržen pro co nejdokonalejší potlačení negativních vlivů ozvučnice na výslednou zvukovou kvalitu, jako jsou rezonance stěn ozvučnice, stojaté vlnění a difrakce.

Byly provedeny simulace výstupních *SPL* charakteristik, navrženy reproduktorové výhybky typu Butterworth 3. řádu a navržen obvod pro kompenzaci indukčnosti basového měniče a pro snížení citlivosti vysokotónového měniče, který zároveň omezuje negativní vliv impedance měniče na výhybku.

Po realizaci ozvučnice měla následovat akustická měření a doladění funkce bassreflexu, výhybek a kompenzačních obvodů. To však nebylo možné, protože distributoři měničů (měniče byly objednány dokonce dvakrát od různých prodejců), měniče bez omluvy a odůvodnění nedodali.

## Použitá literatura a další zdroje

- [1] TOMAN, K. Reproduktory a reprosoustavy. Karviná: Dexon s.r.o., 2001. 212 s.
- [2] von HUENERBEIN, S. Electroacoustic Transducer Design, PART 1: LOUDSPEAKERS. Salford: University of Salford, 2005, [online], [cit. listopad 2006]. Elektronický učební text. Dostupné na WWW: <[http://www.acoustics.salford.ac.uk/student\\_area/modules2.htm](http://www.acoustics.salford.ac.uk/student_area/modules2.htm)>
- [3] Tymphany [online], [cit. listopad 2007]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.tymphany.com/categories/peerless>>
- [4] Bowers&Wilkins [online], [cit. listopad 2006]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.bwspeakers.com>>
- [5] Rohacell® [online], [cit. listopad 2006]. Webové stránky materiálu. Dostupné na WWW: <<http://www.rohacell.com>>
- [6] Kevlar® [online], [cit. listopad 2006]. Webové stránky materiálu. Dostupné na WWW: <<http://www.dupont.com/kevlar>>
- [7] ŠKVOR, Z. Akustika a elektro-akustika. Praha: Academia, 2001. 500 s. ISBN 80-200-0461-0
- [8] Meridian [online], [cit. prosinec 2006]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.meridian-audio.com>>
- [9] Dali [online], [cit. prosinec 2006]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.dali.dk>>
- [10] ArmageTone [online], [cit. prosinec 2006]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.armagetone.vyrobce.cz>>
- [11] SImetric.co.uk [online], [cit. prosinec 2006]. Webové stránky. Dostupné na WWW: <[http://www.simetric.co.uk/si\\_materials.htm](http://www.simetric.co.uk/si_materials.htm)>
- [12] Flinkstone [online], [cit. prosinec 2006]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.flinkstone.fi>>
- [13] Green Mountain Audio [online], [cit. leden 2007]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.greenmountainaudio.com>>
- [14] Design inSite [online], [cit. leden 2007]. Webové stránky. Dostupné na WWW: <<http://designinsite.dk/htmsider/m0007.htm>>
- [15] Wikipedia [online], [cit. leden 2007]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/High\\_impact\\_polystyrene](http://en.wikipedia.org/wiki/High_impact_polystyrene)>
- [16] Marlan® [online], [cit. leden 2007]. Webové stránky materiálu. Dostupné na WWW: <<http://www.marlan.nl>>
- [17] Bang & Olufsen [online], [cit. leden 2007]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.bang-olufsen.com>>
- [18] H. Snelson Engineers LTD [online], [cit. leden 2007]. Webové stránky společnosti, charakteristiky materiálu. Dostupné na WWW: <[http://www.snelsons.co.uk/aluminium\\_characteristics.html](http://www.snelsons.co.uk/aluminium_characteristics.html)>
- [19] Celestion [online], [cit. leden 2007]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.celestion.com>>
- [20] Marten [online], [cit. leden 2007]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.marten.se>>
- [21] Wikipedia [online], [cit. únor 2007]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Pru%C5%BEnost>>
- [22] Wikipedia [online], [cit. únor 2007]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Vnit%C5%99n%C3%AD\\_t%C5%99en%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Vnit%C5%99n%C3%AD_t%C5%99en%C3%AD)>

- [23] Liapor Beton [online], [cit. březen 2007]. Webové stránky společnosti, charakteristiky materiálu, normy. Dostupné na WWW: <[http://www.liaporbeton.cz/normy\\_predpisy.php3#cnormy](http://www.liaporbeton.cz/normy_predpisy.php3#cnormy)>
- [24] JANÍČEK, P. a kol. Mechanika těles pružnost a pevnost I. Skriptum. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2592-X
- [25] SÝKORA, B. Stavíme reproduktorové soustavy, část I - XLVIII. Praktická elektronika ARadio, 10/1997 - 1/2001. Praha: AMARO, 1997-2001.
- [26] DICKASON, V. The Loudspeaker Design Cookbook. 6th ed. Peterborough: Old Colony Sound Lab, 2000. 213 s. ISBN 1-882580-33-8
- [27] COLLOMS, M. High Performance Loudspeakers. 6th ed., West Sussex: John Wiley & Sons, 2005. 558 s. ISBN 0-470-09430-3
- [28] Beyma [online], [cit. duben 2007]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://profesional.beyma.com/ENGLISH>>
- [29] Seas [online], [cit. duben 2007]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.seas.no/SEAS%20Prestige%20line.htm>>
- [30] Dexon Czech s.r.o. [online], [cit. duben 2007]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.dexon.cz/>>
- [31] BORWICK, J. Loudspeaker and headphone handbook. London: Butterworth & Co. Ltd., 1988, 570 s. ISBN 0-408-01387-7
- [32] Wikipedia [online], [cit. srpen 2007]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Aramid>>
- [33] Nomex® [online], [cit. srpen 2006]. Webové stránky materiálu. Dostupné na WWW: <[http://www2.dupont.com/Nomex/en\\_US/](http://www2.dupont.com/Nomex/en_US/)>
- [34] Hexlite [online], [cit. leden 2008]. Webové stránky. Dostupné na WWW: <<http://www.conservation-by-design.co.uk/boards/boards21.html>>
- [35] THIEL Audio [online], [cit. leden 2008]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <[http://www.thielaudio.com/THIEL\\_Site05/Pages/promo\\_downloads.html](http://www.thielaudio.com/THIEL_Site05/Pages/promo_downloads.html)>
- [36] Wikipedia [online], [cit. duben 2008]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium\\_magnet](http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet)>
- [37] Tappan, P. W.: LOUDSPEAKER ENCLOSURE WALLS, AES, Paper Number 183, Convention 13 (October 1961)
- [38] Wikibooks [online], [cit. březen 2008]. Elektronický článek. Dostupné na WWW: <[http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering\\_Acoustics/Bass\\_Reflex\\_Enclosure\\_Design#Appendix\\_B:\\_Enclosure\\_Parameter\\_Formulas](http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Bass_Reflex_Enclosure_Design#Appendix_B:_Enclosure_Parameter_Formulas)>
- [39] Wikipedia [online], [cit. březen 2008]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cedi%C4%8D>>
- [40] Wikipedia [online], [cit. březen 2008]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Mramor>>
- [41] Wikipedia [online], [cit. březen 2008]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Portlandsk%C3%BD\\_cement](http://cs.wikipedia.org/wiki/Portlandsk%C3%BD_cement)>
- [42] RIVIERA ACOUSTICS [online], [cit. březen 2008]. Internetový obchod. Dostupné na WWW: <<http://www.riviera-acoustics.com/catalog/default.php?language=en>>
- [43] Wikipedia [online], [cit. březen 2008]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina\\_stearov%C3%A1](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_stearov%C3%A1)>
- [44] Dodd, M; Klippel, W; Ocle-Brown, J.: Voice Coil Impedance as a Function of Frequency and Displacement, AES, Paper Number 6178, Convention 117, October 2004
- [45] Leach, W. M.: Computer-Aided Electroacoustic Design with SPICE, JAES Volume 39 Issue 7/8 pp. 551-563; July 1991



- [46] Isaac, C. N.: Computer-Aided Vented-Box Loudspeaker Design with SPICE, [online], [cit. březen 2008]. Elektronický článek. Dostupné na WWW: <<http://www.geocities.com/f4ier/vented.htm>>
- [47] Wikipedia [online], [cit. březen 2008]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost\\_zvuku](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost_zvuku)>
- [48] Stevens, W. R.: Sound Radiated from Loudspeaker Cabinets, AES, Paper Number L 16, Convention 50 (March 1975)
- [49] Wikipedia [online], [cit. březen 2008]. Otevřená internetová encyklopedie. Dostupné na WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Golden\\_ratio](http://en.wikipedia.org/wiki/Golden_ratio)>
- [50] Olson, Harry F.: Direct Radiator Loudspeaker Enclosure, In JAES Volume 17 Issue 1 pp. 22-29; January 1969
- [51] ApICS LLC [online], [cit. květen 2008]. Webové stránky společnosti. Dostupné na WWW: <<http://www.apicsllc.com/apics/Misc/filter2.html>>

## **Přílohy**