

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Konstrukce akustických zdrojů zvuku pro ověřování  
volného akustického pole**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luděk FOLKMAN**

Osobní číslo: **E15N0061P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**

Název tématu: **Konstrukce akustických zdrojů zvuku pro ověřování volného akustického pole**

Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Prostudujte požadavky norem na ověřování akustických parametrů pro volné akustické pole a to především na principu stanovení poklesových křivek.
2. Navrhněte vhodný akustický zdroj nebo soustavu zdrojů pro zjišťování parametrů volného akustického pole ve frekvenčním rozsahu alespoň 100 Hz - 8 kHz.
3. Akustické zdroje realizujte.
4. Parametry navržených akustických zdrojů ověřte měřením.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

**Handbook of Acoustics, Malcolm J. Crocker, ISBN: 978-0-471-25293-1**


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Oldřich Tureček, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí akustických zdrojů pro ověřování volného akustického pole. Akustické pole je simulováno za pomoci bezodrazových a polobezodrazových komor a ověřování těchto komor se provádí pomocí referenčních zdrojů zvuku. Tyto zdroje musí být všesměrové, stabilní a malé – bodové. Ověřování bezodrazových komor se provádí měřením poklesu akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti od zdroje zvuku. Měření se provádí pro každý zdroj zvlášť ve frekvenčním pásmu, pro které je určen. Cílem této práce je navrhnout, zkonstruovat a změřit akustické zdroje, které budou vhodné pro ověřování bezodrazových a polobezodrazových komor.

## **Klíčová slova**

Referenční zdroje zvuku, všesměrové zdroje zvuku, bodové zdroje zvuku, akustické dvojče, poloprostorový zářič, cylindrický vlnovod, kónický vlnovod, ověřování volného akustického pole, Thiele – Smallový parametry, náhradní schéma reproduktoru, směrovost reproduktoru, ověřování bezodrazových a polobezodrazových komor.

## **Abstract**

This thesis is aimed at the design and construction of acoustics sources for verification of parameters of free acoustic field. The free acoustic field can be simulated in the anechoic chamber, and the qualification of anechoic chambers can be assessed using these sources. These acoustic sources should be omnidirectional, stable and point. The qualification of the anechoic chamber is judged by the measurement of the sound pressure drop with the distance from the source. Measurements are made by using several acoustic sources for different frequency bands. The aim of this thesis is to design and construct acoustics sources, which are useful for testing the properties and qualification of anechoic and hemi anechoic chambers.

## **Key words**

Reference sound source, omnidirectional sound source, point sound source, pulsing sphere (acoustic twin), half-space radiator, cylindrical horn, conical horn, free acoustics field verify, Thiele – Small parameters, directivity of speaker, Anechoic and hemi-anechoic chambers qualification...

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 24.5.2018

Luděk Folkman

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Oldřichovi Turečkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>1 SLEDOVANÉ POŽADAVKY V BEZODRAZOVÝCH A V POLOBEZODRAZOVÝCH KOMORÁCH S ODRAZIVOU ROVINOU.</b> .....	<b>13</b>
<b>2 POŽADAVKY NOREM NA ZKUŠEBNÍ ZDROJE</b> .....	<b>15</b>
2.1 OBECNÉ POŽADAVKY .....	15
2.2 POŽADAVKY NA DYNAMIKU .....	15
2.3 POŽADAVKY NA ZAPOJENÍ REPRODUKTORŮ ZDROJE .....	16
2.4 POŽADAVKY NA SMĚROVOST ZKUŠEBNÍHO ZDROJE: .....	17
2.5 POŽADAVKY NA ČASOVOU STABILITU ZDROJE.....	17
2.6 POŽADAVKY NA SPEKTRÁLNÍ VLASTNOSTI DLE [3].....	17
2.7 POŽADAVKY NA SMĚROVÝ INDEX.....	17
2.8 POŽADAVKY NA UMÍSTĚNÍ ZDROJE: .....	18
2.9 POŽADAVKY NA VELIKOST ZDROJE:.....	18
2.9.1 Zdroje pro frekvence do 800 Hz.....	18
2.9.2 Zdroje pro frekvence do 10 kHz.....	18
2.9.3 Zdroje pro frekvence nad 10 kHz dle [1] a [2].....	18
<b>3 IDEOVÁ KONCEPCE REFERENČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>19</b>
3.1 HALF – POLYHEDRON .....	19
3.2 POLYHEDRON .....	19
3.3 AKUSTICKÉ DVOJČE (PULZUJÍCÍ KOULE) .....	21
3.4 POLOPROSTOROVÝ ZÁŘIČ .....	21
3.5 TLAKOVÝ REPRODUKTOR NAVÁZANÝ DO VÁLCOVÉHO ZVUKOVODU .....	22
3.6 REFERENČNÍ ZDROJ AKUSTICKÉHO VÝKONU.....	23
<b>4 ORIENTAČNÍ ZKOUŠKY VYBRANÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>24</b>
4.1 ORIENTAČNÍ ZKOUŠKY AKUSTICKÉHO DVOJČETE .....	24
4.1.1 Akustické dvojčete spojené šrouby s nastavitelnou neutěsněnou mezerou.....	25
4.1.2 Měření akustického dvojčete s reproduktory s uzavřenou ozvučnicí .....	28
4.2 ORIENTAČNÍ ZKOUŠKY POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE.....	30
4.2.1 Poloprostorový zářič o objemu 0,8 l.....	31
4.2.2 Poloprostorový zářič o objemu 5 l.....	34
4.3 ORIENTAČNÍ VÝPOČET SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU .....	36
4.3.1 Porovnání směrových charakteristik kmitajícího pístu se směrovými charakteristikami kuželovité membrány reálného reproduktoru .....	38
4.4 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ .....	39
<b>5 NÁVRH ZDROJŮ ZVUKU</b> .....	<b>40</b>
5.1 VÝPOČET FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU V UZAVŘENÉ OZVUČNICI Z T-S PARAMETRŮ A NÁHRADNÍHO SCHÉMATU REPRODUKTORU .....	40
5.1.1 Parametry reproduktoru .....	40
5.1.2 Odvození náhradního schématu reproduktoru.....	41



5.1.3	Náhradní schéma reproduktoru v uzavřené ozvučnici.....	44
5.2	NÁVRH AKUSTICKÉHO DVOJČETE PRO PÁSMO 100 Hz AŽ 2 kHz .....	47
5.2.1	Výpočet minimálního objemu mezi reproduktory.....	48
5.2.2	Určení optimálního objemu mezi reproduktory .....	48
5.2.3	Výběr reproduktoru pro akustické dvojče .....	49
5.3	NÁVRH POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE PRO PÁSMO 100 Hz AŽ 2 kHz .....	53
5.3.1	Výpočet minimálního objemu uzavřené ozvučnice.....	54
5.3.2	Určení optimálního objemu mezi reproduktory .....	54
5.3.3	Výběr reproduktoru pro poloprostorový zářič .....	54
5.4	NÁVRH ZVUKOVODOVÉHO ZDROJE.....	59
5.4.1	Odvození impedance cylindrického vlnovodu konečné délky.....	59
5.4.2	Odvození impedance kónického vlnovodu konečné délky .....	60
5.4.3	Výběr tlakového reproduktoru pro vlnovod. ....	62
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>64</b>
	<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>

**Příloha A:** A-F charakteristiky dalších reproduktorů, vyhodnocovaných v rámci výběru reproduktorů pro konstrukci akustického dvojčete

**Příloha B:** A-F charakteristiky dalších reproduktorů, vyhodnocovaných v rámci výběru reproduktoru pro konstrukci poloprostorového zářiče

**Příloha C:** Odvození vlnové impedance cylindrického vlnovodu

**Příloha D:** Odvození vlnové impedance kónického vlnovodu

## Seznam tabulek

TAB. 1.1:	MAXIMÁLNÍ POVOLENÁ ODCHYLKA ZMĚŘENÝCH HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU OD TEORETICKÝCH HLADIN PODLE ZÁKONA POKLESU .....	14
TAB. 2.1:	PŘÍPUSTNÉ ODCHYLKY SMĚROVOSTI ZKUŠEBNÍHO ZDROJE .....	17
TAB. 2.2:	MAXIMÁLNÍ HODNOTA SMĚRODATNÉ ODCHYLKY HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU REFERENČNÍHO ZDROJE ZVUKU, KTERÝ ODPOVÍDÁ NORMĚ ČSN ISO 6926, V OPAKOVATELNÝCH PODMÍNKÁCH.....	17
TAB. 2.3:	MAXIMÁLNÍ ODCHYLKA MEZI SOUSEDNÍMI TŘETINOOKTÁVOVÝMI PÁSMY.....	17
TAB. 5.1:	LIMITUJÍCÍ PARAMETRY REPRODUKTORU 4NDS34.....	55
TAB. 5.2:	LIMITUJÍCÍ PARAMETRY REPRODUKTORU WF 130 ND .....	56
TAB. 5.3:	LIMITUJÍCÍ PARAMETRY REPRODUKTORU NTR06-1705D .....	57
TAB. 5.4:	LIMITUJÍCÍ PARAMETRY REPRODUKTORU 35NDF26 .....	58

## Seznam obrázků

OBR. 3.1.1: AKUSTICKÝ ZDROJ NORSONIC NOR275 .....	19
OBR. 3.2.1: AKUSTICKÝ ZDROJ NORSONIC NOR276 .....	20
OBR. 3.2.2: PŘÍKLAD ZDROJE TYPU IKOSAEDRON S DVACETI REPRODUKTORY .....	20
OBR. 3.3.1: ILUSTRÁČNÍ NÁČRTEK AKUSTICKÉHO DVOJČETE .....	21
OBR. 3.4.1: ILUSTRÁČNÍ NÁČRTEK POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE .....	21
OBR. 3.6.1: REFERENČNÍ ZDROJ AKUSTICKÉHO VÝKONU FIRMY BRÜEL & KJAER .....	23
OBR. 4.1.1: ILUSTRÁČNÍ NÁKRES AKUSTICKÉHO DVOJČETE SPOJENÉHO ŠROUBY S NASTAVITELNOU MEZEROU .....	25
OBR. 4.1.2: A-F CHARAKTERISTIKY AKUSTICKÉHO DVOJČETE S NEUTĚSNĚNOU NASTAVITELNOU MEZEROU MĚŘENÉ V OSE ZDROJE .....	25
OBR. 4.1.3: A-F CHARAKTERISTIKY AKUSTICKÉHO DVOJČETE S NEUTĚSNĚNOU NASTAVITELNOU MEZEROU MĚŘENÉ V OSE MEZERY .....	26
OBR. 4.1.5: VYBRANÉ RELATIVNÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY PRO AKUSTICKÉ DVOJČE S NEUTĚSNĚNOU MEZEROU 10 MM .....	27
OBR. 4.1.6: ILUSTRÁČNÍ FOTO AKUSTICKÉHO DVOJČETE S UTĚSNĚNOU MEZEROU .....	28
OBR. 4.1.7: NAMĚŘENÉ A-F CHARAKTERISTIKY AKUSTICKÉHO DVOJČETE S UZAVŘENOU OZVUČNICÍ .....	28
OBR. 4.1.8: SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY HLUKU VYDÁVANÉHO TOČNOU .....	29
OBR. 4.1.9: RELATIVNÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY UTĚSNĚNÉHO AKUSTICKÉHO DVOJČETE PRO FREKVENCE 100 – 320 Hz .....	29
OBR. 4.1.10: RELATIVNÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY UTĚSNĚNÉHO AKUSTICKÉHO DVOJČETE PRO FREKVENCE 400 – 1250 Hz .....	30
OBR. 4.2.1: ILUSTRÁČNÍ FOTO POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE O OBJEMU 0,8 L .....	31
OBR. 4.2.2: A-F CHARAKTERISTIKY POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE O OBJEMU 0,8 L .....	31
OBR. 4.2.3: RELATIVNÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE O OBJEMU 0,8 L .....	32
OBR. 4.2.4: RELATIVNÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE O OBJEMU 0,8 L .....	32
OBR. 4.2.5: RELATIVNÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE O OBJEMU 0,8 L .....	33
OBR. 4.2.6: RELATIVNÍ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE O OBJEMU 0,8 L .....	33
OBR. 4.2.7: ILUSTRÁČNÍ FOTO POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE O OBJEMU 5 L .....	34
OBR. 4.2.8: A-F CHARAKTERISTIKY POLOPROSTOROVÉHO ZÁŘIČE O OBJEMU 5 L .....	34
OBR. 4.3.1: RELATIVNÍ CHARAKTERISTIKY PŘI MEMBRÁNĚ O PRŮMĚRU 10 CM .....	36
OBR. 4.3.2: RELATIVNÍ CHARAKTERISTIKY PŘI MEMBRÁNĚ O PRŮMĚRU 8 CM .....	37
OBR. 4.3.3: NAMĚŘENÉ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU W 100 S UDÁVANÉ VÝROBCEM .....	38
OBR. 4.3.4: VYPOČÍTANÉ SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY KMITAJÍCÍHO PÍSTU O PRŮMĚRU 10 CM PRO RŮZNÉ FREKVENCE .....	38
OBR. 5.1.1: ANALOGICKÉ SCHÉMA ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU .....	42
OBR. 5.1.2: ANALOGICKÉ SCHÉMA ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU VČ. VYZAŘOVACÍ IMPEDANCE .....	42
OBR. 5.1.3: NÁHRADNÍ SCHÉMA ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU PLNĚ PŘEVEDENÉ NA ELEKTRICKOU STRANU .....	42
OBR. 5.1.5: PŘÍKLAD A-F CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU V UZAVŘENÉ OZVUČNICI O OBJEMU $V_B$ .....	46
OBR. 5.1.4: NÁHRADNÍ SCHÉMA ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU V UZAVŘENÉ OZVUČNICI PLNĚ PŘEVEDENÉ NA ELEKTRICKOU STRANU .....	46
OBR. 5.2.1: ODHAD SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY AKUSTICKÉHO DVOJČETE PRO PRŮMĚR MEMBRÁN 8 CM, FREKVENCI 2 KHz, A PŘI TĚSNÉ BLÍZKOSTI DVOU REPRODUKTORŮ OTOČENÝCH O 180° .....	47
OBR. 5.2.2: REPRODUKTOR W 130 X - ILUSTRÁČNÍ FOTO .....	50
OBR. 5.2.3: A-F CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU W 130 X PRO $V_{MIN}$ A $V_{OPT}$ .....	50
OBR. 5.2.4: REPRODUKTOR 4NDS34 – ILUSTRÁČNÍ FOTO .....	51
OBR. 5.2.5: A-F CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU 4NDS34 PRO $V_{MIN}$ A $V_{OPT}$ .....	51
OBR. 5.2.6: REPRODUKTOR W 130 ND - ILUSTRÁČNÍ FOTO .....	52
OBR. 5.2.7: A-F CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU W 130 ND PRO $V_{MIN}$ A $V_{OPT}$ .....	52
OBR. 5.3.1: SNÍŽENÝ A ROZŠÍŘENÝ AKUSTICKÝ ZÁŘIČ SE ZVĚTŠENÝM OBJEMEM .....	53
OBR. 5.3.2: A-F CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU 4NDS34 PRO $V_{MIN}$ A $V_{OPT}$ .....	55
OBR. 5.3.3 - A-F CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU WF 130 ND PRO $V_{MIN}$ A $V_{OPT}$ .....	56
OBR. 5.3.4: REPRODUKTOR NTR06-1705D - ILUSTRÁČNÍ FOTO .....	57
OBR. 5.3.5: A-F CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU NTR06-1705D PRO $V_{MIN}$ A $V_{OPT}$ .....	57
OBR. 5.3.6: REPRODUKTOR 35NDF26 - ILUSTRÁČNÍ FOTO .....	58
OBR. 5.3.7: A-F CHARAKTERISTIKY REPRODUKTORU 35NDF26 PRO $V_{MIN}$ A $V_{OPT}$ .....	58
OBR. 5.4.1: SPOJENÍ KÓNICKÉHO A CYLINDRICKÉHO VLNOVODU .....	59
OBR. 5.4.2 – ILUSTRÁČNÍ NÁKRES KÓNICKÉHO VLNOVODU .....	61

## Seznam symbolů a zkratek

$A-F$	Amplitudová - frekvenční
$d$	Šířka mezery ( $m$ )
$f$	Frekvence ( $Hz$ )
$f_r$	Rezonanční frekvence reproduktoru v ozvučnici ( $Hz$ )
$f_d$	Dolní mezní frekvence reproduktoru v ozvučnici ( $Hz$ ), udávaná pro pokles o 3 dB
$ka$	Vlnočet
$L_p$	Hladina akustického tlaku ( $dB$ )
$m_{AP}$	Vyzařovací hmotnost spolukmitajícího sloupce vzduchu. ( $kg/m^4$ )
$R_{AP}$	Vyzařovací odpor spolukmitajícího sloupce vzduchu. ( $kg/s \times m^4$ )
$Q$	Činitel směrovosti (-)
$S_{vpr}$	Průřez vnější hrany reproduktoru ( $m^2$ )
$u_0$	Akustická rychlost ( $m/s$ )
$V_b$	Objem uzavřené ozvučnice ( $m^3$ )
$V_{min}$	Minimální objem uzavřené ozvučnice ( $m^3$ )
$V_m$	Objem mezery mezi reproduktory, mezi reproduktorem a stěnou ozvučnice ( $m$ )
$V_d$	Objem „kuželu“ membrány reproduktoru ( $m^3$ )
$c_0$	Rychlost zvuku ve vzduchu při 20 °C (= 343 m/s)
$P_0$	Normální akustický tlak. (=101000 Pa)
$Z_0$	Vlnová impedance vzduchu ( $\Omega$ )
$\lambda$	Vlnová délka ( $m$ )
$\delta$	Rezerva ( $m$ )
$\kappa$	Poissonova konstanta. (=1,4)
$\rho$	Hustota vzduchu při 20 °C (= 1,205 kg/m <sup>3</sup> )
$d_{poč}$	Vstupní průměr vlnovodu ( $m$ )
$d_{konc}$	Výstupní průměr vlnovodu ( $m$ )

## Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí akustických zdrojů pro ověřování volného akustického pole, tedy zdrojů vhodných pro ověřování způsobnosti bezodrazových a polobezodrazových komor s odrazivou rovinou ve frekvenčním pásmu  $100\text{ Hz}$  až  $8\text{ kHz}$ . Vznik této práce byl podmíněn potřebou ověřovat vlastnosti bezodrazových či polobezodrazových místností a nedostatkem takových zdrojů na trhu. Práce vznikla také s ohledem na fakt, že v České republice bylo publikováno na téma návrhu a konstrukce akustických zdrojů pro ověřování volného akustického pole pouze nepatrné množství článků.

V úvodu této práce jsou shrnuty sledované parametry v bezodrazových, či polobezodrazových komorách a základní požadavky na zkušební zdroje. Následuje popis ideových koncepcí a orientační zkoušky vybraných zkušebních zdrojů, které mají za cíl ověřit, zda mají vybrané konstrukční varianty potenciál fungovat a jakým parametrům při konstrukci zkušebních zdrojů věnovat zvýšenou pozornost. V závěru práce jsou popsány postupy návrhu akustického dvojčete, poloprostorového zářiče a válcového a kónického vlnovodu, včetně výběru vhodných reproduktorů.

# 1 Sledované požadavky v bezodrazových a v polobezodrazových komorách s odrazivou rovinou.

Smyslem bezodrazových, případně polobezodrazových komor s odrazivou rovinou je snaha nasimulovat podmínky volného akustického pole, kde dochází k volnému šíření zvuku bez jeho odrazů. S volným akustickým polem je pevně vázán zákon poklesu akustického tlaku, kterého se při ověřování volného akustického pole využívá. Problematiku postupu hodnocení bezodrazových a polobezodrazových místností řeší dvě normy.

Jde o [1] – příloha A, [2]. Obě tyto normy specifikují:

- požadavky na přístroje a měřicí vybavení
- požadavky na zkušební zdroj zvuku
- umístění zdroje zvuku
- dráhy pohybu mikrofonů
- postup zkoušky

Veškerý následující text kapitoly 1 je výtah z norem [1] a [2]. Tyto normy dále popisují metodu měření parametrů způsobilosti volného zvukového pole, která je založena na porovnání prostorového poklesu akustického tlaku generovaného zkušebním zdrojem a akustického tlaku, který by se vyskytoval v ideálním volném akustickém poli. Dle [2] je odhad hladin akustického tlaku prováděn na základě zákona poklesu, pomocí rovnice 1.1.

$$\Delta L_{pi} = b - 20 \times \log_{10} \left( \frac{r_i}{r_0} \right) \text{ dB} \quad (1.1)$$

Kde:

$r_i$  je vzdálenost místa měření  $i$  od akustického středu zdroje zvuku, vyjádřená v metrech ( $m$ )

$r_0$  je referenční hodnota,  $r_0 = 1m$

$b$  je parametr, který je nastaven tak, aby optimalizoval naměřené hladiny akustického tlaku do tolerančního pásma k maximalizování hodnocené vzdálenosti od zkušebního zdroje zvuku.

K určení  $b$  může být použit opakující se proces, jehož počáteční hodnota je dána vztahem dle [2]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N 20 \times \log_{10} \left( \frac{r_i}{r_0} \right) dB + \sum_{i=1}^N L_{pi}}{N} \quad (1.2)$$

Kde:

$L_{pi}$  je změřená hladina akustického tlaku v poloze měření  $i$ , vyjádřena v  $dB$ .

$N$  je počet poloh měření podél dráhy měření.

Výsledkem je odchylka od zákona poklesu, která se určí pomocí vztahu převzatého z [2]:

$$\Delta L_{pi} = L_{pi} - L_p(r_i) \quad (1.3)$$

Kde:

$\Delta L_{pi}$  je odchylka od zákona poklesu vyjádřena v  $dB$ .

$L_{pi}$  je změřená hladina akustického tlaku (korigovaná na stabilitu zdroje) v bodě měření  $i$ , vyjádřena v  $dB$ .

$L_p(r_i)$  je hladina akustického tlaku ve vzdálenosti  $r_i$ , odhadnutá dle zákona poklesu a vyjádřena v  $dB$ .

Dle [2] v prostoru, který je považován za bezodrazový, nebo polobezodrazový, nesmí odchylky naměřených hladin akustického tlaku od odhadu na základě zákona poklesu, včetně rozšířené nejistoty měření překročit hodnoty dané tabulkou **Tab. 2.1.1**, viz [2]:

Typ zkušebního prostředí	Třetinooktávové frekvenční pásmo (Hz)	Povolené odchylky (dB)
Bezodrazové	$\leq 630$	$\pm 1,5$
	800 až 5000	$\pm 1,0$
	$\geq 6300$	$\pm 1,5$
Polobezodrazové	$\leq 630$	$\pm 2,5$
	800 až 5000	$\pm 2,0$
	$\geq 6300$	$\pm 3,0$

**Tab. 1.1:** Maximální povolená odchylka změřených hladin akustického tlaku od teoretických hladin podle zákona poklesu

## 2 Požadavky norem na zkušební zdroje

O požadavcích na zkušební zdroje zvuku pojednávají normy [3], [2] a [1] v příloze A. Pro hodnocení způsobilosti se používá zdroj zvuku, který aproximuje bodový zdroj zvuku ve sledovaném frekvenčním rozsahu. Veškerý text kapitoly 2 je výtah z norem [1], [2] a [3].

### 2.1 Obecné požadavky

Pro hodnocení způsobilosti se používá zdroj zvuku, který aproximuje bodový zdroj zvuku ve sledovaném frekvenčním rozsahu. Zdroj musí být:

- Kompaktní s identifikovatelným středem
- Relativně všesměrový
- Tak stabilní, aby se během měření podél dráhy mikrofonu neměnil vyzařovaný akustický výkon. Pokud stabilita zdroje kolísá o více než  $0,2 \text{ dB}$ , je nutné použít kontrolní mikrofon ke korekci.

### 2.2 Požadavky na dynamiku

Zdroj by měl být schopný vyzařovat dostatečný akustický výkon zajišťující ve všech bodech a na každé dráze mikrofonu ve sledovaném frekvenčním rozsahu hladiny akustického tlaku s odstupem alespoň  $10 \text{ dB}$  nad hladinou akustického tlaku hluku pozadí. Tento požadavek může být obtížné dodržet především ve velkých bezodrazových komorách. Vycházejme ze vztahu 2.1.

$$L_p = L_0 + 10 \times \log_{10} \left( \frac{Q}{4\pi r^2} \right) \quad (2.1)$$

Kde:

$L_p$  je výsledná hladina akustického tlaku

$L_0$  je hladina akustického tlaku v místě zdroje

$Q$  je činitel směrovosti (pro šíření všemi směry  $Q = 1$ )

$r$  je vzdálenost od zdroje

Pokud chceme znát závislost hladiny akustického tlaku  $L_{pa}$  ve vzdálenosti  $r_a$  a hladinou akustického tlaku  $L_{pb}$  ve vzdálenosti  $r_b$ , lze po provedení matematických úprav rovnice 2.1 odvodit vzájemný vztah mezi těmito hladinami.

$$L_{pb} = L_{pa} + 20 \times \log_{10} \left( \frac{r_a}{r_b} \right) \quad (2.2)$$

Dá se pak ukázat, že s dvojnásobkem vzdálenosti od zdroje zvuku ( $r_b = 2 \times r_a$ ), klesá hladina akustického tlaku o 6 dB.

$$\begin{aligned} L_{pb} &= L_{pa} + 20 \times \log_{10} \left( \frac{r_a}{2r_a} \right) = L_{pa} + 20 \times \log_{10} \left( \frac{1}{2} \right) \\ &= L_{pa} - 6 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Pokud bychom např. měli bezodrazovou místnost o velikosti  $8 \times 8 \times 8$  metrů s hlukem pozadí 30 dB, musela by hladina akustického tlaku zdroje, umístěného uprostřed místnosti, mít ve vzdálenosti 4 m, tedy u zdi místnosti, hodnotu alespoň 40 dB. To znamená, že by zdroj musel vydávat zvuk s hladinou akustického tlaku alespoň 100 dB.

### 2.3 Požadavky na zapojení reproduktorů zdroje

Pokud zdroj zvuku obsahuje v jedné ozvučnici více reproduktorů, tak musí hrát ve fázi, nebo musí být jinak zajištěna rovnoměrná všesměrovost.



## 2.4 Požadavky na směrovost zkušebního zdroje:

Typ zkušební místnosti	Střední frekvence 1/3 oktávového pásma [Hz]	Přípustná odchylka směrovosti [dB]
Bezodrazová	≤ 630	±1,5
	800 až 5 000	±2,0
	6 300 až 10 000	±2,5
	> 10 000	±5,0
Polobezodrazová	≤ 630	±2,0
	800 až 5 000	±2,5
	6 300 až 10 000	±3,0
	> 10 000	±5,0

Tab. 2.1: Přípustné odchylky směrovosti zkušebního zdroje

Doporučuje se použít zdroj, který požadavky na směrovost splňuje ve vzdálenosti 0,5 m od akustického středu zkušebního zdroje. Zdroje mají tendenci být více všesměrové ve vzdálenějším poli a každý rozdíl ve směrovosti zdroje v blízkém a vzdáleném poli ztěžuje určování způsobnosti zkušební místnosti. [2]

## 2.5 Požadavky na časovou stabilitu zdroje

Dle [3] musí být referenční zdroj zvuku navržen a zkonstruován tak, aby jeho hladina akustického výkonu za opakovatelných podmínek byla v každém 1/3 oktávovém pásmu konstantní v čase a v mezích uvedených v tabulce **Tab. 2.2**.

Kmitočtový rozsah [Hz]	Směrodatná odchylka [dB]
50 až 80	0,8
100 až 160	0,4
200 až 20 000	0,2

Tab. 2.2: Maximální hodnota směrodatné odchylky hladiny akustického výkonu referenčního zdroje zvuku, který odpovídá normě ČSN ISO 6926, v opakovatelných podmínkách

## 2.6 Požadavky na spektrální vlastnosti dle [3]

Pásmo	Max. odchylka mezi sousedními 1/3 oktávovými pásmy v daném rozsahu	Rozsah 1/3 oktávových pásem mimo daný rozsah
100 Hz až 10 kHz	± 3 dB	± 12 dB
Větší rozsah	± 4 dB	± 16 dB

Tab. 2.3: Maximální odchylka mezi sousedními třetinooktávovými pásmy

## 2.7 Požadavky na směrový index

Nejvyšší hodnota směrového indexu v libovolném 1/3 oktávovém pásmu se středním kmitočtem mezi 100 Hz až 10 kHz nesmí přesáhnout + 6 dB, je-li měření provedeno v polobezodrazové místnosti vyhovující kapitole 7 normy ČSN ISO 6926. [3]

## 2.8 Požadavky na umístění zdroje:

V bezodrazové místnosti se zdroj umísťuje svým akustickým středem do geometrického středu místnosti. V polobezodrazové místnosti se zdroj umísťuje do dutiny v podlaze, pokud tam je, nebo na podlahu s podmínkou, že akustický střed referenčního zdroje je maximálně 15 cm nad odrazivou rovinou. A pokud to lze, tak akustický střed zdroje se má umístit v rozmezí  $\lambda/10$  nad odrazivou rovinu.

## 2.9 Požadavky na velikost zdroje:

Je třeba brát v úvahu, že akustický tlak se začíná měřit již ve vzdálenosti 50 cm od akustického středu zdroje. Velikost a koncepce zdroje je definována pro každé pásmo zvlášť:

### 2.9.1 Zdroje pro frekvence do 800 Hz

Dle [1] je možné použití zdrojů popsaných v normě ČSN ISO 140-3. [38]. Požadavky na směrovost jsou v [1] i ve [38] v pásmu do 800 Hz totožné.

Norma [2] připouští v rozsahu do 800 Hz použití kročejoyých zdrojů zvuku popsaných v normě ČSN ISO 10140-5. [39]

Další možností je použití elektrodynamického reproduktoru v uzavřené ozvučnici s rozměry menšími, než je desetina vlnové délky.

### 2.9.2 Zdroje pro frekvence do 10 kHz

Dle [1] je v pásmu do 10 kHz přípustný jako vhodný zdroj tlakový reproduktor připojený ke zužující se válcovité trubici. Doporučuje se, aby při použití nad frekvenci 4 kHz měla trubice výstupní průměr menší než 10 mm a délku až 1,5 m. Na nižších frekvencích je přípustný větší průměr trubice.

### 2.9.3 Zdroje pro frekvence nad 10 kHz dle [1] a [2]

Dle [1] a [2] je pro frekvence do 20 kHz dovolen jako vhodný zdroj tlakový měnič, připojený k válcovému zvukovodu. Zvukovod musí mít délku 1,5 m a výstupní průměr 6 mm. Pro použití na nižších frekvencích je přijatelná kratší trubice a širší průměr zvukovodu.

### 3 Ideová koncepce referenčních zdrojů

Pro každý typ místnosti a pro každé frekvenční pásmo je vhodné použít jiný typ zdroje. Zároveň je však snaha minimalizovat počet použitých zdrojů, aby mohlo být měření co nejvíce zjednodušeno.

#### 3.1 Half – Polyhedron

V zásadě se jedná o akustický zdroj zvuku zajišťující uniformní polokulové vyzařování, vhodný zejména pro použití v polobezodrazových místnostech s odrazivou rovinou. Zdroj na **Obr. 3.1.1** od firmy Norsonic je určen pro frekvenční pásmo od  $100\text{ Hz}$  do  $5\text{ kHz}$  a odpovídá [38]. Dle [1] je přípustné takový zdroj použít v pásmu *do*  $800\text{ Hz}$ . Reprodukory jsou zapojeny ve fázi a počet stěn a reproduktorů takového zdroje se může lišit s ohledem na použití zdroje.



**Obr. 3.1.1:** Akustický zdroj Norsonic Nor275 - dostupný z [39]

#### 3.2 Polyhedron

Kompletní polyhedron zajišťuje kulové vyzařování a je vhodný pro bezodrazové místnosti. Počet stěn a reproduktorů zapojených ve fázi se opět může lišit s ohledem na použití zdroje. Je možné vyrobit zdroj např. o dvou, šesti, dvanácti, ale až třeba dvaceti stěnách a reproduktorech v nich. Obecně platí, že čím více stěn, tím lepší aproximace kulové vyzařovací plochy pro vyšší frekvence. Zdroj tohoto typu je určen převážně pro nízké až střední frekvence a jeho nevýhoda tkví především ve velikosti. Jelikož dle [1] a [2] se začíná akustický tlak měřit ve vzdálenosti  $0,5\text{ m}$  od akustického středu zdroje, musí být tedy

zajištěna požadovaná směrovost. Na obrázku **Obr. 3.2.1** je zdroj firmy Norsonic, který rovněž odpovídá [38]. Více informací o polyhedronech je uvedeno v literatuře [24] až [29]. Na obrázku **Obr. 3.2.2** je pak příklad ikosahedronu.



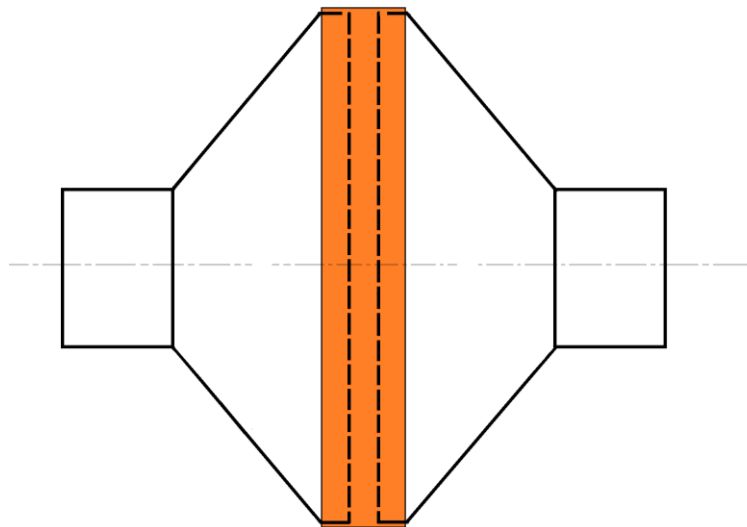
**Obr. 3.2.1:** Akustický zdroj Norsonic Nor276 – dostupný z [40]



**Obr. 3.2.2:** Příklad zdroje typu ikosahedron s dvaceti reproduktory – dostupný z [41]

### 3.3 Akustické dvojče (pulzující koule)

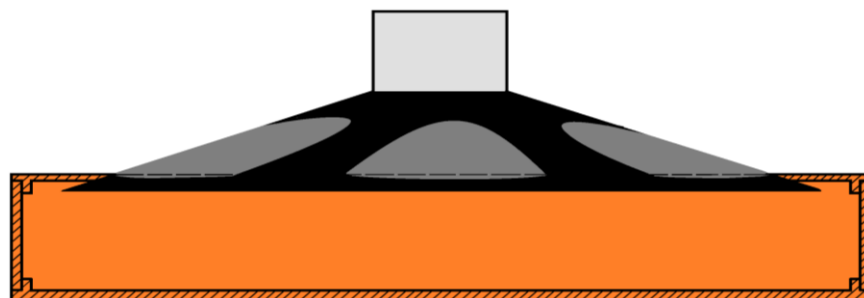
Ve své podstatě se jedná o dva reproduktory zapojené ve fázi a připevněné membránami k sobě tak, aby mezi membránami byl utěsněný prostor o vhodném, co možná nejmenším, objemu. Reproduktory tedy vyzařují zadní částí. Návrhu tohoto zdroje se podrobně věnuje kapitola 5.2. Tato koncepce zdroje je využívána pro frekvence do 2 kHz a pro bezodrazové komory.



Obr. 3.3.1: Ilustrační náčrtek akustického dvojčete

### 3.4 Poloprostorový zářič

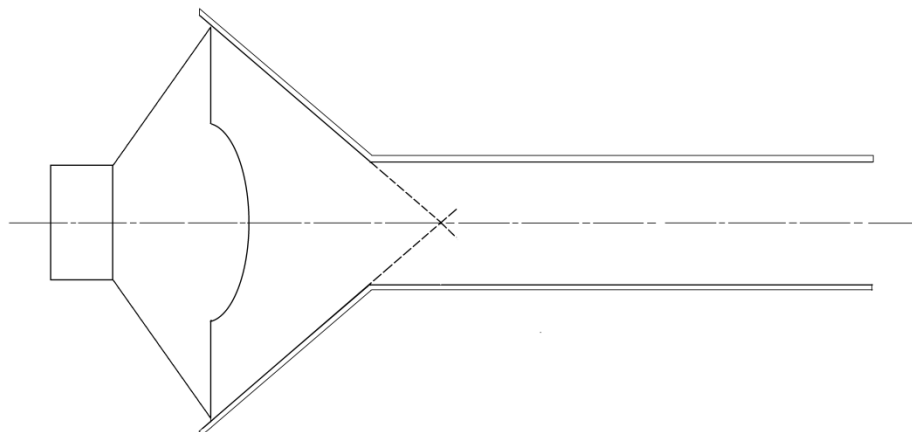
Jedná se o zdroj, který je určen pro polobezodrazové místnosti. Konstrukčně je proveden tak, že je zanořen svou přední částí do uzavřeného objemu a vyzařuje svou zadní částí. Je vhodný pro nízké frekvence, maximálně do 2 kHz. Návrhu tohoto zdroje se podrobně věnuje kapitola 5.3.



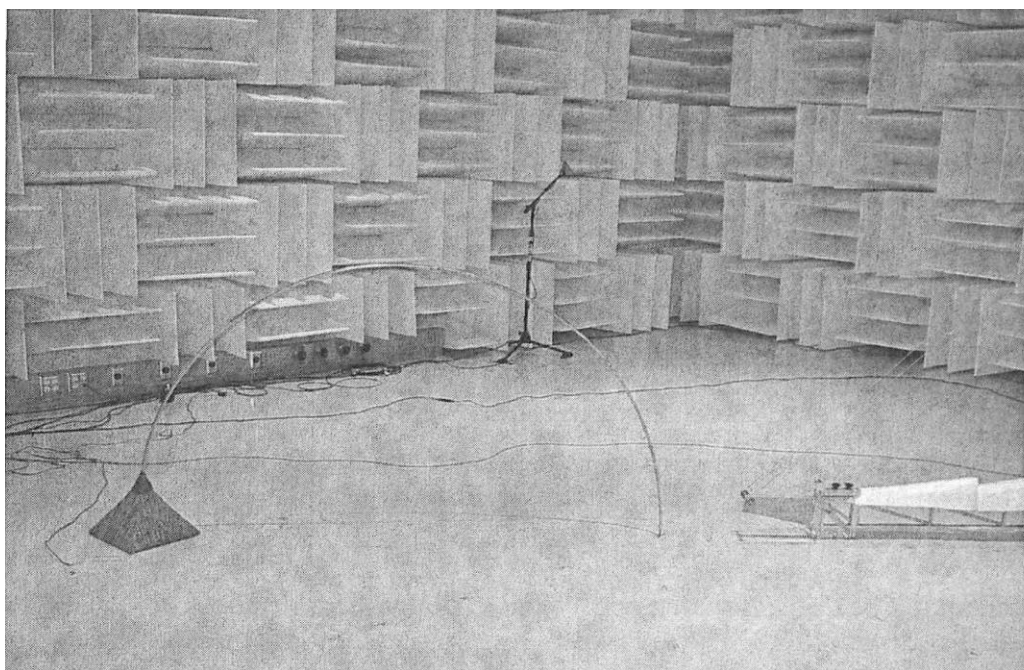
Obr. 3.4.1: Ilustrační náčrtek poloprostorového zářiče.

### 3.5 Tlakový reproduktor navázaný do válcového vlnovodu

Tato koncepce je vhodná pro oblasti vyšších kmitočtů, řádově až do 20 kHz. Je použitelný v bezodrazových i polobezodrazových komorách. V bezodrazové komoře se ústí vlnovodu umísťuje do geometrického středu místnosti, v polobezodrazové komoře se ústí vlnovodu umísťuje těsně nad a proti odrazivé rovině. Viz obrázek **Obr. 3.5.3**. Umístění ústí vlnovodu nad odrazivou rovinu je podrobněji popsáno v [4].



**Obr. 3.5.1:** Ilustrační náčrt tlakového reproduktoru navázaného do cylindrického vlnovodu pomocí zužující se části, tvořené kónickým vlnovodem.



**Obr. 3.5.2:** Příklad použití válcového vlnovodu v polobezodrazové komoře – dostupný z [4].





**Obr. 3.5.3:** Umístění ústí vlnovodu nad odrazivou rovinu v polobezodrazové místnosti

### 3.6 Referenční zdroj akustického výkonu

Tento zdroj pracuje na principu vytváření aerodynamického zvuku. Ve své podstatě se jedná o ventilátor, který rotuje konstantními otáčkami a generuje tak stabilní širokopásmový šum proudícím vzduchem. Výrobci udávají, že tento zdroj je použitelný v pásmu od  $100\text{ Hz}$  do  $20\text{ kHz}$ .



**Obr. 3.6.1:** Referenční zdroj akustického výkonu firmy Brüel & Kjær – dostupný také z [42]

## 4 Orientační zkoušky vybraných zdrojů

Cílem těchto experimentů je ověřit, zda vůbec a v jakém frekvenčním pásmu mají vybrané zdroje (akustické dvojče a poloprostorový zářič) potenciál fungovat. To znamená získat poznatky o směrovosti vybraných zdrojů a ověřit výhody či nevýhody různých konstrukčních variant vybraných zdrojů. Všechny charakteristiky uváděné v kapitole č. 4 byly měřeny ve vzdálenosti  $1m$  od prototypového zdroje zvuku. V kapitole č. 4 jsou povětšinou uváděny relativní směrové charakteristiky. Jedná se tedy o odchylky směrových charakteristik, nikoli přímo o změřené směrové charakteristiky. Veškeré relativní směrové charakteristiky uváděné v kapitole č. 4 byly měřeny multitónovým signálem. Veškeré naměřené amplitudové – frekvenční charakteristiky (*dále jen A-F charakteristiky*) v kapitole č. 4 jsou normovány na kmitočet  $1\text{ kHz}$  při výkonu  $1\text{ W}$ .

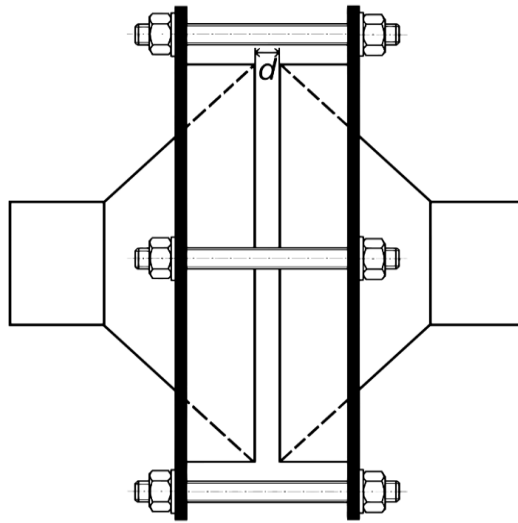
### 4.1 Orientační zkoušky akustického dvojčete

Cílem těchto orientačních zkoušek bylo ověřit, jaký vliv má šířka mezery mezi reproduktory na směrové charakteristiky a na reprodukci nízkých kmitočtů. Předpoklad je takový, že by mezera mezi reproduktory měla být co nejmenší, aby reproduktory byly co nejbližší k sobě a akustické dvojče tak mělo co nejmenší rozměry. Tím by měla být zajištěna lepší směrovost. Jelikož však použité reproduktory mají průměr membrány  $14\text{ cm}$ , robustní nosný koš a původně byly určeny pro automotive, nedají se očekávat nijak závratné výsledky. Pravděpodobně bude problém s reprodukcí nízkých kmitočtů a na vyšších frekvencích bude právě s ohledem na robustnost koše a velký průměr membrány zhoršená směrovost.



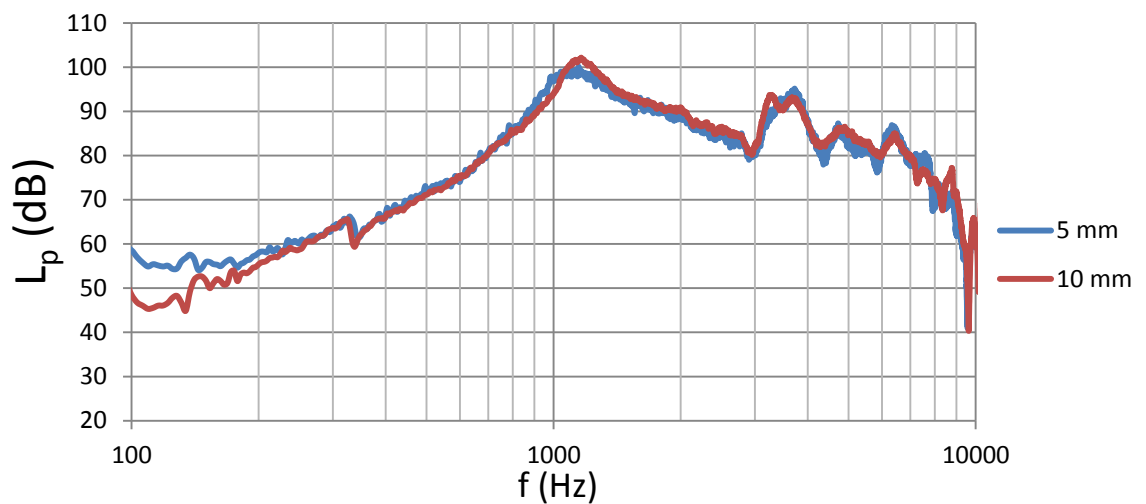
#### 4.1.1 Akustické dvojče spojené šrouby s nastavitelnou neutěsněnou mezerou

Pro sešroubované akustické dvojče byla provedena měření pro mezeru 1 cm a 0,5 cm.

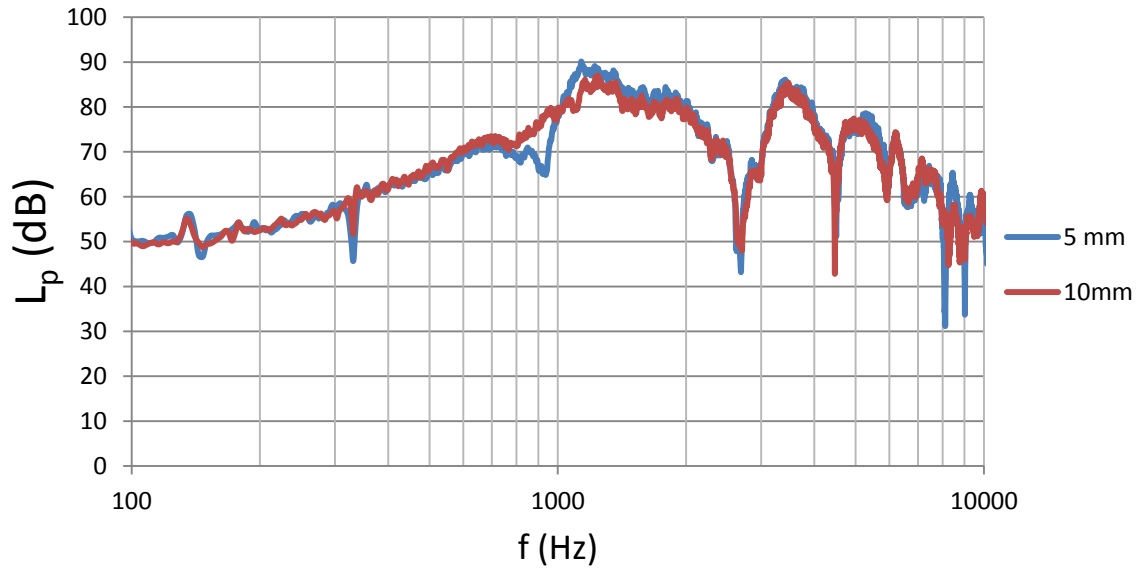


Obr. 4.1.1: Ilustrační nákres akustického dvojčete spojeného šrouby s nastavitelnou mezerou

##### 4.1.1.1 Naměřené A-F charakteristiky



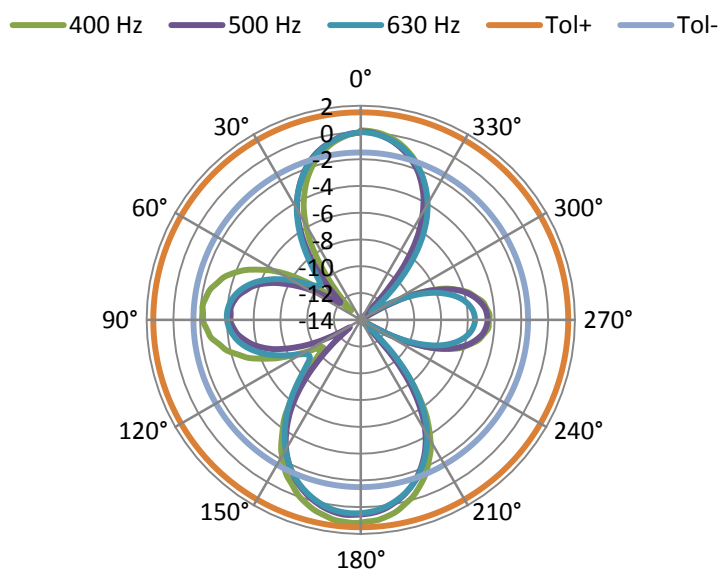
Obr. 4.1.2: A-F charakteristiky akustického dvojčete s neutěsněnou nastavitelnou mezerou měřené v ose zdroje



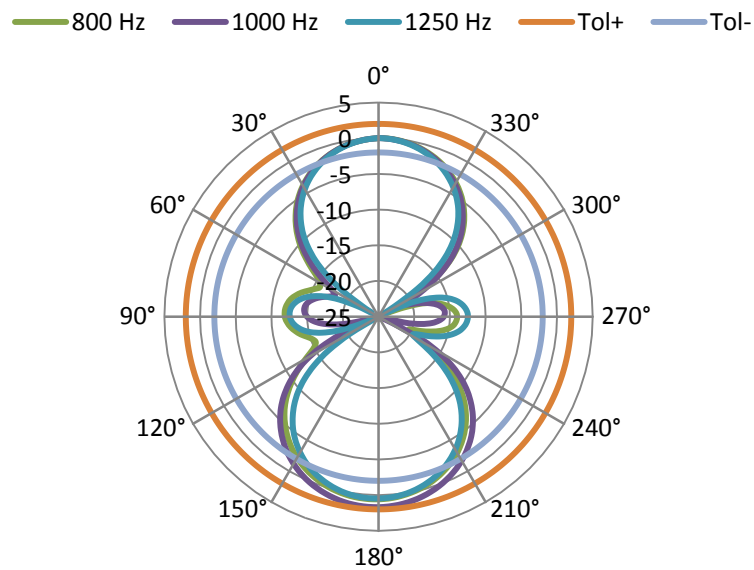
**Obr. 4.1.3:** A-F charakteristiky akustického dvojčete s neutěsněnou nastavitelnou mezerou měřené v ose mezery

Z naměřených A-F charakteristik je patrné, že se na nízkých frekvencích až do 400 Hz uplatňuje akustický zkrat. Konstrukci akustického dvojčete s neutěsněnou mezerou tedy není vhodné pro návrh zdroje použít. Z průběhů na obrázku **Obr. 4.1.3** dále vyplývá, že se zvuk ze zdroje pravděpodobně šíří i mezerou mezi reproduktory, což pravděpodobně bude kazit všesměrovost. V dalším pokusu bude nutné mezeru mezi reproduktory utěsnit a vytvořit tak ve své podstatě uzavřenou ozvučnici, společnou pro oba reproduktory.

#### 4.1.1.2 Naměřené relativní směrové charakteristiky



**Obr. 4.1.4:** Vybrané relativní směrové charakteristiky pro akustické dvojče s neutěsněnou mezerou 10 mm

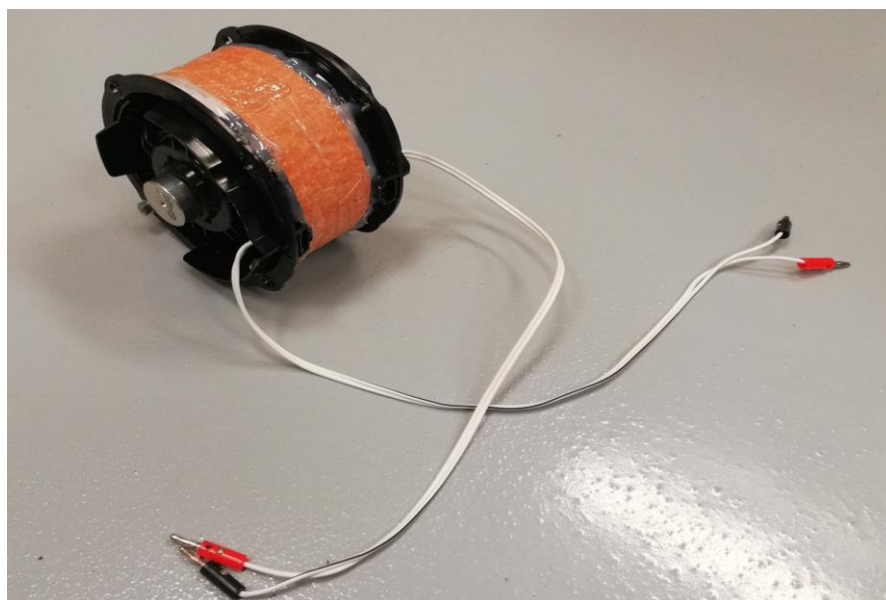


**Obr. 4.1.4:** Vybrané relativní směrové charakteristiky pro akustické dvojče s neutěsněnou mezerou 10 mm

Pro měření směrových charakteristik byl zvolen multitónový signál. Z vybraných směrových charakteristik vyplývá, že akustické dvojče s neutěsněnou mezerou není jako všesměrový zdroj vhodné použít. Při mezeře 5 mm je zdroj do frekvence 400 Hz v akustickém zkratu a nefunguje vůbec. Při mezeře 10 mm je rovněž zdroj do frekvence 400 Hz v akustickém zkratu a od 400 Hz se stává dvojče směrové. Vyzařuje nejen přední a zadní části, ale také boční mezerou. V následujícím pokusu bude muset být eliminován problém s akustickým zkratem a s postranním vyzařováním mezerou.

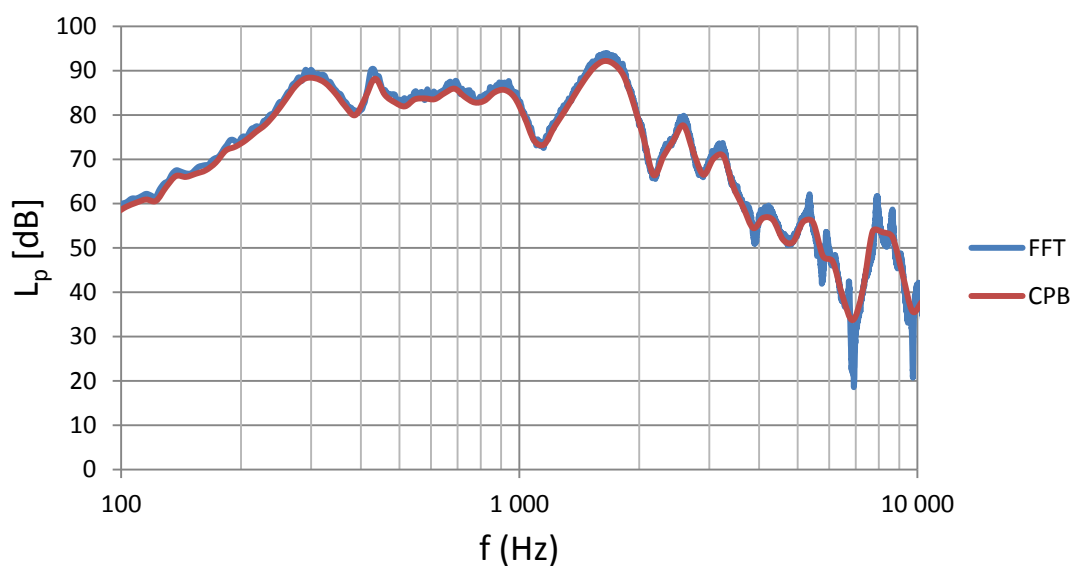
#### 4.1.2 Měření akustického dvojčete s reproduktory s uzavřenou ozvučnicí

Aby nedocházelo k akustickému zkratu a k bočnímu vyzařování, je mezera mezi reproduktory utěsněna a reproduktory tedy hrají do společného utěsněného objemu neboli do uzavřené ozvučnice o cca 0,5 litru.



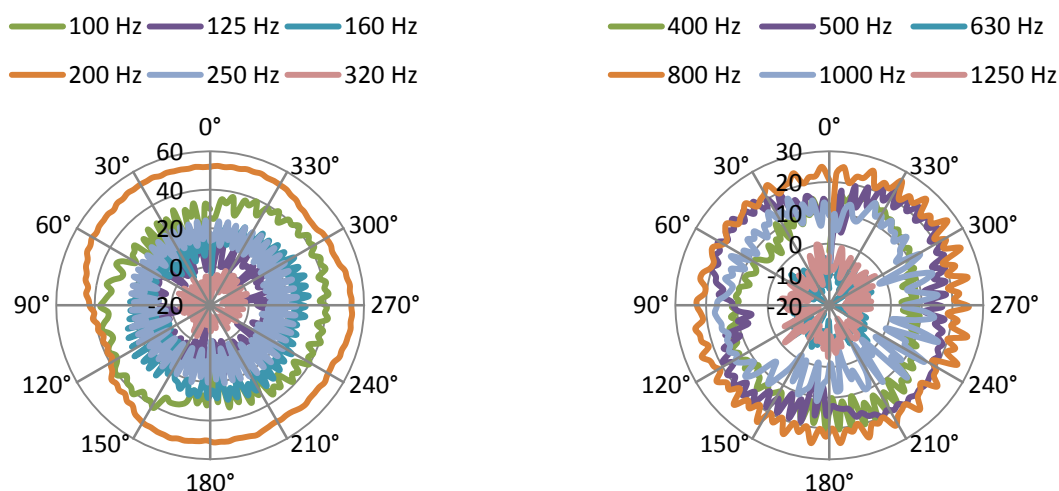
Obr. 4.1.5: Ilustrační foto akustického dvojčete s utěsněnou mezerou

##### 4.1.2.1 Naměřené A-F charakteristiky akustického dvojčete s uzavřenou ozvučnicí



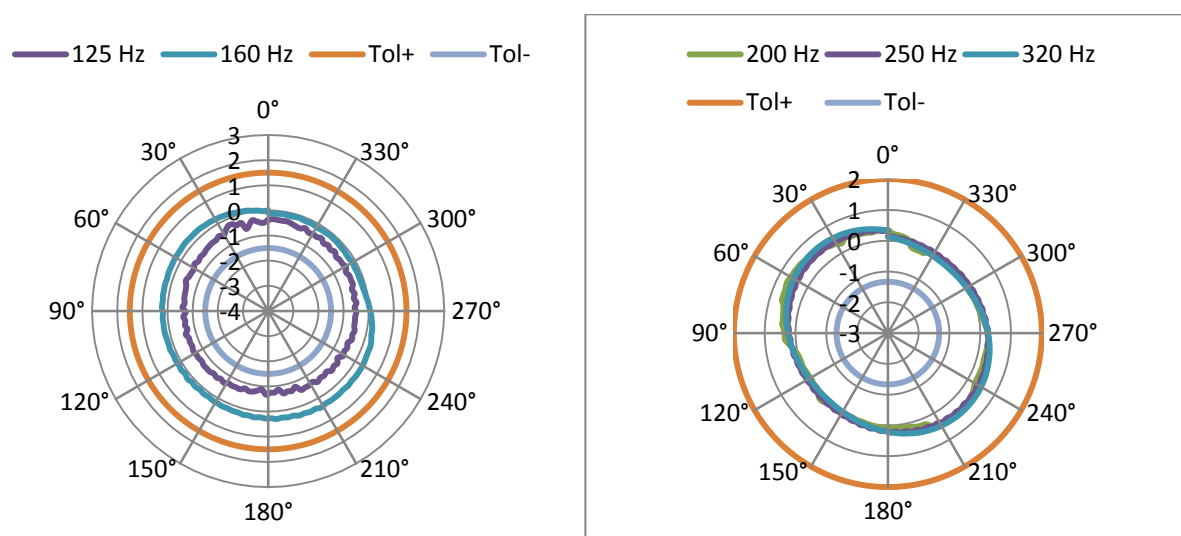
Obr. 4.1.6: Naměřené A-F charakteristiky akustického dvojčete s uzavřenou ozvučnicí

Na základě frekvenčních charakteristik z obrázku **Obr. 4.1.6** lze usoudit, že se utěsněním mezery podařilo eliminovat akustický zkrat, který na frekvencích do 400 Hz předtím vznikal. Hladina akustického tlaku se na frekvenci 100 Hz zvýšila téměř o 10 dB. Vlivem malého objemu a původního účelu reproduktorů je však hladina akustického tlaku pod frekvencí 250 Hz vůči zbytku charakteristiky relativně nízká. Navíc z obrázku **Obr. 4.1.7** lze usoudit, že směrové charakteristiky budou pravděpodobně až do frekvence 200 Hz ovlivněny hlukem točny. Pro názornou představu o hluku točny jsou na obrázku **Obr. 4.1.8** uvedeny skutečné změřené směrové charakteristiky točny.

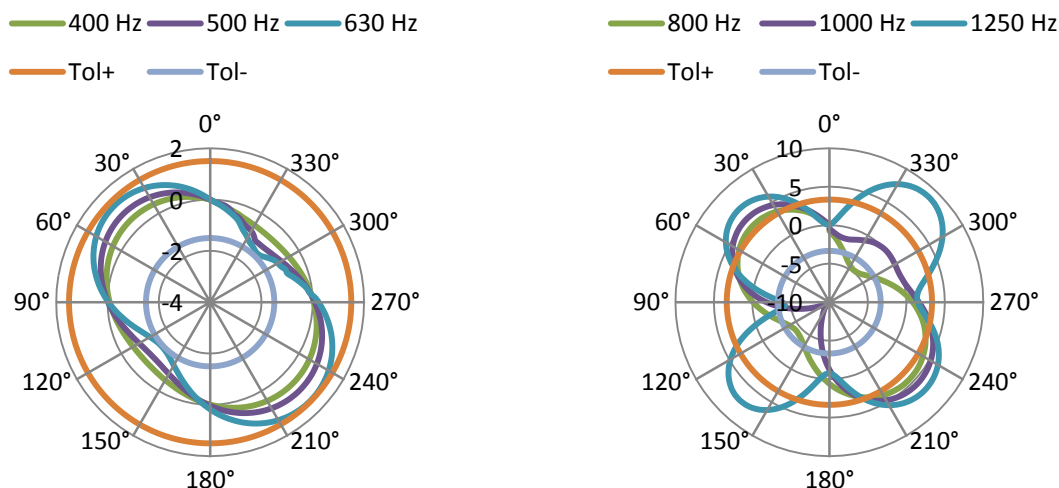


**Obr. 4.1.7:** Směrové charakteristiky hluku vydávaného točnou

#### 4.1.2.2 Naměřené relativní směrové charakteristiky akustického dvojčete s uzavřenou ozvučnicí



**Obr. 4.1.8:** Relativní směrové charakteristiky utěsněného akustického dvojčete pro frekvence 100 – 320 Hz



**Obr. 4.1.9:** Relativní směrové charakteristiky utěsněného akustického dvojčete pro frekvence 400 – 1250 Hz

Z uvedených relativních charakteristik vyplývá, že takto konstruované akustické dvojče může pracovat až do frekvence 630 Hz. Pokud však pro stavbu akustického dvojčete budou vybrány vhodné reproduktory s průměrem membrány menším než 8 cm, má akustické dvojče potenciál fungovat až do frekvence 2 kHz. Usuzuji tak z výpočtů provedených v kapitolách 4.3 a 5.2.

## 4.2 Orientační zkoušky poloprostorového zářiče

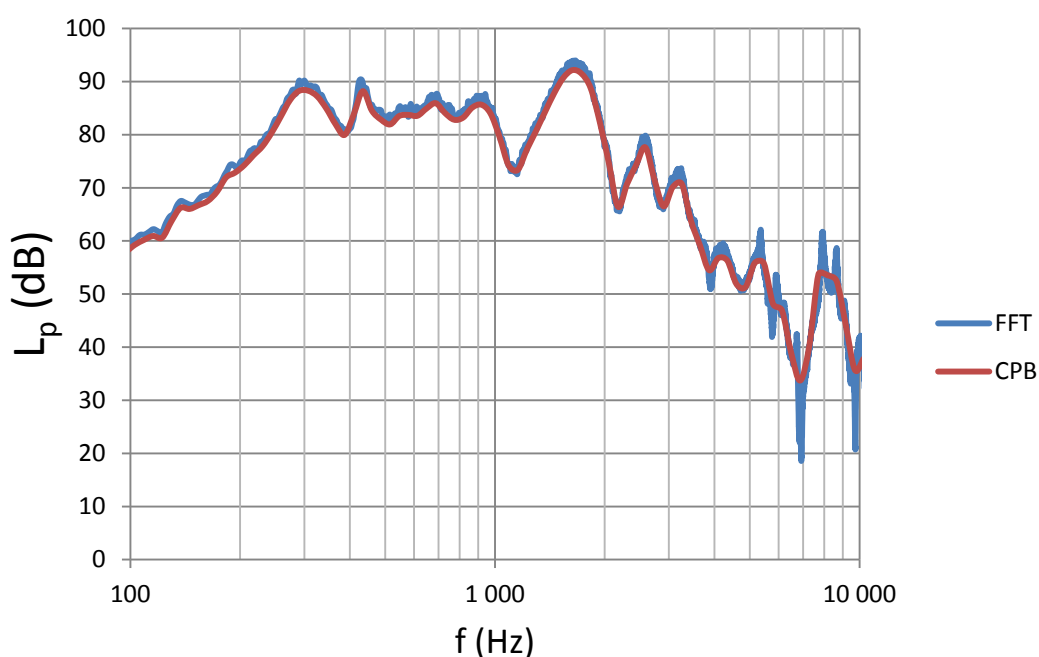
Cílem orientačních zkoušek poloprostorového zářiče je ověřit, jaký vliv má velikost objemu novodurové roury, v níž je reproduktor utěsněn, na směrovost a reprodukci nízkých kmitočtů. Dá se předpokládat, že s vyšším objemem takto vytvořené uzavřené ozvučnice, bude zdroj schopen lépe reprodukovat nižší kmitočty. Naproti tomu lze očekávat, že s rostoucí velikostí zdroje se bude horšit směrovost na vyšších frekvencích. Jelikož však použitý reproduktor má průměr membrány 19 cm, objemný nosný koš a původně byl určen pro automotive, dá se očekávat zhoršená směrovost na vyšších frekvencích. Naopak by reproduktor, rovněž vzhledem k velikosti membrány, nemusel mít problém s reprodukcí nízkých kmitočtů. Frekvenční a směrové charakteristiky poloprostorového zářiče byly postupně změřeny pro objemy 0,8 a 5 litrů.

#### 4.2.1 Poloprostorový zářič o objemu 0,8 l



Obr. 4.2.1: Ilustrační foto poloprostorového zářiče o objemu 0,8 l.

##### 4.2.1.1 Naměřené frekvenční charakteristiky poloprostorového zářiče

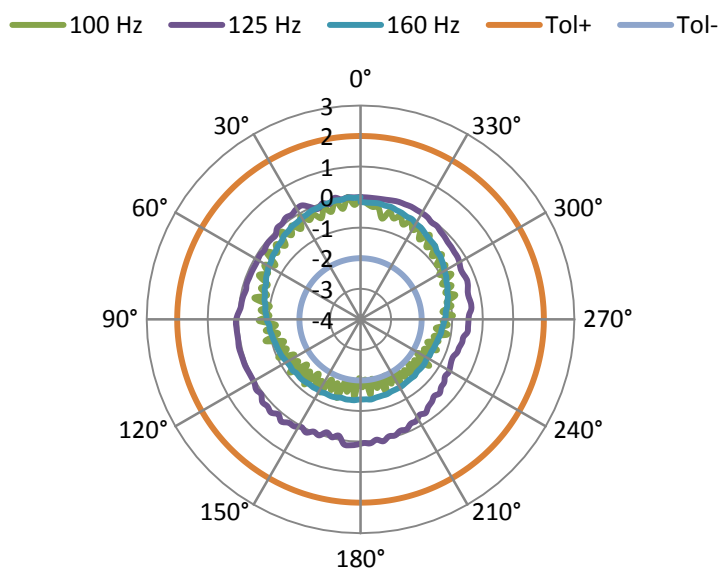


Obr. 4.2.2: A-F charakteristiky poloprostorového zářiče o objemu 0,8 l

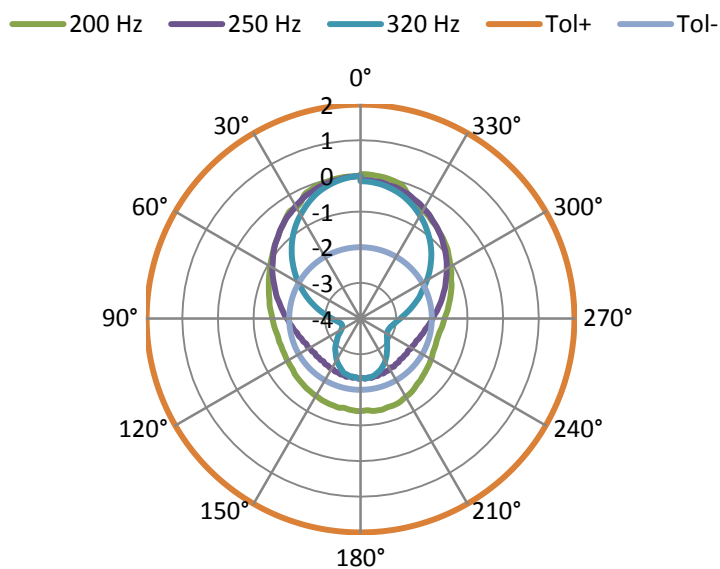
S ohledem na malý objem novodurové roury, která tvoří ozvučnici, a původní účel použitého reproduktoru je vůči zbytku frekvenční charakteristiky hladina akustického tlaku pod frekvencí 250 Hz relativně nízká. Opět lze z obrázku **Obr. 4.1.7** usoudit, že směrové charakteristiky mohou být až do frekvence 200 Hz deformovány vlivem hluku točny.

### 4.2.1.2 Naměřené relativní směrové charakteristiky poloprostorového zářiče

Vzhledem k faktu, že se jedná o poloprostorový zářič, je relevantní pouze horní polovina frekvenční charakteristiky!

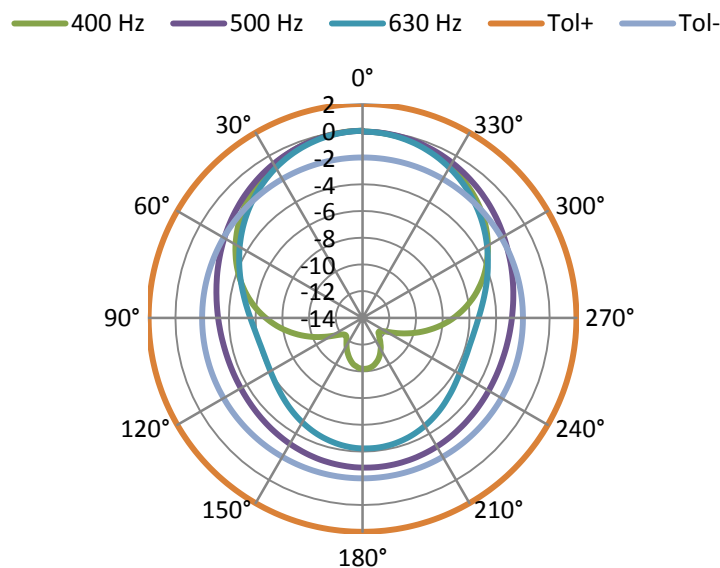


Obr. 4.2.3: Relativní směrové charakteristiky poloprostorového zářiče o objemu 0,8 l

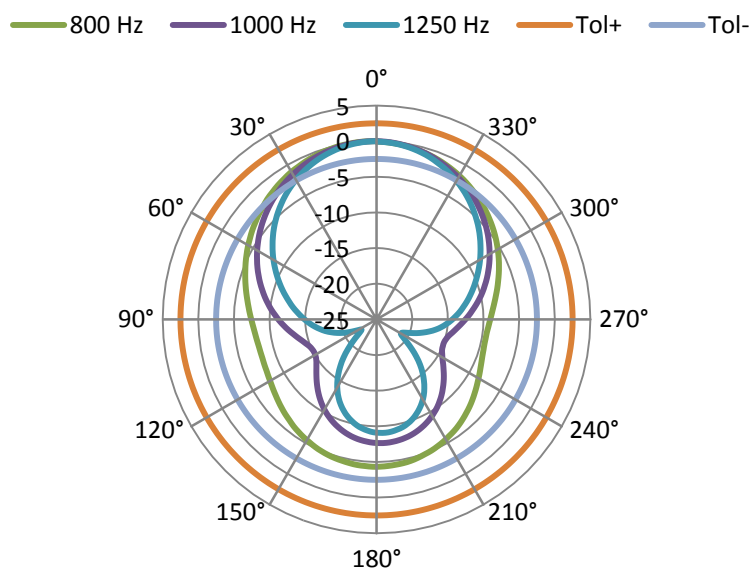


Obr. 4.2.4: Relativní směrové charakteristiky poloprostorového zářiče o objemu 0,8 l





**Obr. 4.2.5:** Relativní směrové charakteristiky poloprostorového zářiče o objemu 0,8 l



**Obr. 4.2.6:** Relativní směrové charakteristiky poloprostorového zářiče o objemu 0,8 l

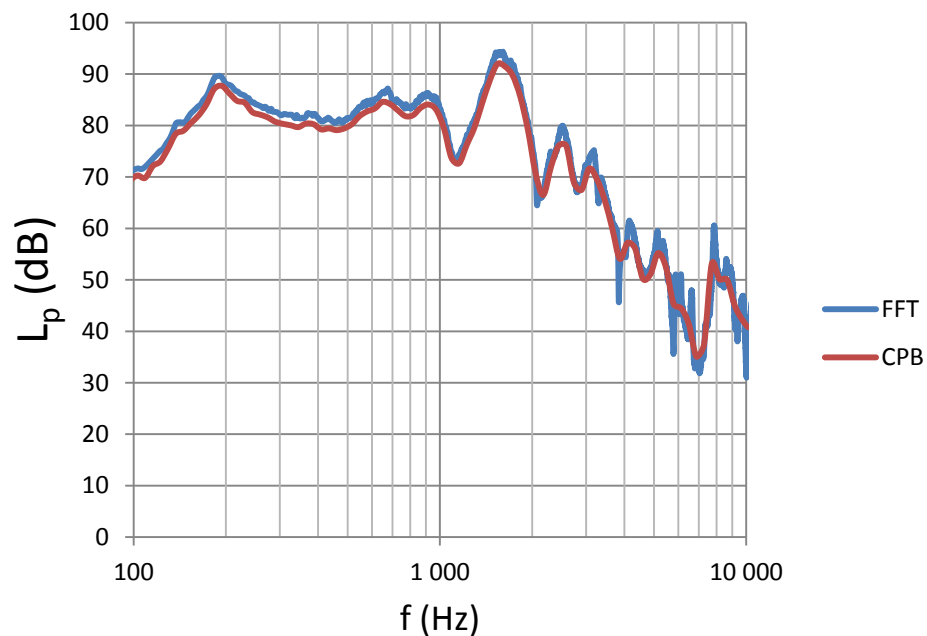
Z naměřených relativních směrových charakteristik vyplývá, že takto konstruovaný akustický poloprostorový zářič může pracovat pouze do frekvence kolem 230 Hz. Pak již značně narůstá chyba. Příčinou zhoršení směrovosti v závislosti na rostoucím kmitočtu je pravděpodobně přílišné zanoření reproduktoru do novodurové roury a její přesah nad membránu, což nám pravděpodobně kazí směrovou charakteristiku u vodorovné osy. Navýšení objemu novodurové roury pravděpodobně nezlepší směrovost, ale mohla by se zvýšit úroveň hladiny akustického tlaku na nízkých frekvencích.

## 4.2.2 Poloprostorový zářič o objemu 5 l



Obr. 4.2.7: Ilustrační foto poloprostorového zářiče o objemu 5 l.

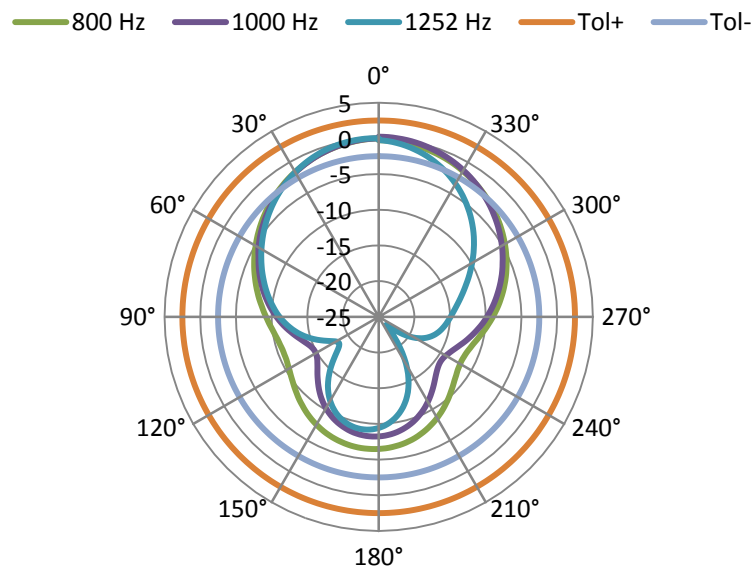
### 4.2.2.1 Naměřené A-F charakteristiky poloprostorového zářiče



Obr. 4.2.8: A-F charakteristiky poloprostorového zářiče o objemu 5 l

Dle předpokladů došlo ke zvýšení úrovně hladiny akustického tlaku  $L_p$  na nízkých frekvencích. Např. na 100 Hz se úroveň hladiny akustického tlaku zvýšila o více než 10 dB. Zvětšením objemu (zvětšením zdroje) ke zlepšení směrovosti na vyšších frekvencích dle očekávání nedošlo. K žádnému výraznému zhoršení však také ne.

#### 4.2.2.2 Naměřené směrové charakteristiky poloprostorového zářiče



**Obr. 4.2.9:** Vybrané relativní směrové charakteristiky poloprostorového zářiče o objemu 5 l

### 4.3 Orientační výpočet směrové charakteristiky reproduktoru

Jako modelový případ výpočtu směrové charakteristiky je použit model kmitajícího pístu. Směrová charakteristika reproduktoru je závislá na průměru membrány a frekvenci. Smyslem tohoto výpočtu není spočítat přesnou směrovou charakteristiku konkrétní membrány, ale udělat si přibližnou představu o tom, jaký průměr membrány lze použít pro pásmo do 2 kHz. Směrovou charakteristiku kmitajícího pístu popisuje následující vztah: [9]

$$p(r, t) = \frac{\sqrt{2} j f p_0 u_0 \pi a^2}{r} \times \left[ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] e^{j\omega(t - \frac{r}{c})} \quad (4.3.1)$$

Kde:

$p$  je akustický tlak

$r$  je vzdálenost od pístu

$t$  je čas

$f$  je frekvence

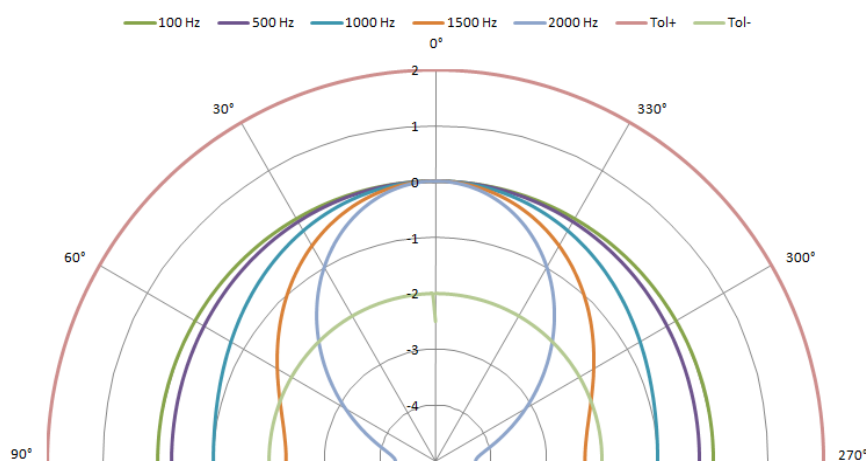
$p_0$  je normální akustický tlak

$u_0$  je akustická rychlost

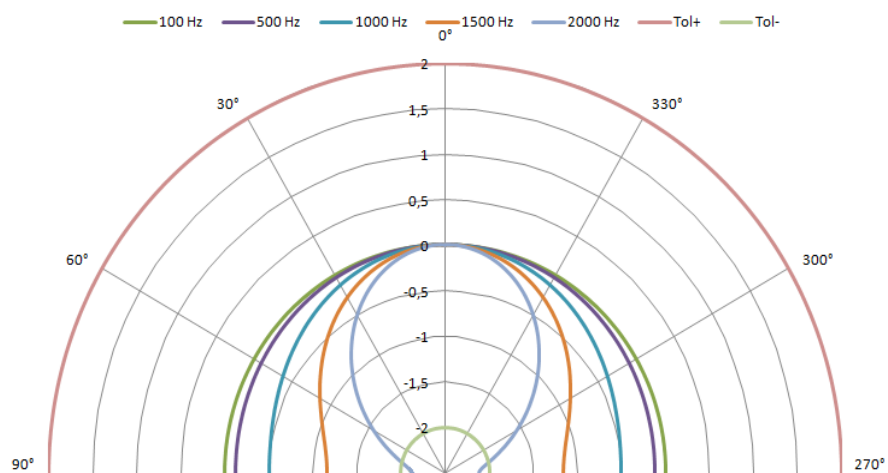
$a$  je poloměr pístu

$ka$  je vlnčet

$$ka = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (4.3.2)$$



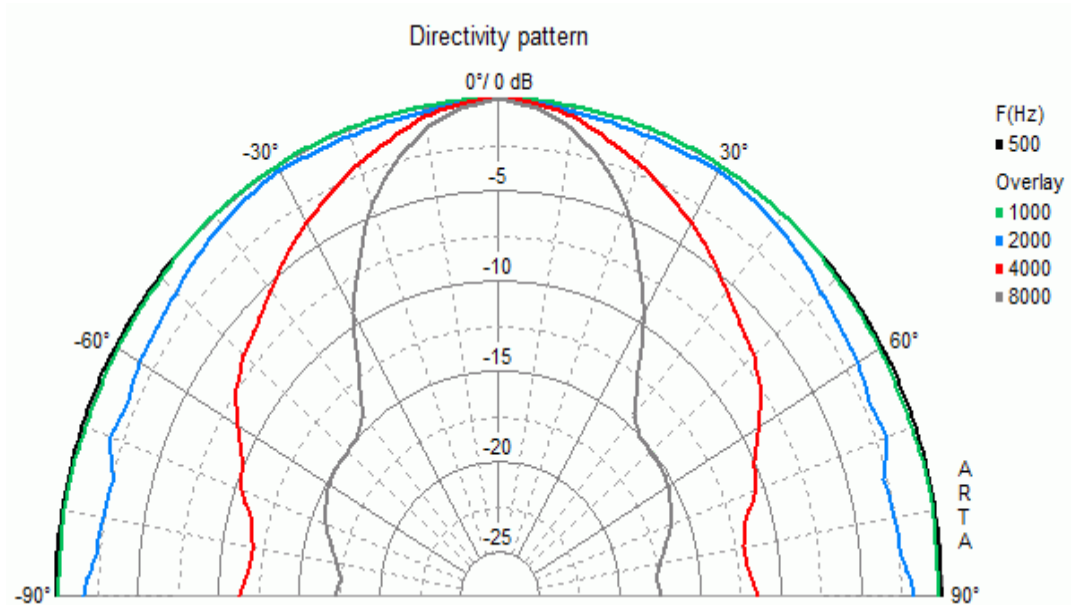
Obr. 4.3.1: Relativní charakteristiky při membráně o průměru 10 cm



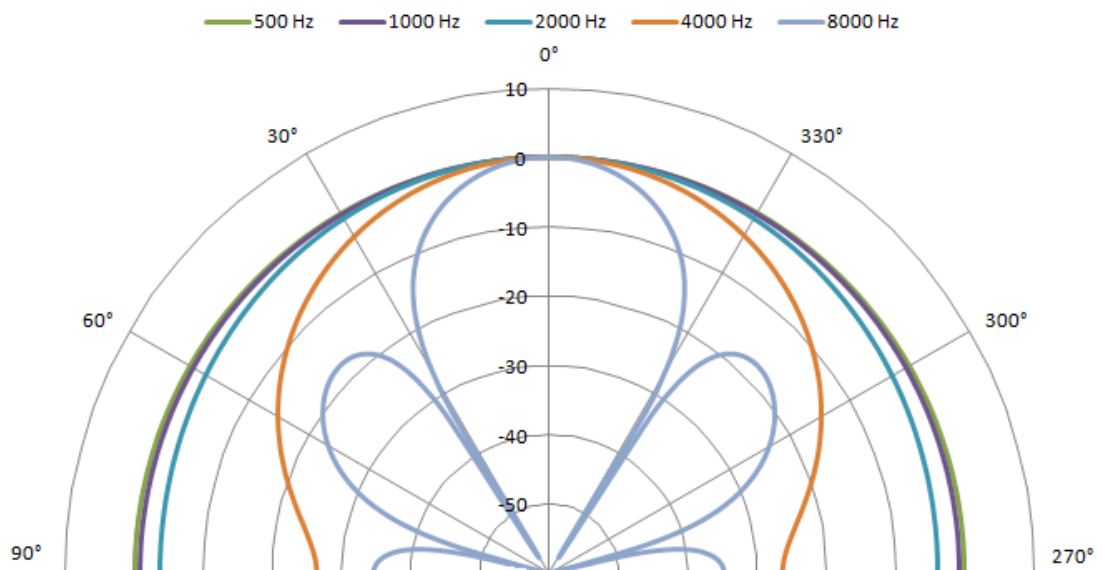
**Obr. 4.3.2:** Relativní charakteristiky při membráně o průměru 8 cm

#### 4.3.1 Porovnání směrových charakteristik kmitajícího pístu se směrovými charakteristikami kuželovité membrány reálného reproduktoru

V tomto pokusu budou porovnány směrové charakteristiky vypočtené dle vztahu 4.3.1 a směrové charakteristiky reproduktoru *W 100 S* –  $4 \Omega$  uváděné výrobcem. Uvedený reproduktor má kuželovitou membránu o průměru *10 cm*. Na dotaz, jakým způsobem výrobce směrové charakteristiky měří, zástupce firmy odpověděl, že reproduktory jsou měřeny v ploché desce dle standardu *IEC 60268-5*.



Obr. 4.3.3: Naměřené směrové charakteristiky reproduktoru *W 100 S* udávané výrobcem – dostupné z [43]



Obr. 4.3.4: Vypočítané směrové charakteristiky kmitajícího pístu o průměru *10 cm* pro různé frekvence

Z obrázků **Obr. 4.3.3** a **Obr. 4.3.4** vyplývá, že pro daný průměr vychází směrové charakteristiky lépe pro kuželovitou membránu, než pro kmitající píšť o stejném průměru.

#### 4.4 Zhodnocení experimentů

S ohledem na dosažené výsledky plynou pro další návrh akustických zdrojů zvuku následující závěry. Pravděpodobně bude potřeba vypočítat náběh frekvenční charakteristiky pro nízké kmitočty v závislosti na zvoleném objemu zdroje a pro konkrétní typ reproduktoru, aby bylo možné vybrat co nejmenší reproduktory, které budou hrát do co možná nejmenšího objemu tak, aby byl od  $100\text{ Hz}$  vyrovnán průběh frekvenční charakteristiky, což plyne z požadavku, že se sousední  $1/3$  oktávová pásma nesmí lišit o více než  $3\text{ dB}$ . Zároveň je nutné brát v potaz průměr membrány zvoleného reproduktoru, přičemž pokus popsáný v kapitole **4.3** ukázal, že pro kuželovitou membránu mohou být změřeny lepší průběhy směrových charakteristik, než jsou vypočtené průběhy směrových charakteristik kmitajícího píšťu o stejném průměru, jako je průměr membrány reálného reproduktoru. Pokud tedy bude vybrán průměr membrány na základě výpočtu kmitajícího píšťu, existuje předpoklad, že reálný reproduktor s kuželovou membránou bude mít lepší směrové vlastnosti. V neposlední řadě je nutné zohledňovat konstrukční parametry reproduktoru, zejména pak robustnost nosného koše a velikost magnetu reproduktoru, aby mohly být splněny požadavky na směrovost, popsáných v kapitole č. **2**.

## 5 Návrh zdrojů zvuku

Při orientační zkoušce vybraných zdrojů vyšlo najevo, že pokud chceme zkonstruovat akustický zdroj zvuku pro nízké frekvence, je nutné reproduktor nechat hrát do hermeticky uzavřeného objemu neboli uzavřené ozvučnice, aby se neuplatňoval akustický zkrat. Další možností by mohla být bassreflexová ozvučnice, která by sice vyřešila problém s akustickým zkratem, ale pravděpodobně by zhoršovala směrovost zdroje. Dále je nutné uvažovat velikost a geometrické uspořádání zdroje, aby bylo možné vyhovět požadavkům sepsaných v kapitole 2.

### 5.1 Výpočet frekvenční charakteristiky reproduktoru v uzavřené ozvučnici z T-S parametrů a náhradního schématu reproduktoru

#### 5.1.1 Parametry reproduktoru

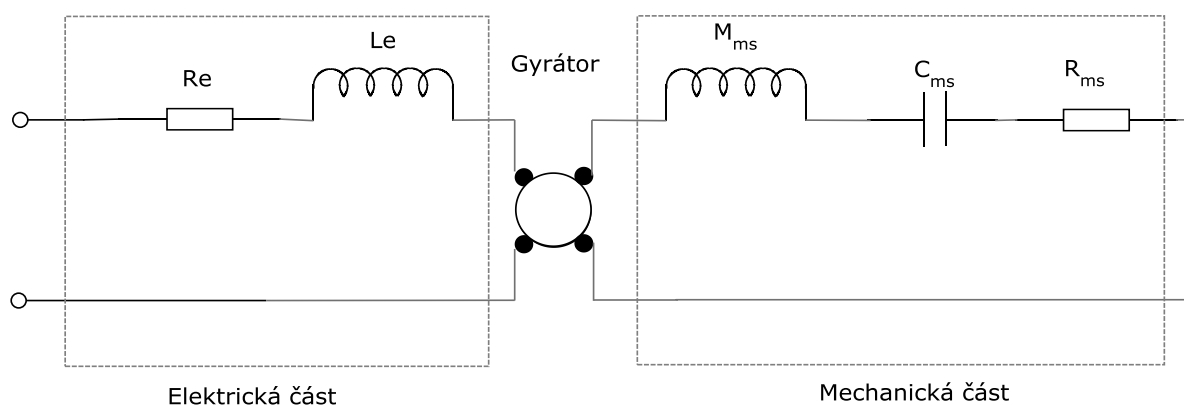
Parametry reproduktoru udávané výrobcem lze dle [7] rozdělit na mechanické (např. rozměry, hmotnost, atd...), parametry všeobecné (max. standardizovaný příkon, citlivost, jmenovitá impedance, frekvenční rozsah, atd...) a Thiele – Smallovy parametry, nebo zkráceně T-S parametry. Nejvýznamnější z nich jsou:

- $F_s$  – Rezonanční kmitočet reproduktoru ve volném prostoru. (**Hz**)
- $R_e$  – Stejnoseměrný odpor vinutí cívky. ( **$\Omega$** )
- $Q_{es}$  – Elektrický činitel jakosti, určuje ztráty v kmitací cívce. (-)
- $Q_{ms}$  – Mech. činitel jakosti, určuje mech. ztráty pohyblivých částí reproduktoru. (-)
- $Q_{ts}$  – Celkový činitel jakosti zahrnující  $Q_{es}$  i  $Q_{ms}$ . (-)
- $V_{as}$  – Ekvivalentní objem reproduktoru. ( **$dm^3$** )
- $S_d$  – Efektivní plocha membrány. ( **$cm^2$** )
- $M_{ms}$  – Hmotnost celého kmitacího systému. ( **$g$** )
- $C_{ms}$  – Poddajnost kmitacího systému reproduktoru. ( **$m/N$** )
- $S_{ms}$  – Tuhost kmitacího systému neboli převrácená hodnota poddajnosti. ( **$N/m$** )
- $R_{ms}$  – Mechanické tlumení. ( **$Ns/m$** )
- $X_{max}$  – Maximální výchylka kmitacího systému. ( **$mm$** )
- $Bl$  – Gyrační faktor – součin velikosti magnetické indukce a délky vinutí. ( **$T \cdot m$** )
- $L_e$  – Elektrická indukčnost kmitací cívky měřená při 1 kHz. ( **$mH$** )



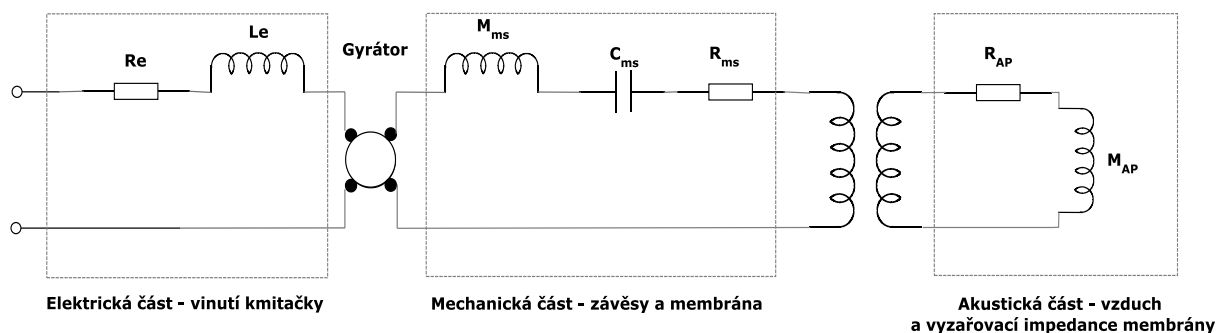
### 5.1.2 Odvození náhradního schématu reproduktoru

Následující text kapitoly 5.1.2. je stručný výtah z [5]. Pro odvození náhradního schématu elektrodynamického reproduktoru je vhodné použít elektromechanickou analogii, kdy dle [5] napětí odpovídá síle, proudu rychlost, elektrickému odporu mechanický odpor, kapacitě poddajnost (nebo také tuhost, což je převrácená hodnota poddajnosti), a indukčnosti hmotnost. Elektrodynamický reproduktor lze chápat jako mechanický systém s elektrickým vstupem, mechanickým ústrojím a akustickým výstupem. Zmíněná elektromechanická analogie je nástroj, kterým lze docílit toho, aby mechanická soustava, pro tento případ reproduktor, byla převedena na soustavu elektrickou, nebo lépe řečeno na elektrické schéma. Elektromechanická analogie má nejlepší využití v případě, že chceme popsat mechanické soustavy, na které působí síly s harmonickým časovým průběhem, a ve kterých dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou, nebo naopak. Přínosem je ohromné zjednodušení, kdy elektrickou i mechanickou část systému popisujeme stejným způsobem – Symbolicko-komplexní metodou. Je potřeba akorát nalézt vhodný způsob, jak popsat vzájemné působení těchto soustav. Jak je popsáno v [5], například u elektrodynamického reproduktoru je vzájemné působení mezi elektrickou a mechanickou částí zprostředkováno silovým působením pole magnetu na vodič, kterým protéká proud. Velikost mechanické síly je úměrná součinu proudu a indukce pole, ve kterém se vodič pohybuje. Naopak při pohybu vodiče v magnetickém poli se ve vodiči indukuje napětí, které je úměrné součinu magnetické indukce a rychlosti pohybu vodiče vůči magnetickému poli. Přejít od elektrické části reproduktoru k mechanické by tedy měl být proveden tak, aby napětí odpovídala rychlost a proudu síla. To je poněkud nepříjemné, neboť jak je uvedeno výše, napětí v elektromechanické analogii odpovídá síla a proudu rychlost. Elektromechanická analogie se tedy nedá využít bez doplnění gyrátoru. Gyrátor je hypotetický prvek, který je schopen převádět napětí na proud, proud na napětí, indukčnost na kapacitu, kapacitu na indukčnost, sériové zapojení prvků na paralelní a naopak. Podstatné je, že „motor“ reproduktoru neboli soustava kmitací cívky a magnetu se jako gyrátor skutečně chová.



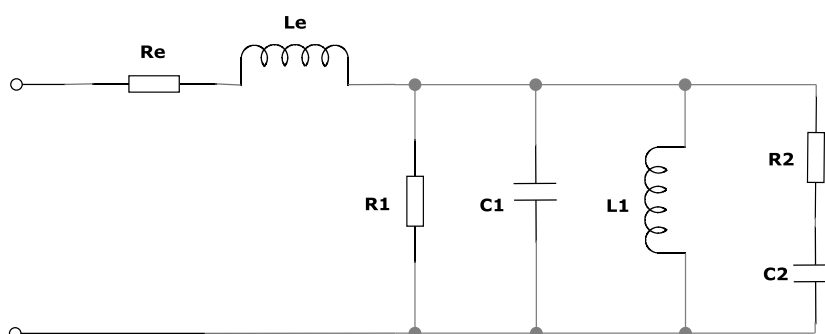
Obr. 5.1.1: Analogické schéma elektrodynamického reproduktoru

Schéma z Obr. 5.1.1 však ještě není kompletní. Aby byl obvod úplný, je třeba ještě doplnit impedanci sloupce vzduchu, kmitajícího společně s membránou.



Obr. 5.1.2: Analogické schéma elektrodynamického reproduktoru vč. vyzářovací impedance

Pro praktické použití schématu z Obr. 5.1.2 je třeba se zbavit gyrátoru. To provedeme tak, že jednotlivé prvky přepočítáme na elektrickou stranu:



Obr. 5.1.3: Náhradní schéma elektrodynamického reproduktoru plně převedené na elektrickou stranu

Jednotlivé prvky náhradního schématu jsou pak dány vztahy 5.1.1 až 5.1.7. dle [5].

$$R_1 = \frac{(Bl)^2}{R_{ms}} \quad (\Omega) \quad (5.1.1)$$

Kde:

$Bl$  je gyrační faktor. ( $T \cdot m$ )

$R_{ms}$  je mechanické tlumení ( $Ns/m$ )

$$C_1 = \frac{M_{ms}}{(Bl)^2} \quad (F) \quad (5.1.2)$$

Kde:

$M_{ms}$  je hmotnost kmitacího systému. ( $g$ )

$$L_1 = C_{ms} \times (Bl)^2 \quad (H) \quad (5.1.3)$$

Kde:

$C_{ms}$  je poddajnost kmitacího systému. ( $mm/N$ )

$$R_2 = \frac{(Bl)^2}{S_d^2 R_{AP}} \quad (\Omega) \quad (5.1.4)$$

Kde:

$S_d$  je efektivní plocha membrány. ( $mm^2$ )

$R_{AP}$  je vyzařovací odpor spolukmitajícího sloupce vzduchu.

$$C_2 = \frac{m_{AP} S_d^2}{(Bl)^2} \quad (F) \quad (5.1.5)$$

Kde:

$m_{AP}$  – vyzařovací hmotnost spolukmitajícího sloupce vzduchu.

Prvky vyzařovací impedance jsou dány vztahy z [5]:

$$R_{AP} = 128 \times C_0 \times \frac{\rho}{9 \times \pi^2 \times S_d} \quad \left( \frac{kg}{s \times m^4} \right) \quad (5.1.6)$$

$$m_{AP} = 8 \times \frac{\rho}{3 \times \pi^2 \times r} \left( \frac{kg}{m^4} \right) \quad (5.1.7)$$

Kde:

$c_0$  – rychlost zvuku ve vzduchu při 20 °C (= 343 m/s)

$\rho$  – hustota vzduchu při 20 °C (= 1,205 kg/m<sup>3</sup>)

$r$  – poloměr membrány

Je ale potřeba zdůraznit, že uvedené schéma na obrázku **Obr. 5.1.3** a vztahy 5.1.6 a 5.1.7 samozřejmě platí, ale jsou relevantní pouze pro nízké frekvence, řádově do 500 Hz.

### 5.1.3 Náhradní schéma reproduktoru v uzavřené ozvučnici

Vzduch v uzavřené ozvučnici o objemu  $V_b$  působí jako vzduchový polštář, který pohybující se membrána reproduktoru neustále stlačuje a roztahuje. Ve své podstatě se tak dá říci, že onen vzduchový polštář pod membránou zvyšuje tuhost membrány, respektive snižuje její poddajnost. Povahu reproduktoru umístěného v uzavřené ozvučnici popisuje náhradní schéma reproduktoru rozšířené o vyzářovací impedanci, neboli poddajnost  $c_{vb}$ , té strany membrány, jež je umístěná v uzavřené ozvučnici.  $C_{vb}$  je dána vztahem 5.1.8 převzatým z [6].

$$c_{vb} = \frac{V_b}{P_0 \times \kappa} \quad (5.1.8)$$

Kde:

$V_b$  je objem uzavřené ozvučnice v litrech.

$P_0$  je normální akustický tlak. (= 101000 Pa)

$\kappa$  je Poissonova konstanta. (=1,4)

Analogem této poddajnosti na elektrické straně je indukčnost  $L_{vb}$ .

$$L_{vb} = \frac{(Bl)^2 \times V_b}{P_0 \times \kappa \times S_d^2} = \frac{c_{vb} \times (Bl)^2}{S_d^2} \quad (5.1.9)$$

Indukčnost  $L_{vb}$  je v náhradním schématu paralelně spojena s původní indukčností  $Ll$ . Výsledkem paralelní kombinace je nižší indukčnost, což má za následek menší poddajnost (větší tuhost) a zvýšení rezonanční frekvence (dána vztahy 5.1.10 a 5.1.11, převzatými z [5] a [6]), vystupující v přenosové funkci - rovnice 5.2.13, převzaté z [5].

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_{ms} \times (C_{ms} + C_{vb})}} \quad (5.1.10)$$

$$f_r = F_s \sqrt{\frac{V_b \times V_{AS}}{V_b}} \quad (5.1.11)$$

Kde:

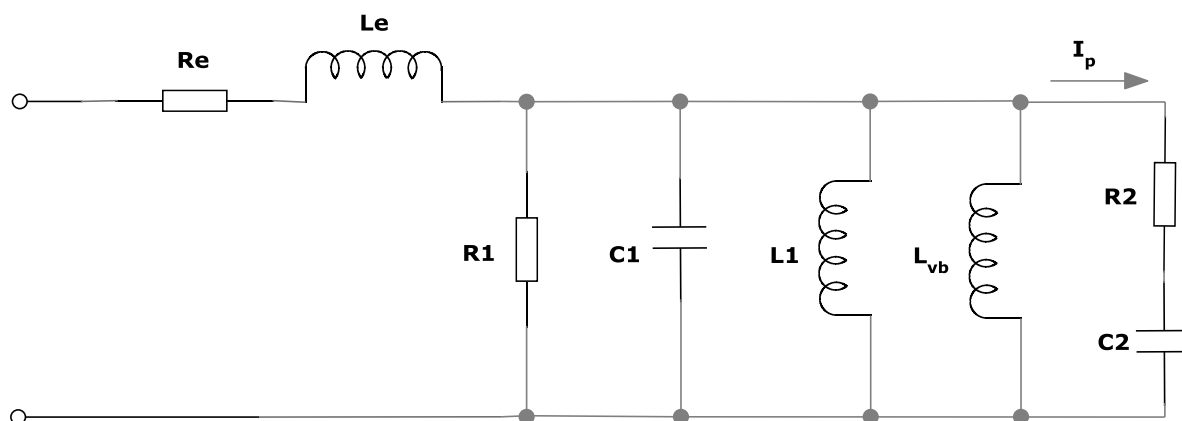
$F_s$  je rezonanční kmitočet reproduktoru. (Hz)

Se zvýšením rezonančního kmitočtu dojde rovněž ke zvýšení činitele jakosti reproduktoru z  $Q_{ts}$  na  $Q_{tc}$  dle vztahu převzatého z [6].

$$Q_{tc} = Q_{ts} \times \frac{f_r}{F_s} \quad (5.1.12)$$

Kde:

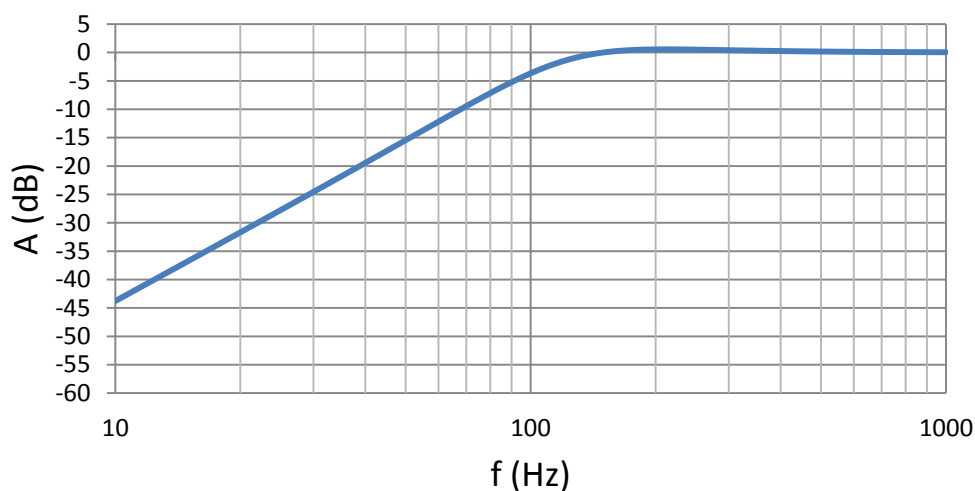
$Q_{tc}$  je celkový činitel jakosti reproduktoru.



**Obr. 5.1.4:** Náhradní schéma elektrodynamického reproduktoru v uzavřené ozvučnici plně převedené na elektrickou stranu

Nutno podotknout, že schéma uvedené na obrázku **Obr. 5.1.4** je opět relevantní pouze pro „nízké kmitočty.“ Výstupnímu akustickému tlaku odpovídá proud  $I_p$ , procházející větví vyzařovací impedance. Odvozením přenosové funkce obvodu a vypočtením A-F charakteristiky bychom zjistili, že se daný obvod chová jako horní propust. Což je v případě reálného reproduktoru na nízkých frekvencích pravda. Tvar frekvenční charakteristiky reproduktoru je pak dán přenosem dle [5].

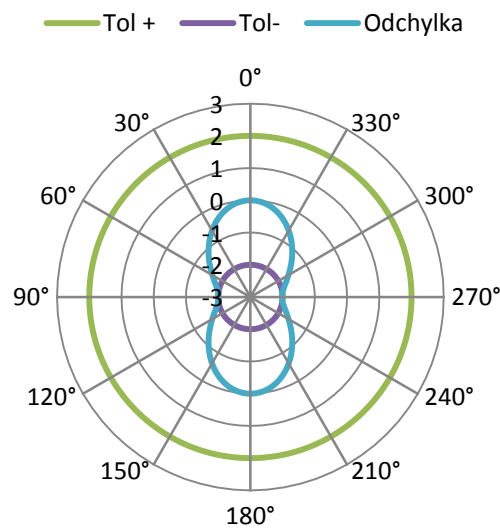
$$T_{j\omega} = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_r}\right)^2}{\left(\frac{j\omega}{\omega_r}\right)^2 + \left(\frac{j\omega}{\omega_r Q_{tc}}\right) + 1} \quad (5.1.13)$$



**Obr. 5.1.5:** Příklad A-F charakteristiky reproduktoru v uzavřené ozvučnici o objemu  $V_b$

## 5.2 Návrh akustického dvojčete pro pásmo 100 Hz až 2 kHz

Při návrhu akustického dvojčete pro dané pásmo je potřeba brát v úvahu hned několik omezujících faktorů. Kvůli požadavkům na směrovost a dalším požadavkům z kapitoly 2, musí být zdroj rozměrově malý. Chceme tedy co nejmenší mezeru, resp. objem mezi reproduktory, a vlastně i co nejmenší reproduktory s malým magnetem, což podstatně komplikuje výběr reproduktorů. Je tedy potřeba vybrat basový reproduktor o co možná nejmenších rozměrech, který bude mít dolní mezní frekvenci  $f_d$  menší než 100 Hz, co nejnižší rezonanční frekvenci  $F_s$ , co nejnižší ekvivalentní objem  $V_{as}$  a co nejmenší činitel jakosti  $Q_{ts}$ . Takový reproduktor však pravděpodobně nebude mít „malý“ magnet. Výše uvedené parametry zásadně ovlivňují průběh A-F charakteristiky. Bude se muset zvolit nějaký kompromis, jelikož se snižující se dolní mezní frekvencí  $f_d$  (frekvence pro pokles o 3 dB) se zvětšuje jak  $V_{as}$ , tak i  $Q_{ts}$ . Směrovost akustického dvojčete je pro frekvenci 2000 Hz a průměr membrány 8 cm naznačena na obrázku **Obr. 5.2.1**. Aby nedocházelo k poklesu směrové charakteristiky po stranách, je nutné vybrat rozměrově malé reproduktory a umístit je co nejbližše k sobě.



**Obr. 5.2.1:** Odhad směrové charakteristiky akustického dvojčete pro průměr membrán 8 cm, frekvenci 2 kHz, a při těsné blízkosti dvou reproduktorů otočených o 180°.

### 5.2.1 Výpočet minimálního objemu mezi reproduktory

Při výpočtu minimálního objemu vycházíme z mechanických vlastností reproduktorů. Minimální objem je závislý na průměru reproduktoru a parametru  $X_{MAX}$ . Reproduktory od sebe musí být vzdáleny minimálně tak, aby se při maximální výchylce jejich membrány nemohly fyzicky dotýkat a vzájemně se tak tlumit. Dále je potřeba přidat ještě rezervu  $\delta$ , jelikož nikdy není stoprocentní jistota, že jsou údaje od výrobce úplně přesné. Minimální objem mezi reproduktory bude tedy dán vztahem:

$$V_{min} = (2 \times V_d) + V_m \quad (5.2.1)$$

Kde:

$V_d$  je objem „kuželu“ membrány reproduktoru a

$V_m$  je objem mezery mezi reproduktory.

Objem mezery je pak přibližně dán vztahem:

$$V_m = S_{vpr} \times ((2 \times X_{MAX}) + \delta) \quad (5.2.2)$$

Kde:

$S_{vpr}$  je průřez vnější hrany reproduktoru

$\delta$  je zvolená rezerva (= 2 mm)

### 5.2.2 Určení optimálního objemu mezi reproduktory

Optimální objem  $V_{opt}$  zvolíme tak, aby při výpočtu amplitudové - frekvenční charakteristiky byl na 100 Hz maximální pokles -6dB, ideálně však -3dB. Šířka mezery mezi reproduktory  $d$  pak bude dána vztahem:

$$d = \frac{V}{S_{vpr}} \quad (5.2.3)$$



### 5.2.3 Výběr reproduktoru pro akustické dvojče

Jak již bylo shrnuto v kapitole 5.2, je potřeba vybrat rozměrově co nejmenší reproduktor, s co nejmenšími parametry  $F_s$ ,  $V_{AS}$  a  $Q_{tc}$ . Je pravděpodobné, že reproduktory budou umístěny přední stranou membrán proti sobě, tudíž budou vyzařovat zadní částí. Je proto vhodné vybrat reproduktory s co možná nejmenšími (neodymovými) magnety, a s co možná nejméně robustním nosným košem. U těchto reproduktorů budou vykresleny A-F charakteristiky pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$  a reproduktor, který bude mít nejmenší rozdíl průběhů A-F charakteristiky při  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ , a zároveň bude splňovat výše uvedené požadavky, bude vybrán. Výše uvedeným podmínkám vyhovují reproduktory:

- W 130 X
- 4NDS34
- WF 130 ND

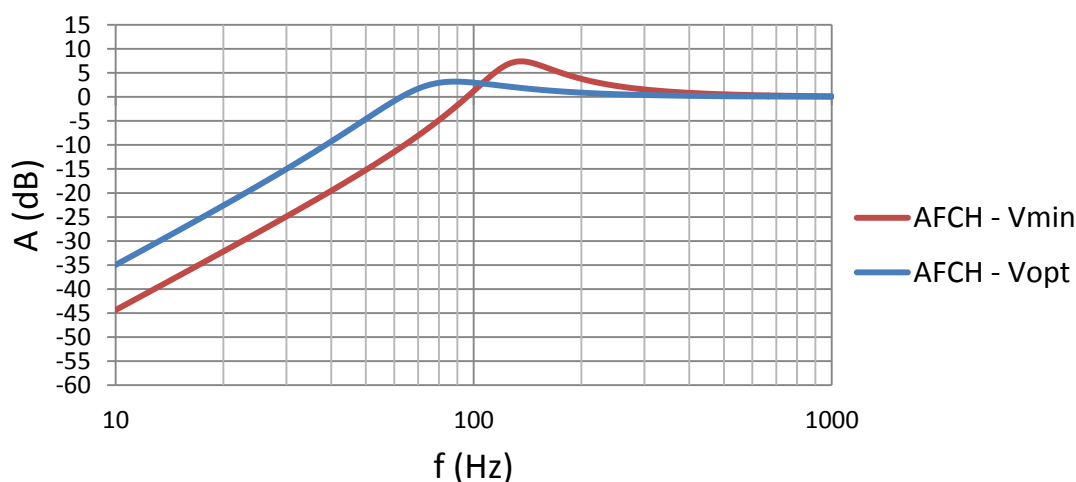
Výsledky ostatních reproduktorů, které byly původně zvažovány pro konstrukci akustického dvojčete jsou uvedeny v příloze A.

- **W 130 X\_2 x 4 Ohm - Visaton**



Obr. 5.2.2: Reproduktor W 130 X - ilustrační foto - dostupné z [44]

### A-F Charakteristiky pro W 130 X



Obr. 5.2.3: A-F charakteristiky reproduktoru W 130 X pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

Vas (l)	Fs (Hz)	Qts (-)	Vmin (l)	Vopt (l)	ø magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
5,1	40	0,71	0,543237	2	100	94,2

Tab. 5.2.1: Limitující parametry reproduktoru W 130 X

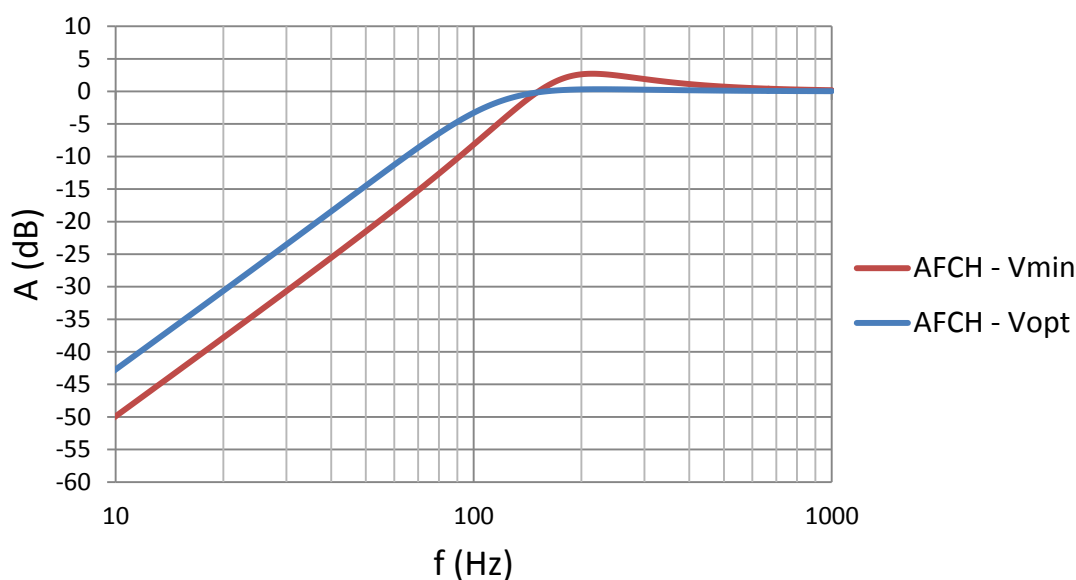
Frekvenční charakteristiky reproduktoru W 130 X jsou velmi příznivé. V podstatě i při minimálním objemu je dolní mezní frekvence pod 100 Hz. Nepříliš příznivé je ale zvlnění, které dosahuje hodnoty téměř 8 dB. To by mohlo znamenat komplikaci, jelikož jeden z požadavků na zdroj je, že sousední 1/3 oktávová pásma se nesmí lišit o více než 3 dB. Další nevýhodou je rozměrný magnet, který bude kazit směrovost, jelikož reproduktory akustického dvojčete hrají zadní stranou.

- 4NDS34 – B&C Speakers



Obr. 5.2.4: Reproduktor 4NDS34 – ilustrační foto - dostupné z [45]

### A-F Charakteristiky pro 4NDS34



Obr. 5.2.5: A-F charakteristiky reproduktoru 4NDS34 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

Vas (l)	Fs (Hz)	Qts (-)	Vmin (l)	Vopt (l)	ø magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,49	65	0,46	0,698849	2	58	53

Tab. 5.2.2: Limitující parametry reproduktoru 4NDS34

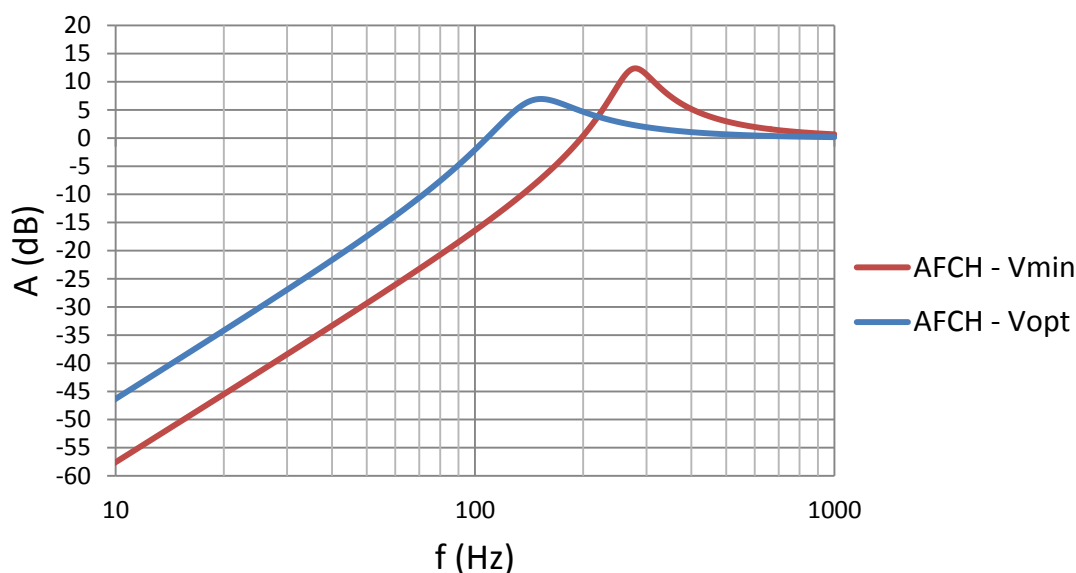
Mezi pozitivní vlastnosti reproduktoru 4NDS34 patří malý magnet a malý průměr membrány. Frekvenční charakteristiky už tolik příznivé nejsou. Při objemu 2 litry je dolní mezní frekvence  $f_d$  cca 105 Hz a při minimálním objemu 0,69 litru je propad na 100 Hz přibližně -7,5 dB. Tento neduh by se však dal kompenzovat úpravou signálu z generátoru.

- **WF 130 ND - 8 Ohm - Visaton**



Obr. 5.2.6: Reproduktor W 130 ND - ilustrační foto - dostupné z [46]

### A-F Charakteristiky pro WF 130 ND



Obr. 5.2.7: A-F charakteristiky reproduktoru W 130 ND pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

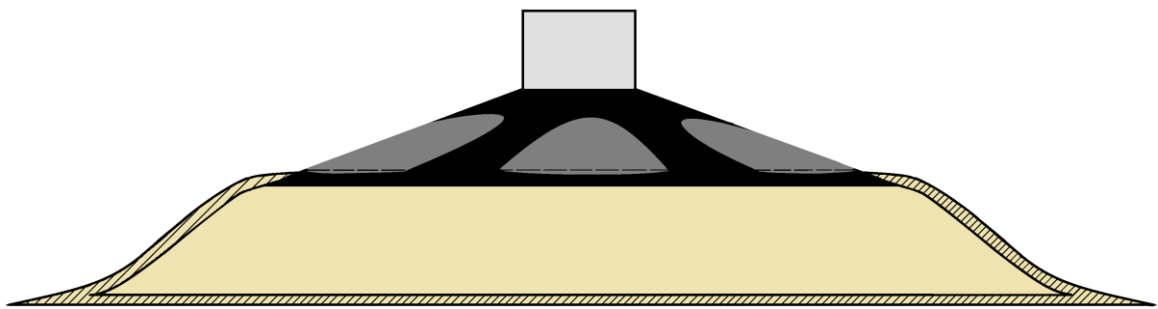
Vas (l)	Fs (Hz)	Qts (-)	Vmin (l)	Vopt (l)	ø magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,49	65	0,46	0,698849	2	87	94

Tab. 5.2.3: Limitující parametry reproduktoru W 130 ND

Reproduktor *WF 130 ND* je sám o sobě velmi zajímavý. Je velmi tenký, což by se mohlo využít k vyzařování přední stranou. Celkem příznivé frekvenční charakteristiky dosahuje již při objemu 1,2 litru. Mírně zarážející je však tvar membrány, který má ke kuželu daleko. Je otázka, jak by vypadala směrová charakteristika tohoto reproduktoru, kterou výrobce v tuto chvíli ještě nemá změřenou a zveřejněnou.

### 5.3 Návrh poloprostorového zářiče pro pásmo 100 Hz až 2 kHz

V tomto případě chceme navrhnout zdroj, který bude mít polokulovou směrovou charakteristiku a bude použitelný pro měření parametrů polobezodrazových komor. Bude nám tedy stačit poloprostorové vyzařování, tedy jeden reproduktor hrající do objemu uzavřené ozvučnice. Podobně jako při návrhu akustického dvojčete, musíme zohledňovat stejné limitující parametry, tedy co možná nejmenší reproduktor s co nejmenším magnetem a s co nejméně robustním nosným košem. Rovněž chceme co nejmenší rezonanční frekvenci  $F_s$  a činitel jakosti  $Q_{tc}$ . Jediný parametr, kde máme v tomto případě větší volnost je ekvivalentní objem  $V_{as}$ . Dle [1] je totiž ideální umístit akustický střed zkušebního zdroje v rozmezí do  $\lambda/10$  nad odrazivou rovinu, avšak maximálně  $150\text{ mm}$  nad odrazivou rovinu, což nám dává určitý prostor k manévrování s velikostí objemu ozvučnice  $V_b$ . Výhodné při vyšších frekvencích bude eliminovat hrany a snížit výšku zdroje, a rozprostřít tak objem ozvučnice do šířky s plynulým náběhem. Dále je potřeba dbát na to, aby reproduktor nebyl do ozvučnice zanořen více, než je nutné, aby nedocházelo k deformaci směrové charakteristiky na vodorovné ose, potažmo na podlaze místnosti. Odhady směrových charakteristik pro různé průměry membrány a různé frekvence jsou na obrázcích **Obr. 4.3.1** a **Obr. 4.3.2**. Na obrázku **Obr. 5.4.1** je pak koncepce tohoto zdroje s navýšeným objemem. Takovou ozvučnici by bylo možné např. vylaminovat.



**Obr. 5.3.1:** Snížený a rozšířený akustický zářič se zvětšeným objemem

### 5.3.1 Výpočet minimálního objemu uzavřené ozvučnice

Minimální objem uzavřené ozvučnice se určí obdobně jako v případě akustického dvojčete. Výpočet se dokonce zjednoduší, jelikož počítáme pouze s jedním reproduktorem. Opět je ale potřeba k  $X_{MAX}$  přidat určitou rezervu  $\delta$ , aby se membrána nemohla tlumit o stěnu ozvučnice. Minimální objem je v tomto případě dán vztahem:

$$V_{min} = V_d + V_m \quad (5.3.1)$$

Kde:

$V_d$  je objem „kuželu“ membrány reproduktoru a

$V_m$  je objem mezery mezi reproduktorem a stěnou ozvučnice.

Objem mezery je pak přibližně dán vztahem:

$$V_m = S_{vpr} \times (X_{MAX} + \delta) \quad (5.3.2)$$

Kde:

$S_{vpr}$  je průřez vnější hrany reproduktoru

$\delta$  je zvolená rezerva

### 5.3.2 Určení optimálního objemu mezi reproduktory

Optimální objem  $V_{opt}$  zvolíme tak, aby při výpočtu A-F charakteristiky byl na  $100 \text{ Hz}$  maximální pokles  $-3\text{dB}$ .

### 5.3.3 Výběr reproduktoru pro poloprostorový zářič

Opět je snaha vybrat co možná nejmenší reproduktor s co možná nejmenšími parametry  $F_s$ ,  $V_{AS}$  a  $Q_{tc}$ . Dále je vhodné vybrat reproduktor, který má co možná nejmenší magnet a co nejméně robustní nosný koš. Pokud by se ale podařilo sehnat dostatečně mělký reproduktor, bylo by jej možné nechat hrát přední stranou membrány. Odpadl by tak problém s průměrem magnetu a konstrukcí koše. V neposlední řadě opět rozhodnou průběhy A-F charakteristik. Bude vybrán reproduktor, jehož A-F charakteristiky se budou při  $V_{min}$  a  $V_{opt}$  nejméně lišit,

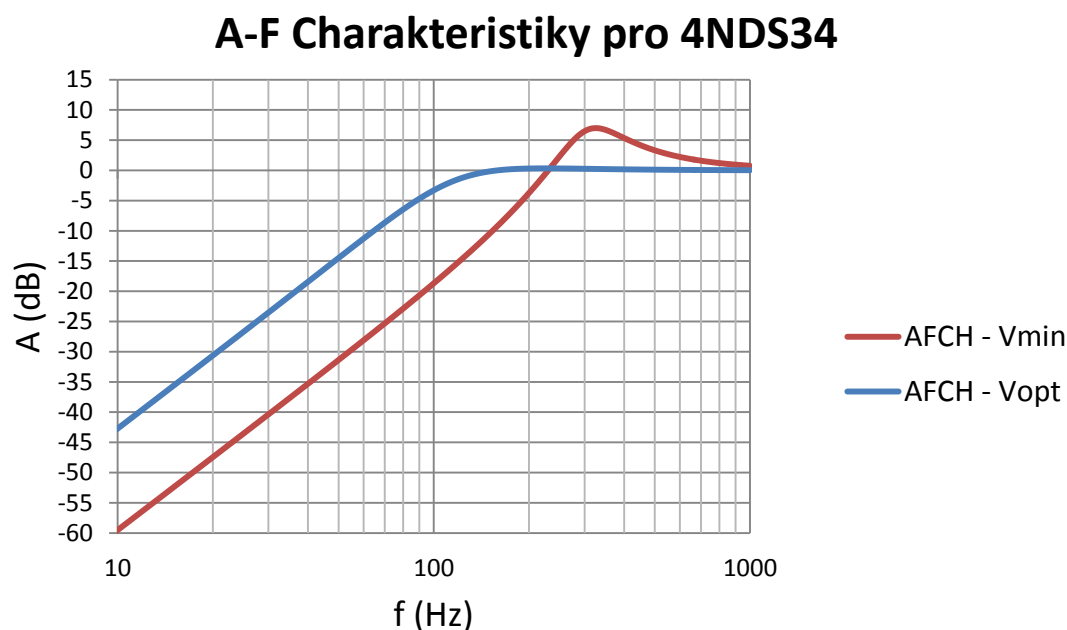
případně reproduktor, který má dolní mezní frekvenci  $f_d$  nižší než 100 Hz při dosažitelném objemu. Výše uvedeným podmínkám vyhovují reproduktory:

- W 130 X
- 4NDS34
- WF 130 ND

Výsledky ostatních reproduktorů, které byly původně zvažovány pro konstrukci poloprostorového zářiče jsou uvedeny v příloze B.

### • 4NDS34 - B&C Speakers

Ilustrační foto reproduktoru 4NDS34 je uvedeno v kapitole 5.2.3 na obrázku Obr. 5.2.4.



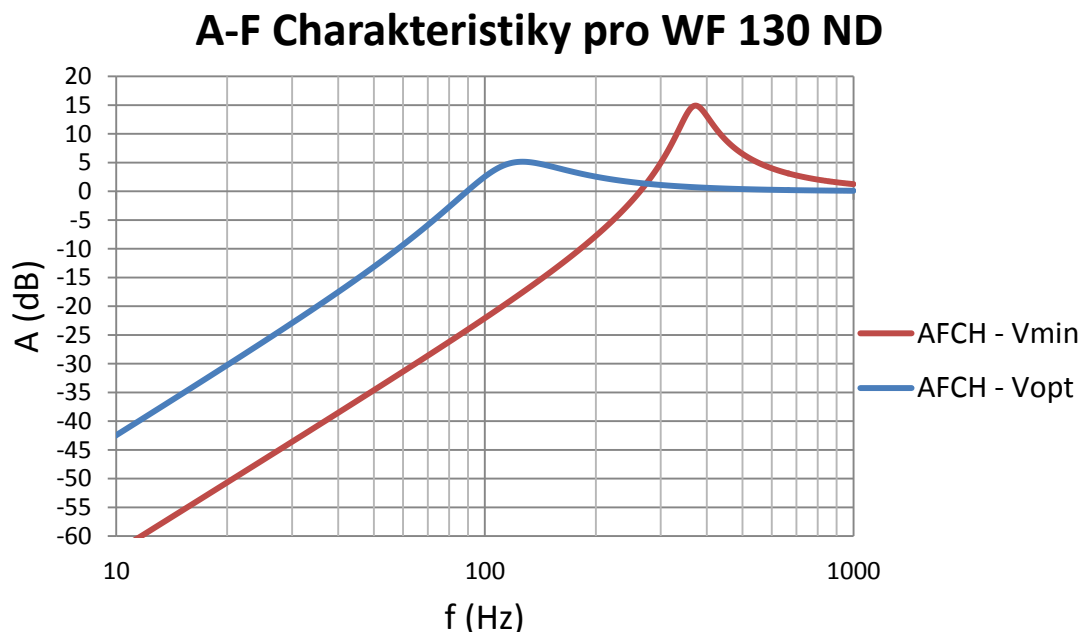
Obr. 5.3.2: A-F charakteristiky reproduktoru 4NDS34 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,49	65	0,46	0,209721	2	58	53

Tab. 5.1: Limitující parametry reproduktoru 4NDS34

Výhodou reproduktoru 4NDS34 je i v tomto případě příznivá frekvenční charakteristika již při objemu 2 litry. Nevýhodou zůstává robustní magnet.

- WF 130 ND - 8 Ohm - Visaton



Obr. 5.3.3 - A-F charakteristiky reproduktoru WF 130 ND pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
10,6	46	0,69	0,166599	2	87	94

Tab. 5.2: Limitující parametry reproduktoru WF 130 ND

Ilustrační foto reproduktoru WF130ND je uvedeno v kapitole 5.2.3 na obrázku Obr. 5.2.6. Výhodou tohoto reproduktoru zůstává jeho malá hloubka. Bylo by možné jej použít pro vyzařování přední stranou, což by mohlo výrazně zlepšit směrovost, než při vyzařování zadní stranou reproduktoru. Další výhodou tohoto reproduktoru je příznivá A-F charakteristika, již při objemu 2 l. Ze všech vybraných reproduktorů se tento jeví jako nejvhodnější.

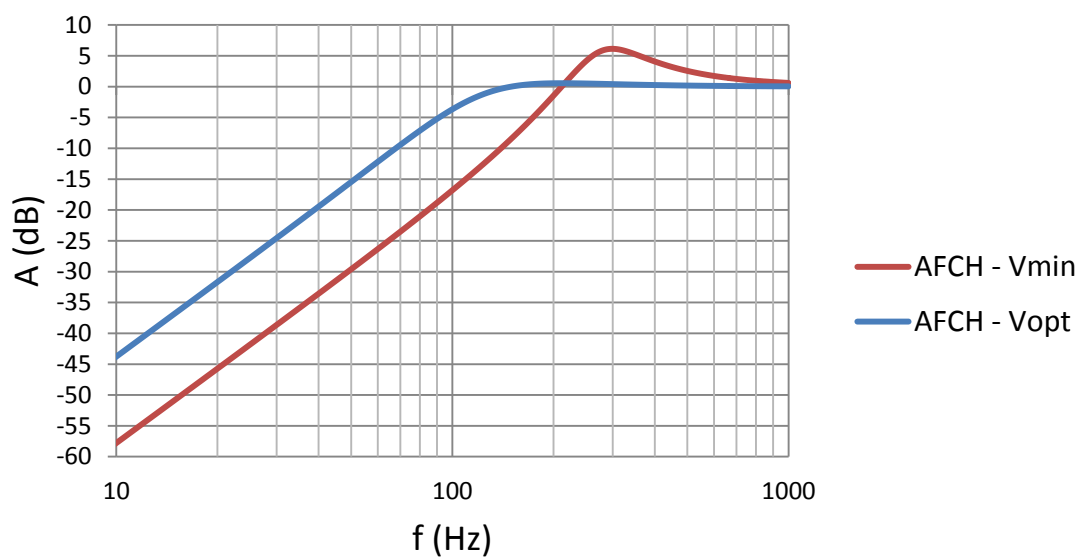


- **NTR06-1705D - Celestion**



Obr. 5.3.4: Reprodukční foto – dostupné z [47]

### A-F Charakteristiky pro NTR06-1705D



Obr. 5.3.5: A-F charakteristiky reproduktoru NTR06-1705D pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

Vas (l)	Fs (Hz)	Qts (-)	Vmin (l)	Vopt (l)	ø magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
10	59,8	0,42	0,48253	3	44	154

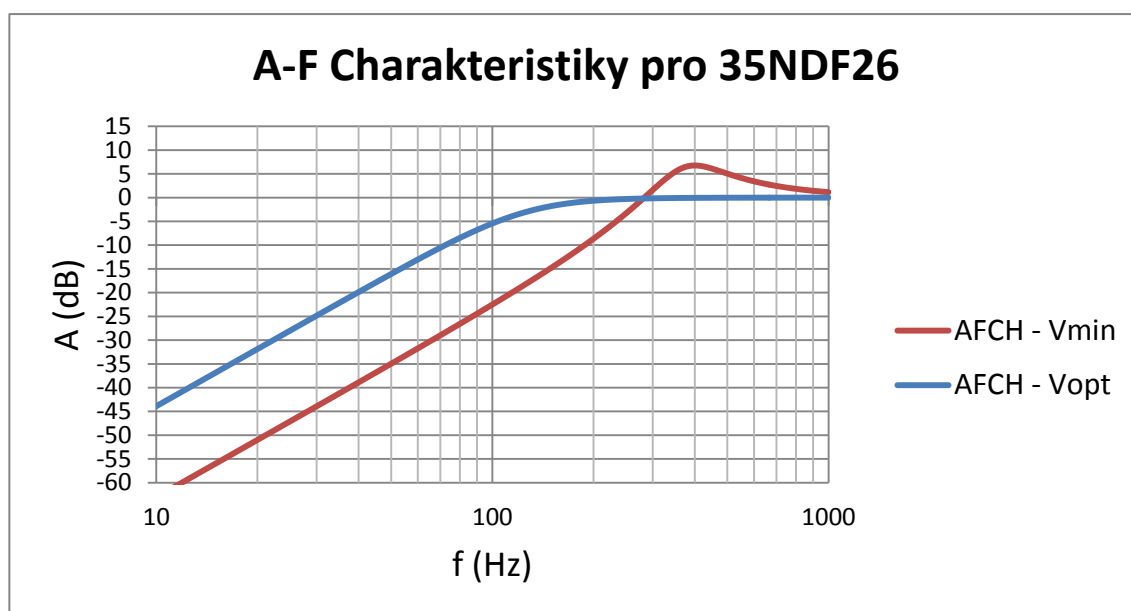
Tab. 5.3: Limitující parametry reproduktoru NTR06-1705D

Výhodami reproduktoru NTR06 – 1705D jsou celkem otevřená konstrukce nosného koše a malý průměr membrány. Nevýhodami pak mohou být oproti zbytku reproduktoru relativně velký magnet a 3 l optimální objem.

- 35NDF26 - B&C Speakers



Obr. 5.3.6: Reprodukční 35NDF26 - ilustrační foto – dostupné z [48]



Obr. 5.3.7: A-F charakteristiky reproduktoru 35NDF26 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

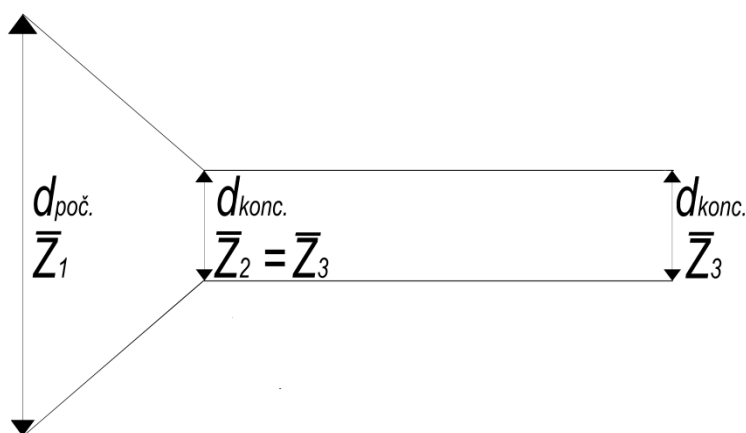
Vas (l)	Fs (Hz)	Qts (-)	Vmin (l)	Vopt (l)	ø magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,49	65	0,46	0,698849	3	36	46

Tab. 5.4: Limitující parametry reproduktoru 35NDF26

Přednosti reproduktoru 35NDF26 jsou malý průměr membrány, relativně malý magnet a poměrně otevřený nosný koš. Nevýhodou však je, že i při objemu tří litrů je pokles na 100 Hz cca -6 dB, což by ale případně bylo možné kompenzovat úpravou signálu z generátoru.

## 5.4 Návrh zvukovodového zdroje

Další možnou koncepcí zkušebního zdroje zvuku je tlakový reproduktor hrající do vlnovodu. Jak je již uvedeno v kapitole 3.5, jedná se především o koncepci zdroje určeného pro vyšší frekvence. Vlnovod takového zdroje je možné realizovat za pomoci kónického vlnovodu, případně kombinací kónického a cylindrického vlnovodu, kde kónický vlnovod slouží k navázání zvuku z tlakového reproduktoru do cylindrického vlnovodu délky  $l$ . Příklad takové kombinace je uveden na obrázku **Obr. 3.5.1**, případně na **Obr. 5.4.1**



**Obr. 5.4.1:** Spojení kónického a cylindrického vlnovodu

### 5.4.1 Odvození impedance cylindrického vlnovodu konečné délky

Na základě vztahu 5.4.1 převzatého z [4] definujme vstupní impedanci cylindrického vlnovodu  $Z_2$ , pomocí výstupní impedance  $Z_3$ . Pro zjednodušení předpokládejme bezztrátový vlnovod bez tření.

$$Z_2 = Z_0 \times \frac{Z_3 \cos kl + Z_0 j \sin kl}{Z_3 j \sin kl + Z_0 \cos kl} \quad (5.4.1)$$

Kde:

$Z_0$  je vlnová impedance prostředí

$Z_2$  je vstupní vlnová impedance cylindrického vlnovodu

$Z_3$  je výstupní vlnová impedance cylindrického vlnovodu

$l$  je délka cylindrického vlnovodu, a kde

$$k = \frac{\omega}{c_0} \quad (5.4.2)$$

Jelikož na začátku, stejně jako na konci cylindrického vlnovodu je okolní prostředí tvořeno vzduchem, zároveň se nijak nemění průřez vlnovodu, je tedy možné předpokládat, že:

$$Z_2 = Z_3 = Z_0 = c_0 \rho \quad (5.4.3)$$

Kompletní odvození impedance cylindrického vlnovodu je uvedeno v příloze C. Na základě vztahu 5.4.1 lze předpokládat, že impedance válcového vlnovodu je tvořena pouze frekvenčně nezávislým vlnovým odporem  $Z_0$ . Rozměry válcového vlnovodu tedy nejsou závislé na frekvenci. Jiná situace však nastává v případě kónického vlnovodu.

#### 5.4.2 Odvození impedance kónického vlnovodu konečné délky

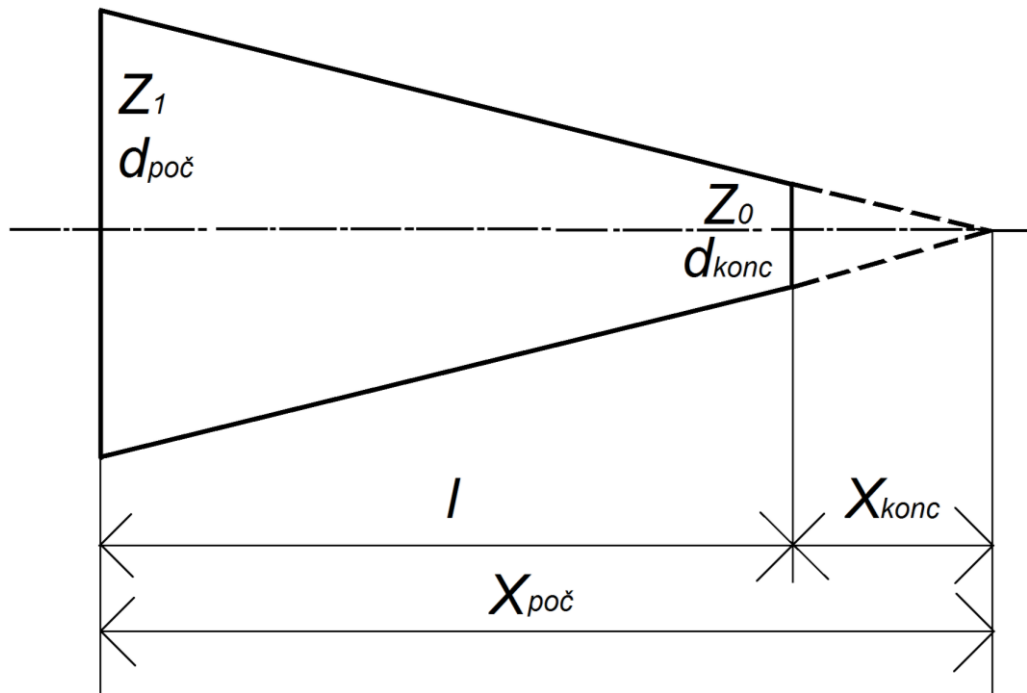
Dle [1] a [2] je možné jako zdroj pro vyšší frekvence použít tlakový měnič hrající do zužující se válcové trubice. Tuto trubici lze chápat jako kónický vlnovod konečné délky zakončený impedancí  $Z_0$ . Podobně jako v případě cylindrického vlnovodu byla odvozena vstupní impedance  $Z_1$ , pomocí výstupní impedance  $Z_0$ . Odvození impedance kónického vlnovodu je uvedeno v příloze. Impedance  $Z_1$  je dána vztahem 5.4.4.

$$\frac{Z_1}{Z_0} = jkx_{poč} \frac{(2jkx_{konc} - 1)e^{-jkl} + e^{jkl}}{(2jkx_{konc} - 1)(jkx_{poč} + 1)e^{-jkl} + (-jkx_{poč} + 1)e^{jkl}} \quad (5.4.4)$$

Kde:

$$x_{konc} = \frac{d_{konc} \times l}{d_{poč} - d_{konc}} \quad (5.4.5)$$

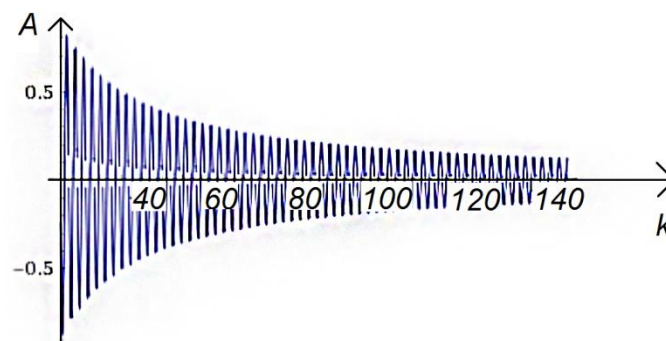
$$x_{poč} = \frac{d_{poč} \times l}{d_{poč} - d_{konc}} \quad (5.4.6)$$



Obr. 5.4.2 – Ilustrační náčrt kónického vlnovodu

Rozměry  $d_{poč}$ ,  $d_{konc}$ ,  $X_{poč}$ ,  $X_{konc}$  a  $l$  jsou patrné z obrázku **Obr. 5.4.2**, přičemž  $d_{poč}$  odpovídá rozměru zvoleného tlakového reproduktoru, zvolme např.  $d_{poč} = 4 \text{ cm}$ , což velikostí odpovídá 1,5 palcovému tlakovému reproduktoru. Dále  $d_{konc}$  odpovídá výstupnímu průměru, zvoleného dle doporučení [1], nebo [2]. Pro frekvence až do 10 kHz, se doporučuje použít výstupní průměr vlnovodu  $d_{konc} < 10 \text{ mm}$  a délku  $l > 1,5 \text{ m}$ . Dosazením těchto rozměrů do rovnic 5.4.5 a 5.4.6 dostaneme, že  $X_{poč} = 2 \text{ m}$  a  $X_{konc} = 0,5 \text{ m}$ .

Dosazením rozměrů  $X_{poč}$  a  $X_{konc}$  do vztahu 5.4.4 dostaneme frekvenční průběh vlnové impedance vlnovodu:



Obr. 5.4.3: Frekvenční průběh vlnové impedance kónického vlnovodu o zvolených rozměrech

Na vodorovné ose je  $k$ , které je dáno rovnicí 5.4.2 a na svislé ose je přenos  $A$  v dB. Frekvenci 2000 Hz odpovídá  $k$  na vodorovné ose přibližně  $k = 36$  a frekvenci 8000 Hz

přibližně odpovídá  $k = 145$ . Z uvedeného obrázku je patrné, že přenos vlnovodem kolísá v daném pásmu maximálně v rozmezí  $\pm 0,5$  dB, což zajišťuje požadovanou stabilitu sousedních  $1/3$  oktávových pásem dle kapitoly 2. Směrnost takového zdroje je pak dána výstupním průměrem  $d_{konc}$ .

### 5.4.3 Výběr tlakového reproduktoru pro vlnovod.

Je potřeba vybrat takový reproduktor, který má co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiku pro pásmo, ve kterém má být použit. Dále je třeba dbát na to, aby byl reproduktor pro dané měření schopen dodat dostatečný výkon. Jako vhodný se jeví např. reproduktor DE360 od B&C speakers. Ilustrační foto je uvedeno na obrázku **Obr. 5.4.4**.



**Obr. 5.4.4:** Ilustrační foto tlakového reproduktoru DE360 (dostupný z

## 6 Závěr

V kapitole č. 1 jsou shrnuty požadavky norem [1] a [2] pro ověřování akustických parametrů pro volné akustické pole. Je vysvětleno i ověřování akustických parametrů volného akustického pole založené na principu poklesových křivek.

V kapitole č. 2 jsou shrnuty veškeré požadavky na zkušební zdroje sepsaných z [1], [2] a [3]. Pokud se požadavky v jednotlivých normách lišily, byl vždy brán v potaz pokaždé ten nejpřísnější požadavek.

V kapitole č. 3 jsou popsány používané koncepce zkušebních zdrojů.

V kapitole č. 4 jsou uvedeny výsledky a poznatky provedených orientačních zkoušek prototypů zkušebních zdrojů pro pásmo  $100\text{ Hz}$  až  $2\text{ kHz}$ .

Dále v kapitole č. 5 je popsán návrh zdrojů pro frekvenční pásmo  $100\text{ Hz}$  až  $8\text{ kHz}$  pokrývané pomocí akustického dvojčete, poloprostorového zářiče a kónického, případně kombinací kónického a cylindrického vlnovodu, včetně výpočtu objemů daných zdrojů, v případě vlnovodů impedancí, a výběru vhodných reproduktorů. Cílem této práce měl být návrh, konstrukce a ověření funkčnosti zkonstruovaných zdrojů. Přestože byly sestrojeny a změřeny prototypy zkušebních zdrojů, byly splněny pouze dva body zadání, jelikož uvedená zkouška měla spíše orientační charakter a měla podpořit návrh zkušebních zdrojů, jenž se ukázal jako velmi sofistikovaný a časově velmi náročný problém, i s ohledem na čekací lhůty při objednávání vybraných reproduktorů.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČSN ISO 3745. *Akustika - Určení hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [2] ČSN ISO 26101. *Akustika – Zkušební metody určování způsobilosti prostředí volného pole*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [3] ČSN ISO 26101. *Akustika – Požadavky na vlastnosti a kalibraci referenčních zdrojů zvuku používaných pro určování hladin akustického výkonu*. Český normalizační institut - 2001.
- [4] MERHAUT, Josef. *Teoretické základy elektroakustiky*. Academia, 1971.
- [5] SÝKORA, Bohumil. Reprodukory a reproduktorové soustavy trochu jinak. *Amatérské rádio, B/5*, 1993.
- [6] Boleslav, A., Jončev, M. Reprodukory a reproduktorové soustavy. *Amatérské rádio, B/2*, 1984.
- [7] TOMAN, Kamil. *Reprodukory a reprosoustavy: 1. díl*. Dexon, 2003.
- [8] ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. Praha: Academia, 2001.
- [9] BERANEK, Leo Leroy; MELLOW, Tim J. *Acoustics: sound fields and transducers*. Academic Press, 2012.
- [10] BERANEK, Leo L. *Acoustics*, American Institute of Physics. Inc., New York, 1986, 101.
- [11] SMETANA, Ctirad. *Praktická elektroakustika*. SNTL, 1981.
- [12] LUKEŠ, Jaroslav. *Věrný zvuk*. Praha: SNTL, 1962. ISBN 80-01-01150-X.
- [13] GOMEZ-ALFAGEME, J. J.; SANCHEZ-BOTE, J. L.; BLANCO-MARTIN, E. Design, Construction, and Qualification of the New Anechoic Chamber at Laboratorio de Sonido, Universidad Politecnica de Madrid. In: *AES 122nd Convention, Preprint*. 2007.
- [14] GÓMEZ ALFAGEME, Juan José; SANCHEZ BOTE, José Luis; BLANCO MARTÍN, Elena. New measurement methods for anechoic chamber characterization.
- [15] CUNEFARE, Kenneth A., et al. Anechoic chamber qualification: Traverse method, inverse square law analysis method, and nature of test signal. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 113.2: 881-892.
- [16] CUNEFARE, Kenneth A.; BADERTSCHER, Jeff; WITTSTOCK, Volker. On the qualification of anechoic chambers; Issues related to signals and bandwidth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120.2: 820-829.
- [17] PALCHIKOVSKIY, V. V., et al. Tests of anechoic chamber for aeroacoustics investigations. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2016. p. 030116.
- [18] BERANEK, Leo L.; SLEEPER JR, Harvey P. The design and construction of anechoic sound chambers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1946, 18.1: 140-150.
- [19] HÜBNER, Gerhard. Qualification procedures for free-field conditions for sound-power determination of sound sources and methods for the determination of the appropriate environmental correction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, 61.2: 456-464.
- [20] WINKER, Douglas; CHADHA, Ankit; RISTROPH, Einar. Source design considerations for qualifying hemi-anechoic chamber in compliance with ISO 3745. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Institute of Noise Control Engineering, 2007. p. 585-595.
- [21] CHADHA, Ankit; WINKER, Douglas F.; RISTROPH, Einar. Sound source near field and directionality impacts on hemi-anechoic chamber qualification. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Institute of Noise Control Engineering, 2008. p. 1265-1274.
- [22] MALING, George C.; WISE, Russell E.; NOBILE, Matthew A. Draw-away testing for qualification of hemi-anechoic rooms. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Institute of Noise Control Engineering, 1990. p. 363-368.
- [23] ÅGREN, Anders. The design and evaluation of a hemi-anechoic engine test room. *Applied Acoustics*, 1992, 37.2: 151-161.
- [24] YU, Guang-Zheng; XIE, Bo-Sun; RAO, Dan. Directivity of spherical polyhedron sound source used in near-field HRTF measurements. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27.12: 124302-124302.



- [25] LEISHMAN, Timothy W.; ROLLINS, Sarah; SMITH, Heather M. An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 120.3: 1411-1422.
- [26] PASQUAL, Alexander Mattioli; HERZOG, Philippe; ARRUDA, José Roberto de França. Theoretical and experimental analysis of the electromechanical behavior of a compact spherical loudspeaker array for directivity control. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 128.6: 3478-3488.
- [27] VALTCHEV, Plamen; DIMITROV, Dimitar; ARTARSKI, Rumen. Spherical Sound Source for Acoustic Measurements. In: *Audio Engineering Society Convention 133*. Audio Engineering Society, 2012.
- [28] HAK, C. C. J. M., et al. The source directivity of a dodecahedron sound source determined by stepwise rotation. In: *Proceedings of Forum Acusticum, Aalborg*. 2011.
- [29] WARUSFEL, Olivier, et al. Reproduction of sound source directivity for future audio applications. In: *Proc. International Congress on Acoustics*. 2004.
- [30] PASQUAL, Alexander Mattioli. *Sound directivity control in a 3-D space by a compact spherical loudspeaker array*. 2010. PhD Thesis. Universidade Estadual de Campinas.
- [31] WINKER, Douglas. The influences of changes in international standards on performance qualification and design of anechoic and hemi-anechoic chambers. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Institute of Noise Control Engineering, 2016. p. 4693-4700.
- [32] KOPIEV, V. F., et al. Design and qualification of an anechoic facility in PNRPU. *Procedia Engineering*, 2017, 176: 264-272.
- [33] BIESEL, Van B.; CUNEFARE, Kenneth A. A test system for free-field qualification of anechoic chambers. *Sound and Vibration*, 2003, 37.5: 22-26.
- [34] MELDRUM, Bruce H.; THORLEY, A. A simplified method for the determination of the quality of an anechoic space at the CSIRO National Measurement Laboratory. 2002.
- [35] Bethke, Ch., Wittstock, V. Technical aspects in the qualification of free-field environments. International Conference on Acoustics; NAG-DAGA 2009; 2009; Rotterdam, Netherlands
- [36] WINKER, Douglas, et al. *A precision grade, wide bandwidth source for the qualification of hemi-anechoic chambers*. In: *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*. Institute of Noise Control Engineering, 2008. p. 779-787.
- [37] ČSN EN ISO 10140-5. *Akustika – Laboratorní měření zvukové izolace stavebních konstrukcí – Část 5: Požadavky na zkušební zařízení a přístrojové vybavení místnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [38] ČSN EN ISO 140-3. *Akustika. Měření zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách. Část 3: Laboratorní měření vzduchové neprůzvučnosti stavebních konstrukcí (ISO 140-3:1995)*. Český normalizační institut, 1996
- [39] <http://www.mip.fi/en/component/virtuemart/acoustics-and-noise/rakennusakustiikka/norsonic-nor275-puolipallokaiutin-detail?Itemid=0>
- [40] <https://iaem.at/projekte/sphericalarrays/compact-spherical-loudspeaker-arrays>
- [41] <https://iaem.at/projekte/sphericalarrays/compact-spherical-loudspeaker-arrays>
- [42] <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/sound-sources/reference-4204>
- [43] <http://www.visaton.de/en/products/bass-midranges/w-100-s-4-ohm>
- [44] <http://www.visaton.de/en/products/drivers-accessories/woofers/w-130-x-2-x-4-ohm>
- [45] <http://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/4-0/8/4nds34-8>
- [46] <http://www.visaton.de/en/products/bass-midranges/wf-130-nd-8-ohm>
- [47] <https://celestion.com/product/76/ntr061705d/>
- [48] <http://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/3-5/8/35ndf26>
- [49] <http://www.bcspeakers.com/en/products/hf-driver/1-0/8/de360-8>
- [50] <http://www.visaton.de/en/products/bass-midranges/w-100-s-4-ohm>
- [51] <https://celestion.com/product/76/ntr061705d/>
- [52] <http://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/5-0/8/5ndl38-8>
- [53] <http://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/6-5/8/6ndl38-8>
- [54] <https://celestion.com/product/191/ntr0617x/>
- [55] <http://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/3-5/8/35ndf26>
- [56] <https://celestion.com/product/77/ntr061705b/>

- [57] [http://www.eminence.com/speakers/speaker-detail/?model=Pro\\_5W\\_8](http://www.eminence.com/speakers/speaker-detail/?model=Pro_5W_8)
- [58] [http://www.faitalpro.com/en/products/LF\\_Loudspeakers/product\\_details/index.php?id=101020150](http://www.faitalpro.com/en/products/LF_Loudspeakers/product_details/index.php?id=101020150)
- [59] <http://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/4-0/8/4ndf34>
- [60] [http://www.faitalpro.com/en/products/LF\\_Loudspeakers/product\\_details/index.php?id=101010100](http://www.faitalpro.com/en/products/LF_Loudspeakers/product_details/index.php?id=101010100)
- [61] <http://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/5-0/8/5mdn38-8>
- [62] <http://www.bcspeakers.com/en/products/lf-driver/6-5/8/6mbx44-8>
- [63] <http://www.visaton.de/en/products/fullrange-systems/ws-13-e-8-ohm>
- [64] [http://www.eminence.com/speakers/speaker-detail/?model=Alphalite\\_6A](http://www.eminence.com/speakers/speaker-detail/?model=Alphalite_6A)

## Přílohy

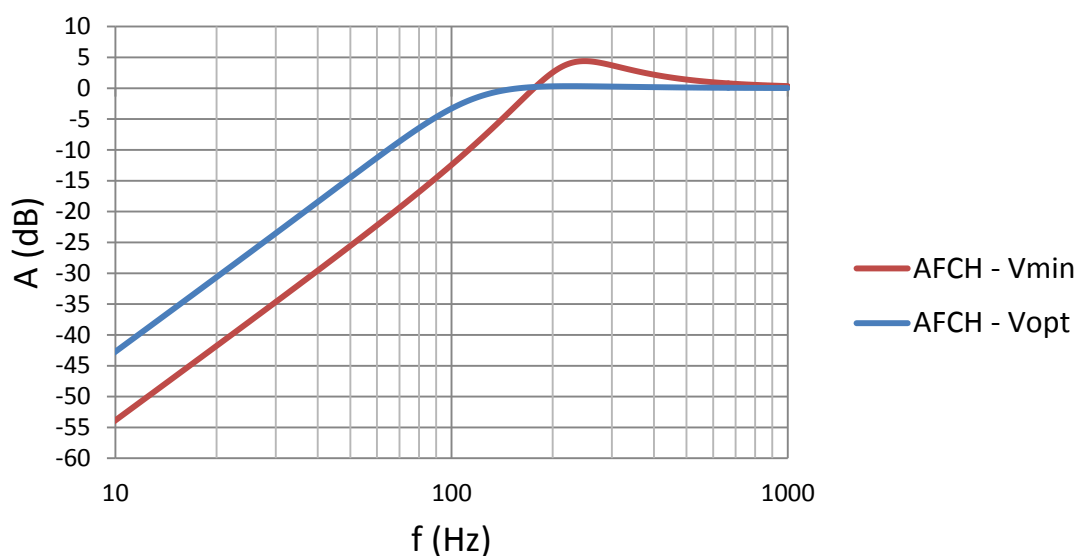
### Příloha A: A-F charakteristiky dalších reproduktorů, vyhodnocovaných v rámci výběru reproduktorů pro konstrukci akustického dvojčete

#### W 100 S - 4 Ohm - Visaton



Obr. A 1: Ilustrační foto reproduktoru W100S – dostupný z [50]

### A-F Charakteristiky pro W 100 S - 4 Ohm



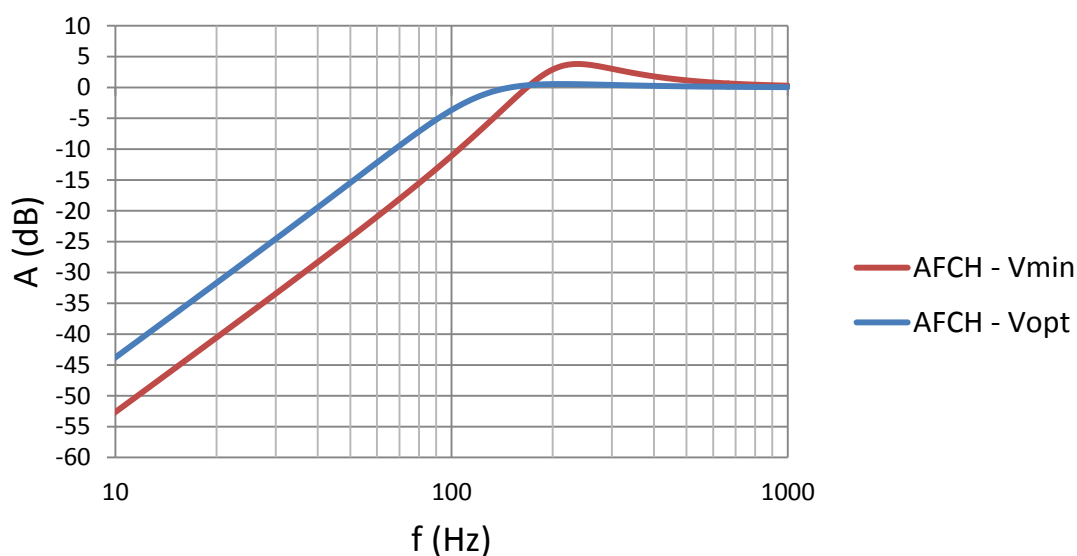
Obr. A 2: A-F charakteristiky reproduktoru W100S pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,49	65	0,46	0,420139	2	70	53

Tab. A 1: Limitující parametry reproduktoru W 100 S

**NTR06-1705D - Celestion**

Obr. A 3: Ilustrační foto reproduktoru NTR06-1705D - dostupný z [51]

**A-F Charakteristiky pro NTR06-1705D**Obr. A 4: A-F charakteristiky reproduktoru NTR06-1705D pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
10	59,8	0,42	0,908607	3	44	154

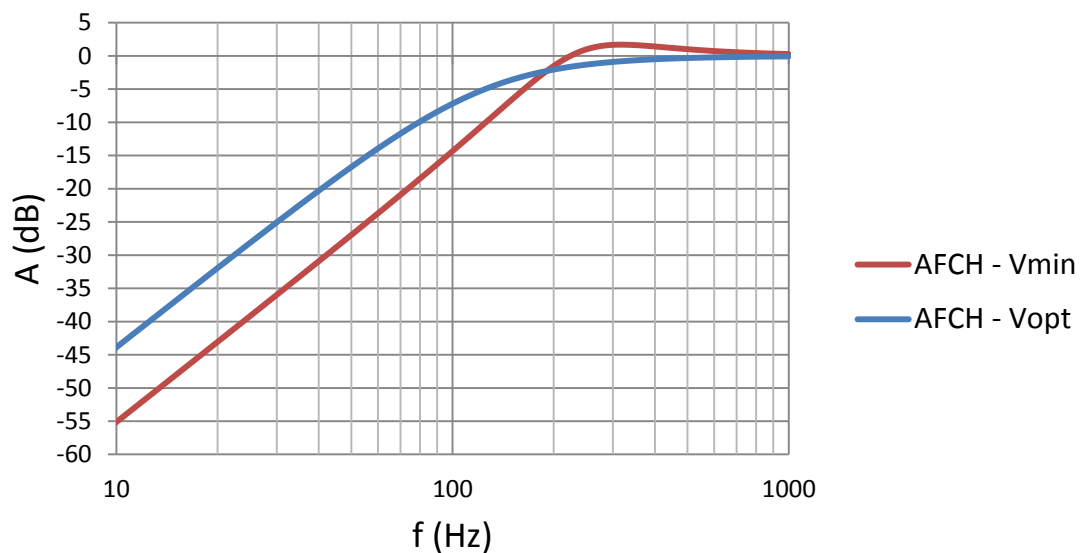
Tab. A 2: Limitující parametry reproduktoru NTR06-1705D

## 5NDL38 – B&amp;C Speakers



Obr. A 5: Ilustrační foto reproduktoru 5NDL38 - dostupný z [52]

## A-F Charakteristiky pro 5NDL38

Obr. A 6: A-F charakteristiky reproduktoru 5NDL38 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,3	80	0,36	0,542531	3	38	95

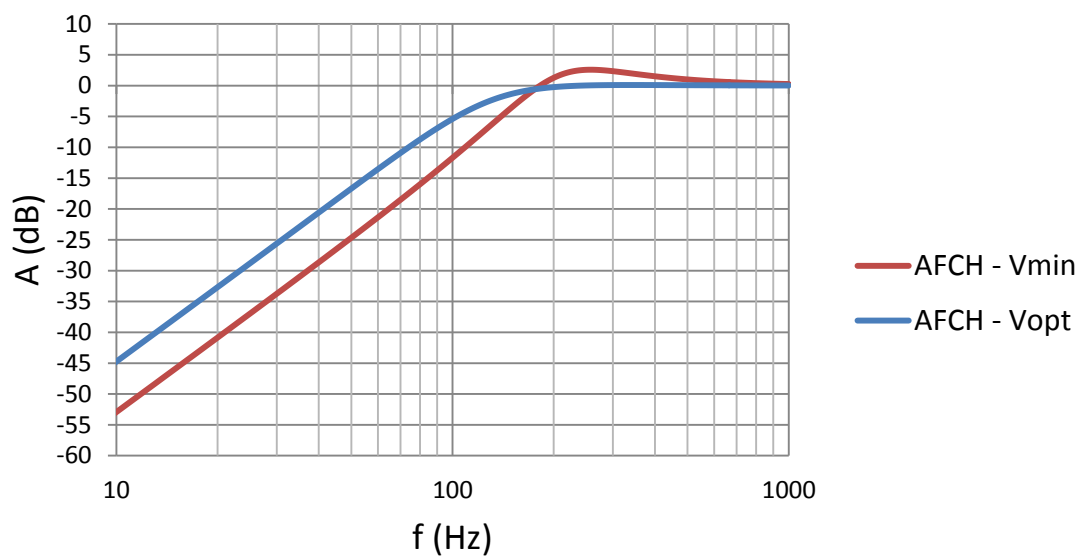
Tab. A 3: Limitující parametry reproduktoru 5NDL38

## 6NDL38 – B&amp;C Speakers



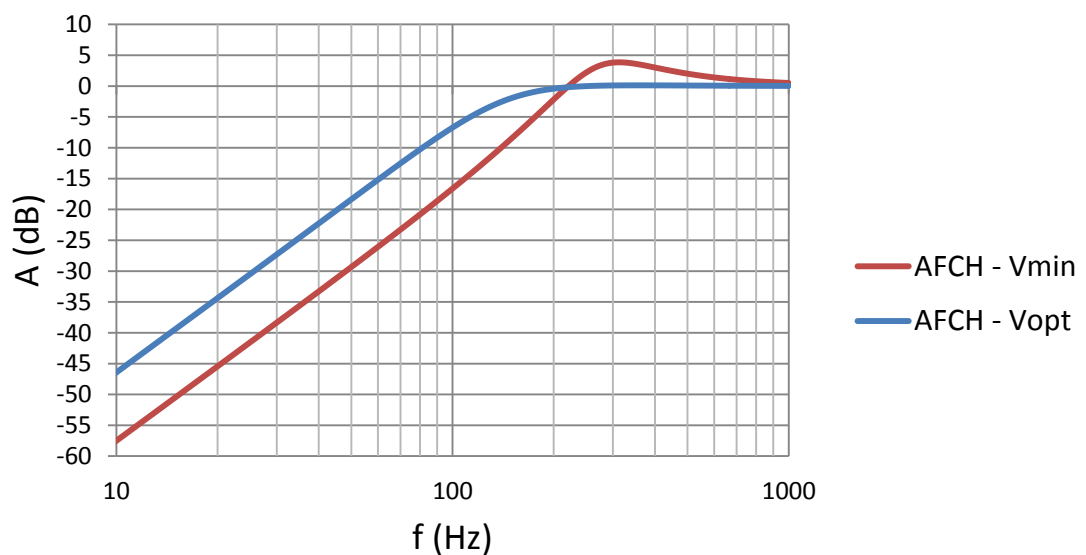
Obr. A 7: Ilustrační foto reproduktoru 6NDL38 - dostupný z [53]

## A-F Charakteristiky pro 6NDL38

Obr. A 8: A-F charakteristiky reproduktoru 6NDL38 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
7	72	0,42	0,925293	3	38	132

Tab. A 4: Limitující parametry reproduktoru 6NDL38

**NTR06-17X - Celestion****Obr. A 9:** Ilustrační foto reproduktoru NTR06-17x - dostupný z [54]**A-F Charakteristiky pro NTR06-17x****Obr. A 10:** A-F charakteristiky reproduktoru NTR06-17x pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

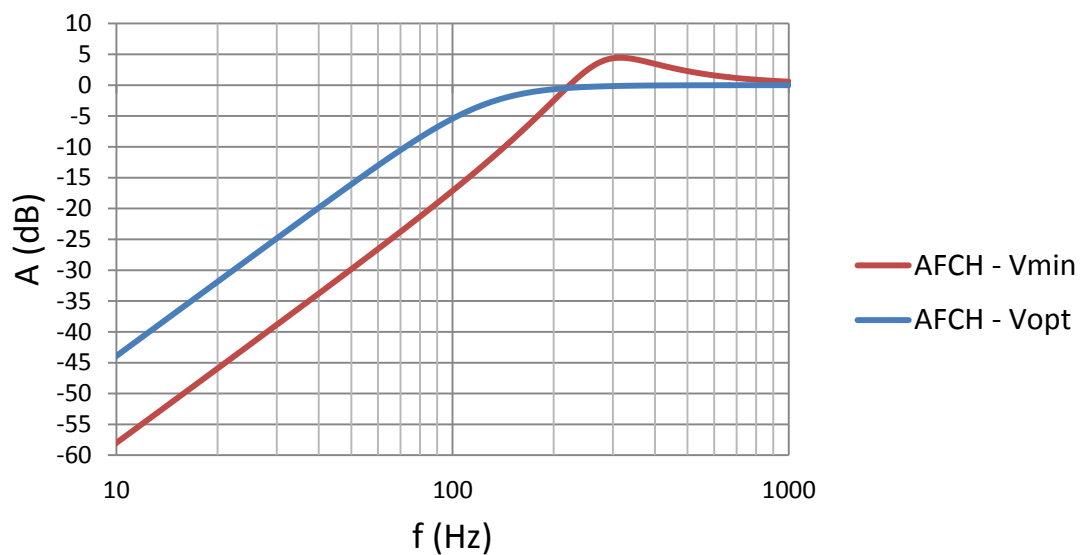
$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
13,81	61,2	0,327	0,724442	3	45	154

**Tab. A 5:** Limitující parametry reproduktoru NTR06-17x

## 35NDF26 – B&amp;C Speakers



Obr. A 11: Ilustrační foto reproduktoru 35NDF26 - dostupný z [55]

A-F Charakteristiky pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ Obr. A 12: A-F charakteristiky reproduktoru 35NDF26 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

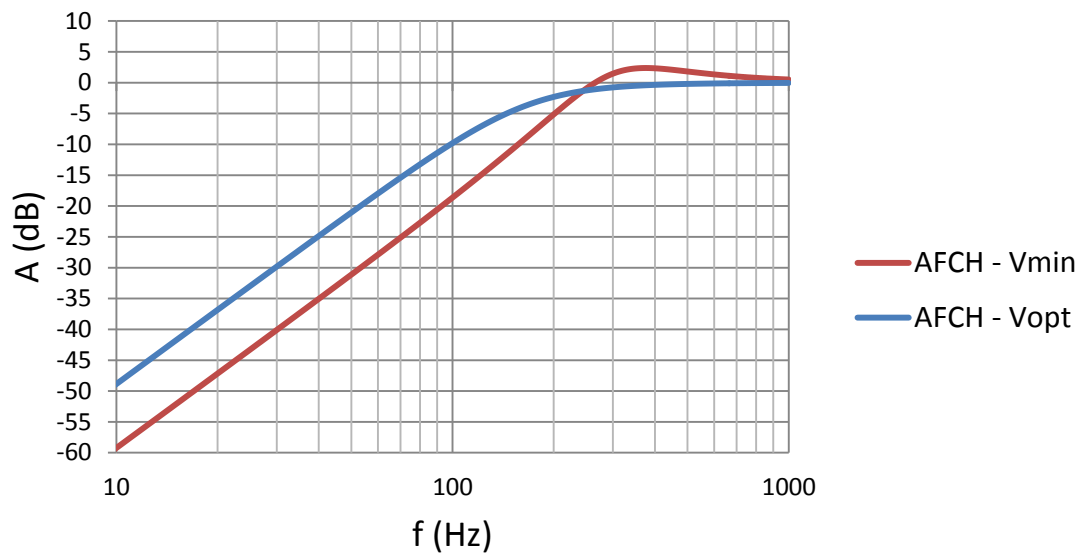
$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
1,9	98	0,55	0,260801	3	26	46

Tab. A 6: Limitující parametry reproduktoru 35NDF26



**NTR06-1705B - Celestion**

Obr. A 13: Ilustrační foto reproduktoru NTR06-1705B - dostupný z [56]

**A-F Charakteristiky pro NTR06-1705B**Obr. A 14: A-F charakteristiky reproduktoru NTR06-1705B pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

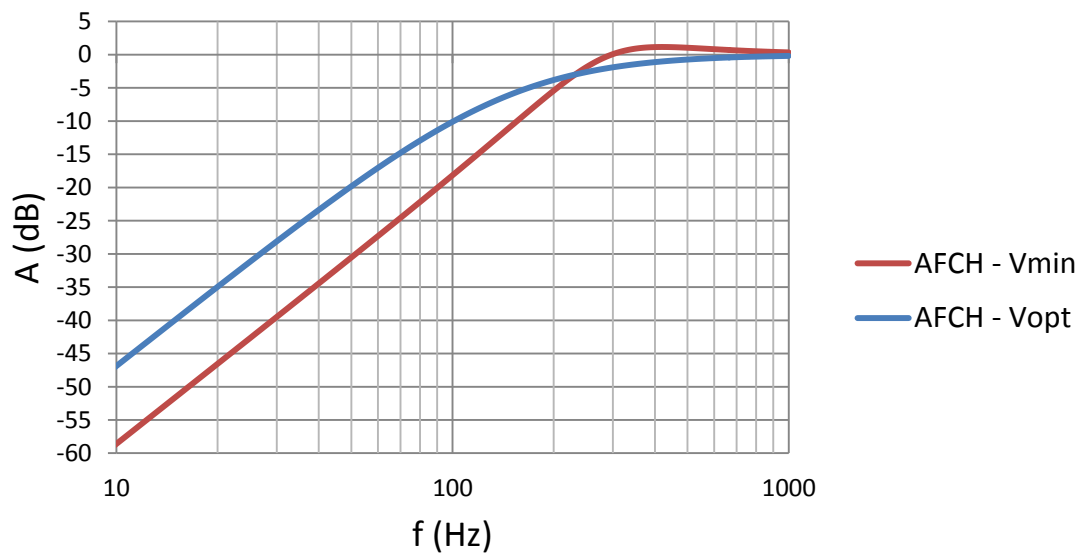
$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4	109	0,43	0,596386	3	44	154

Tab. A 7: Limitující parametry reproduktoru NTR06-1705B

## PRO 5W-8 - Eminence

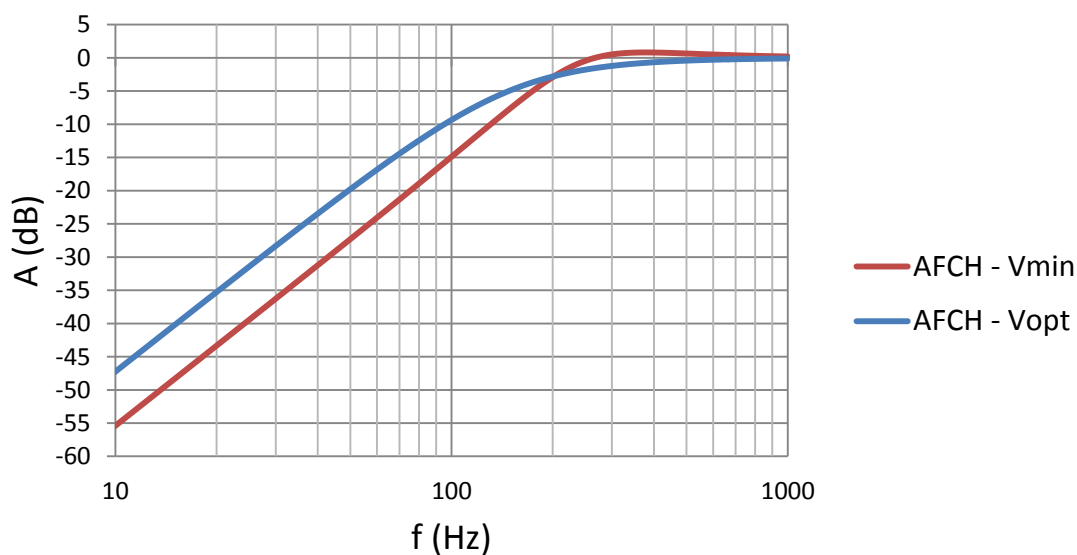


Obr. A 15: Ilustrační foto reproduktoru PRO 5W-8 - dostupný z [57]

A-F Charakteristiky pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ Obr. A 16: A-F charakteristiky reproduktoru PRO 5W-8 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,31	95	0,32	0,510415	3	25	66,6

Tab. A 8: Limitující parametry reproduktoru PRO 5W-8

**W6N8-120 – FaitalPRO****Obr. A 17:** Ilustrační foto reproduktoru W6N8-120 - dostupný z [58]**A-F Charakteristiky pro W6N8-120****Obr. A 18:** A-F charakteristiky reproduktoru W6N8-120 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

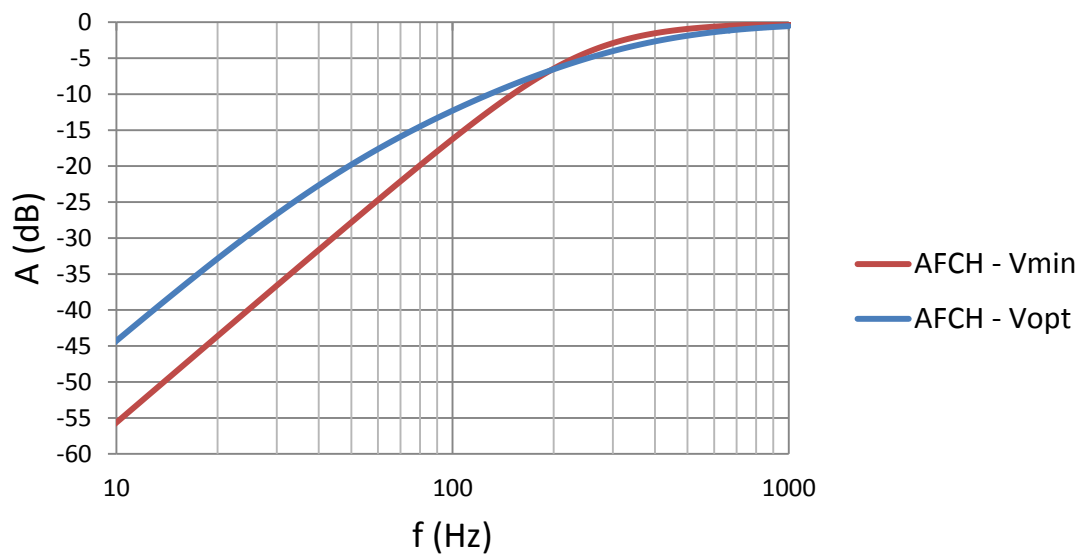
$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
3,9	100	0,38	0,797344	3	37	113

**Tab. A 9:** Limitující parametry reproduktoru W6N8-120

## 4NDF34 – B&amp;C Speakers



Obr. A 19: Ilustrační foto reproduktoru 4NDF34 - dostupný z [59]

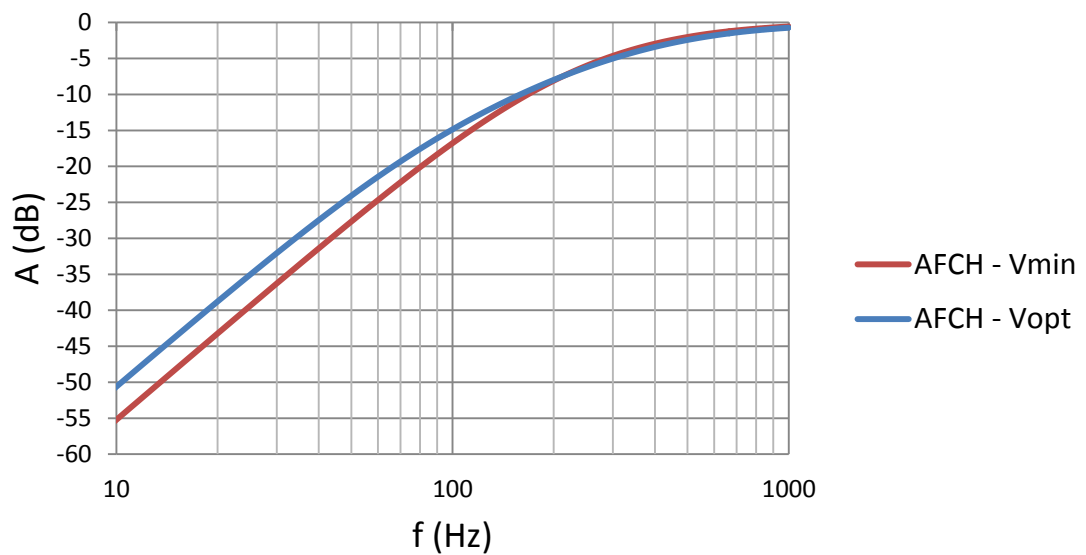
A-F Charakteristiky pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ Obr. A 20: A-F charakteristiky reproduktoru 4NDF34 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
1,6	110	0,27	0,399714	5	33	57

Tab. A 10: Limitující parametry reproduktoru 4NDF34

**M5N8-80 – FaitalPRO**

Obr. A 21: Ilustrační foto reproduktoru M5N8-80 - dostupný z [60]

**A-F Charakteristiky pro M5N8-80**Obr. A 22: A-F charakteristiky reproduktoru M5N8-80 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
0,4	180	0,36	0,515454	10	32	94,2

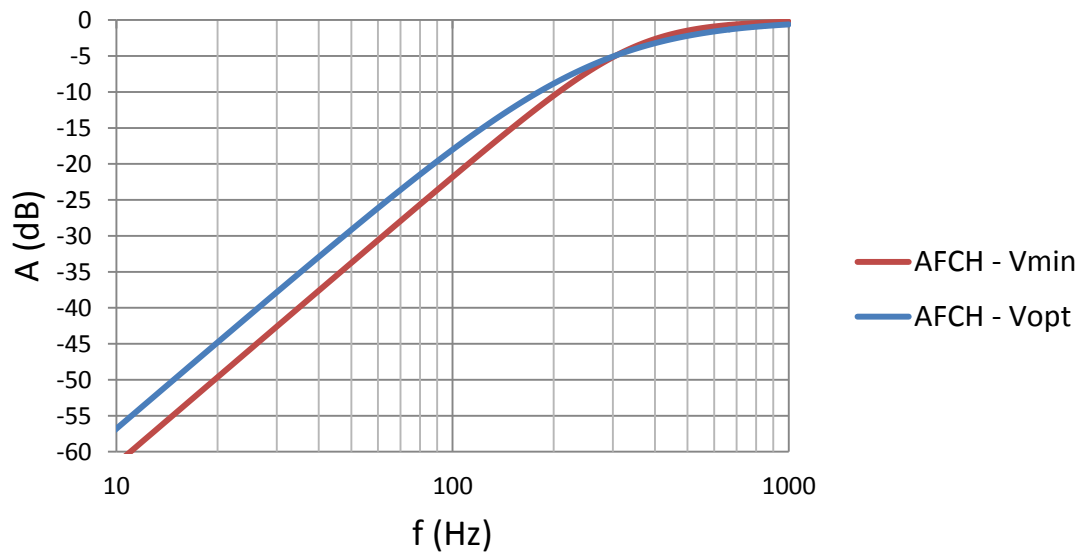
Tab. A 11: Limitující parametry reproduktoru M5N8-80

## 5MDN38 – B&amp;C Speakers



Obr. A 23: Ilustrační foto reproduktoru 5MDN38 - dostupný z [61]

## A-F Charakteristiky pro 5MDN38

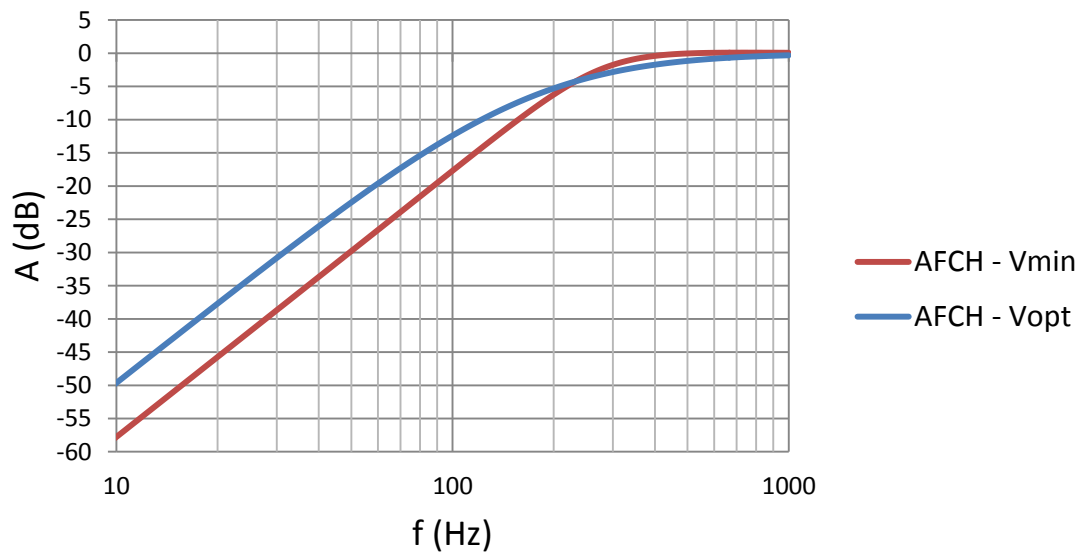
Obr. A 24: A-F charakteristiky reproduktoru 5MDN38 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
0,6	240	0,45	0,542531	3	38	95

Tab. A 12: Limitující parametry reproduktoru 5MDN38

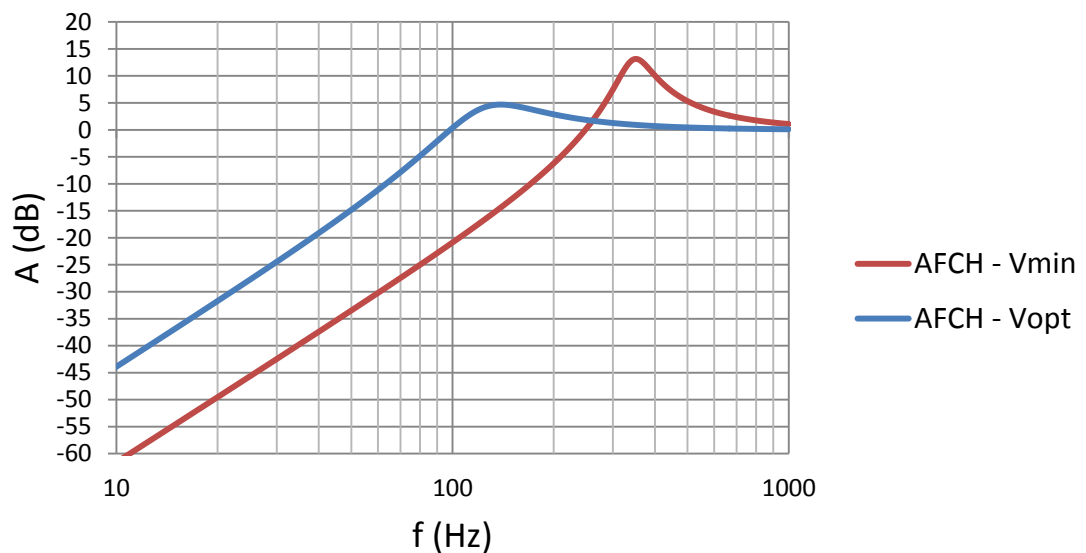
**6MBX44**

Obr. A 25: Ilustrační foto reproduktoru 6MBX44 - dostupný z [62]

**A-F Charakteristiky pro 6MBX44**Obr. A 26: A-F charakteristiky reproduktoru 6MBX44 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,1	113	0,31	0,809117	3	44	132

Tab. A 13: Limitující parametry reproduktoru 6MBX44

**WS 13 E - 8 Ohm - Visaton****Obr. A 27:** Ilustrační foto reproduktoru WS13E - dostupný z [63]**A-F Charakteristiky pro WS 13 E****Obr. A 28:** A-F charakteristiky reproduktoru WS13E pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

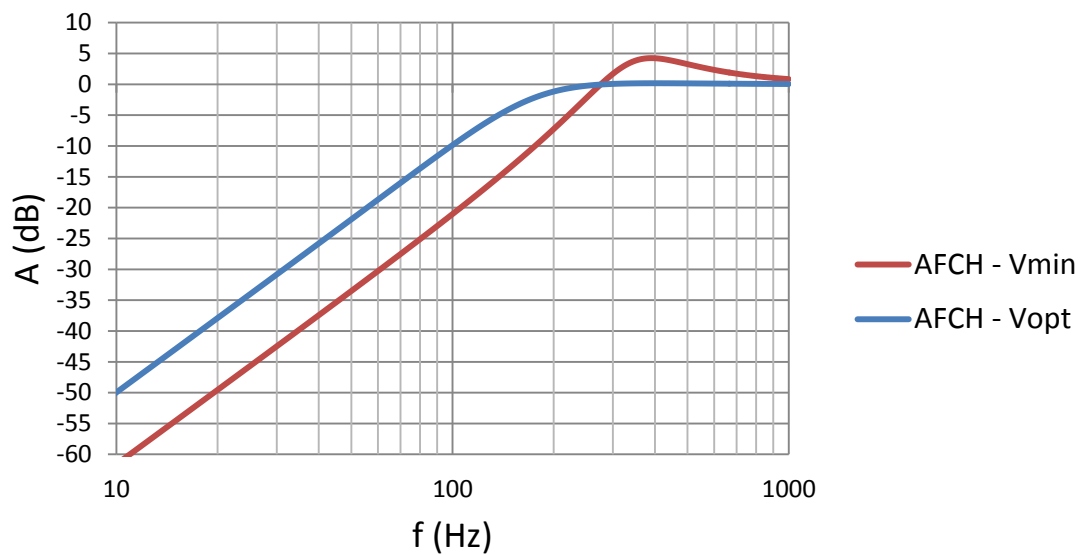
$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
7,7	83	1,08	0,467879	6	65	86,5

**Tab. A 14:** Limitující parametry reproduktoru WS13E



**ALPHALITE™ 6A - Eminence**

Obr. A 29: Ilustrační foto reproduktoru ALPHALITE™ 6A - dostupný z [64]

**A-F Charakteristiky pro ALPHALITE™ 6A**Obr. A 30: A-F charakteristiky reproduktoru ALPHALITE™ 6A pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,92	126	0,56	0,747136	5	38	129

Tab. A 15: Limitující parametry reproduktoru ALPHALITE™

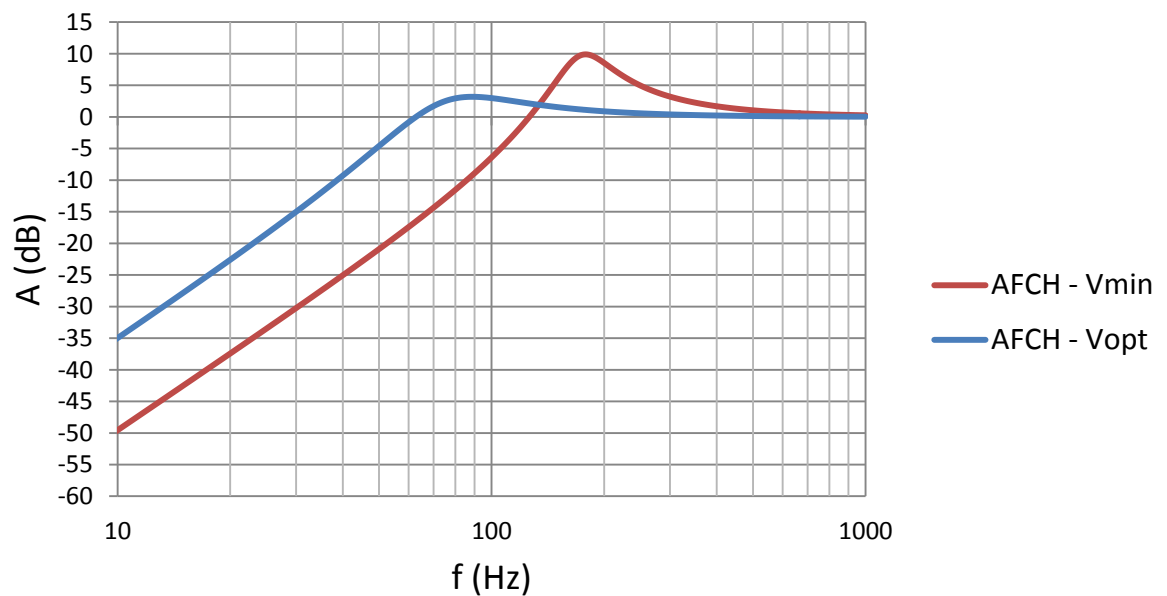
## Příloha B: A-F charakteristiky dalších reproduktorů, vyhodnocovaných v rámci výběru reproduktoru pro konstrukci poloprostorového zářiče

W 130 X \_ 2 x 4 Ohm - Visaton



Obr. B 1: Reproduktor W 130 X - ilustrační foto - dostupné z [44]

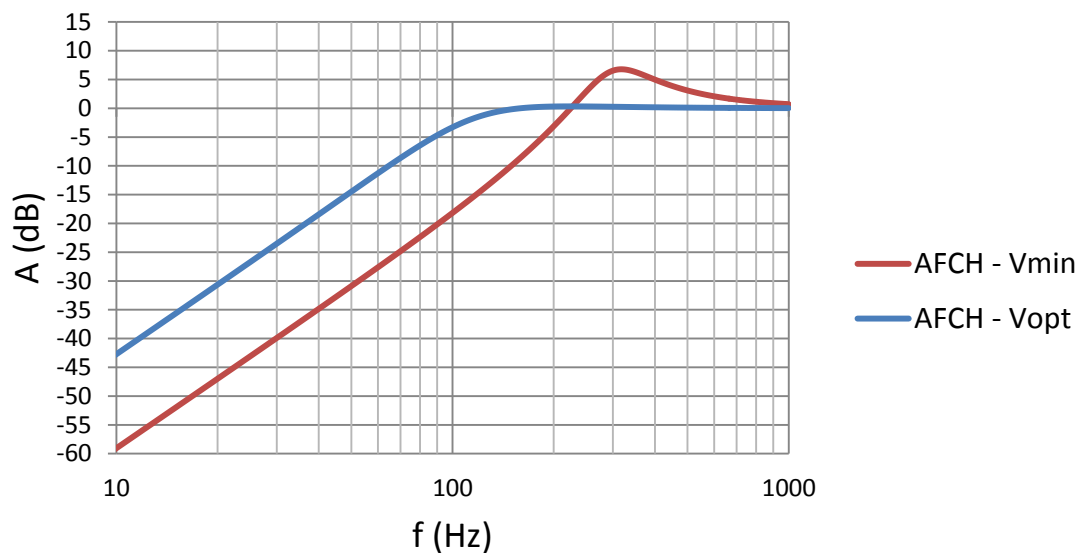
### A-F Charakteristiky pro W 130 X



Obr. B 2: A-F charakteristiky reproduktoru W 130 X pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$

Vas (l)	Fs (Hz)	Qts (-)	Vmin (l)	Vopt (l)	ø magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
5,1	40	0,71	0,285933	2	100	94,2

Tab. B 1: Limitující parametry reproduktoru W 130 X

**W 100 S - 4 Ohm - Visaton****Obr.B 3:** Ilustrační foto reproduktoru W100S – dostupný z [50]**A-F Charakteristiky pro W 100 S****Obr. B 4:** A-F charakteristiky reproduktoru W100S pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,49	65	0,46	0,221759	2	70	53

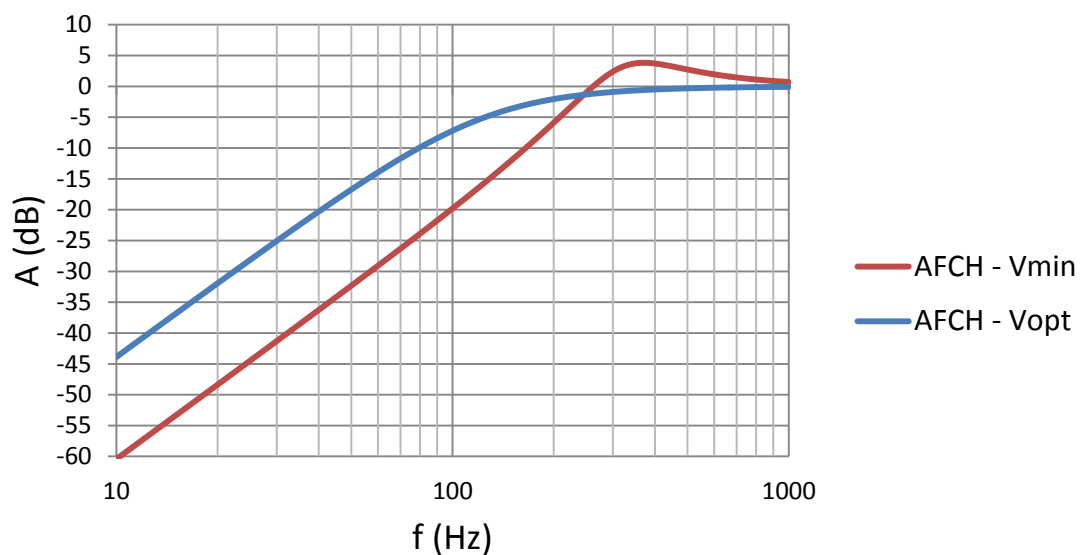
**Tab. B2:** Limitující parametry reproduktoru W 100 S

## 5NDL38 – B&amp;C Speakers



Obr. B 31: Ilustrační foto reproduktoru 5NDL38 - dostupný z [52]

## A-F Charakteristiky pro 5NDL38

Obr. B 32: A-F charakteristiky reproduktoru 5NDL38 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,3	80	0,36	0,542531	3	38	95

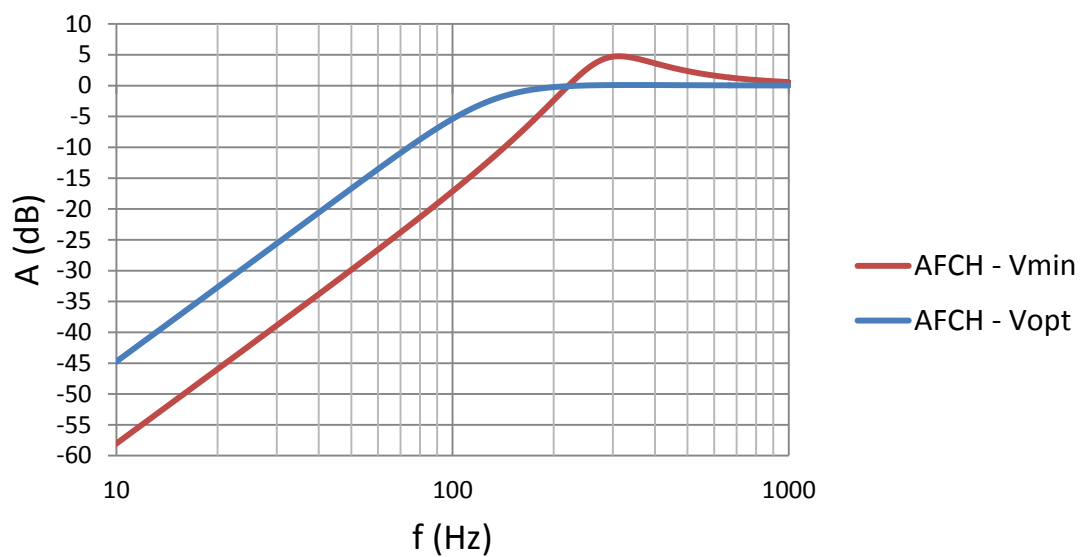
Tab. B 16: Limitující parametry reproduktoru 5NDL38

## 6NDL38 – B&amp;C Speakers



Obr. B 33: Ilustrační foto reproduktoru 6NDL38 - dostupný z [53]

## A-F Charakteristiky pro 6NDL38

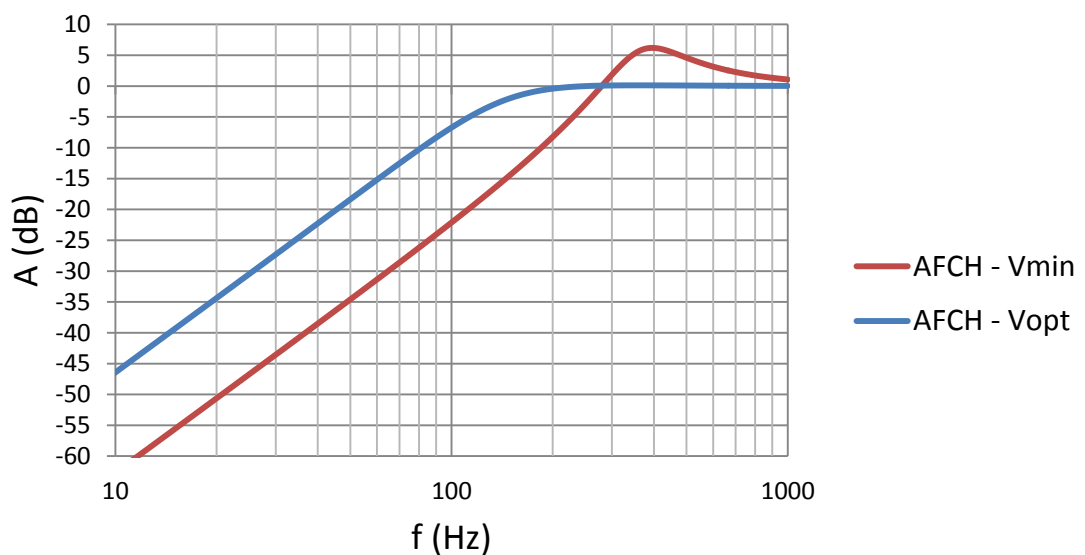
Obr. B 34: A-F charakteristiky reproduktoru 6NDL38 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
7	72	0,42	0,485882	3	38	132

Tab. B 17: Limitující parametry reproduktoru 6NDL38

**NTR06-17X - Celestion**

Obr. B 35: Ilustrační foto reproduktoru NTR06-17x - dostupný z [54]

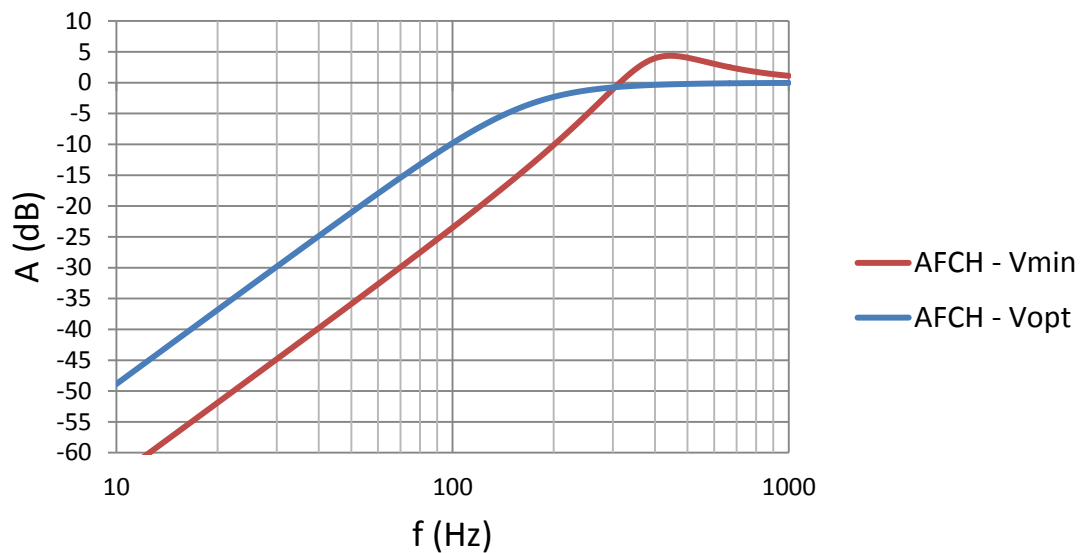
**A-F Charakteristiky pro NTR06-17X**Obr. B 36: A-F charakteristiky reproduktoru NTR06-17x pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
13,81	61,2	0,327	0,390276	3	45	154

Tab. B 18: Limitující parametry reproduktoru NTR06-17x

**NTR06-1705B - Celestion**

Obr. B 371: Ilustrační foto reproduktoru NTR06-1705B - dostupný z [56]

**A-F Charakteristiky pro NTR06-1705B**Obr. B 382: A-F charakteristiky reproduktoru NTR06-1705B pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4	109	0,43	0,326248	3	44	154

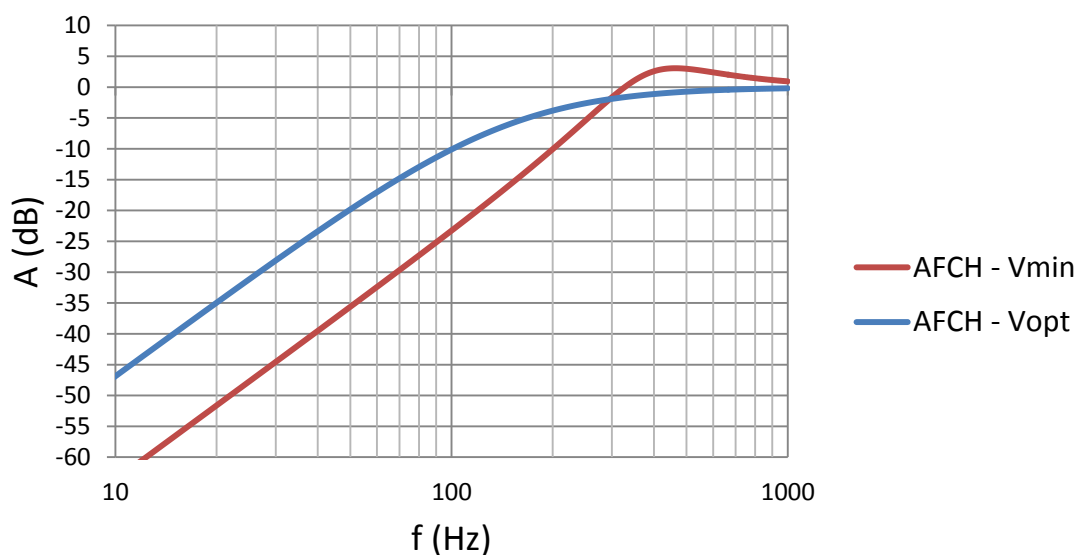
Tab. B 6: Limitující parametry reproduktoru NTR06-1705B

## PRO 5W-8 - Eminence



Obr. B 13: Ilustrační foto reproduktoru PRO 5W-8 - dostupný z [57]

## A-F Charakteristiky pro PRO 5W-8

Obr. B 14: A-F charakteristiky reproduktoru PRO 5W-8 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

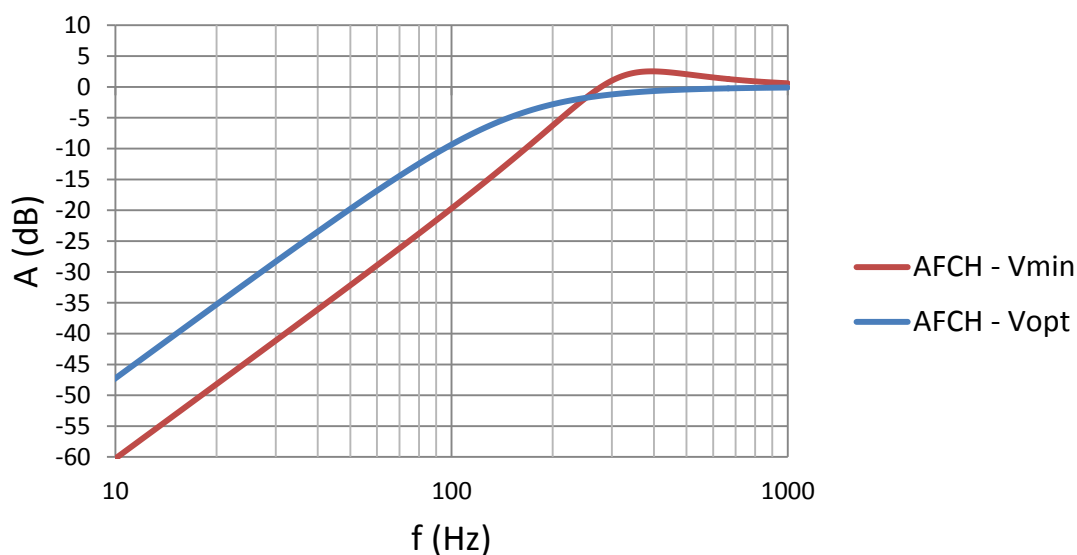
$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,31	95	0,32	0,270854	3	25	66,6

Tab. B 7: Limitující parametry reproduktoru PRO 5W-8



**W6N8-120 – FaitalPRO**

Obr. B 395: Ilustrační foto reproduktoru W6N8-120 - dostupný z [58]

**A-F Charakteristiky pro W6N8-120**Obr. B 406: A-F charakteristiky reproduktoru W6N8-120 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
3,9	100	0,38	0,419284	3	37	113

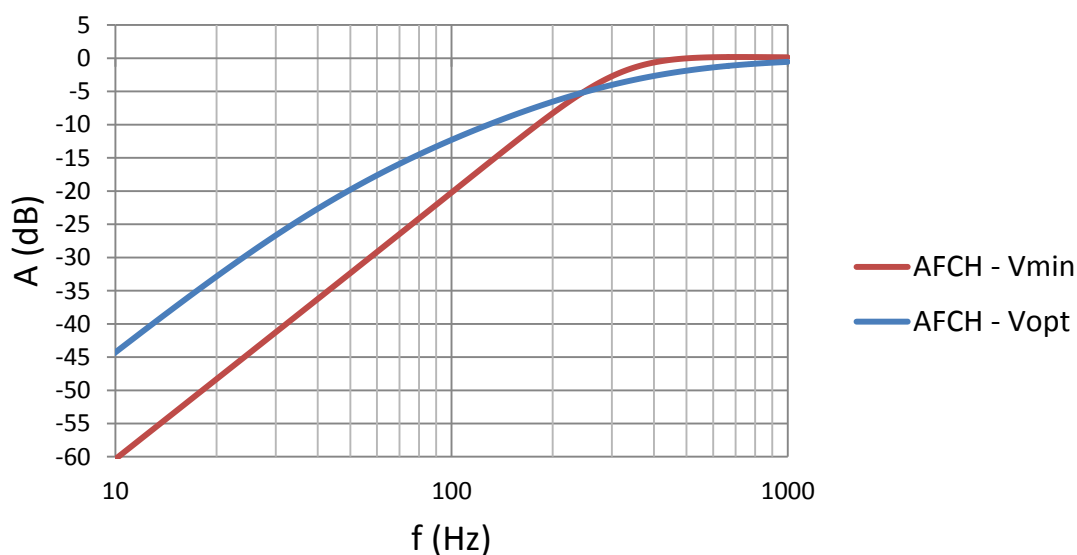
Tab. B 8: Limitující parametry reproduktoru W6N8-120

## 4NDF34 – B&amp;C Speakers



Obr. B 17: Ilustrační foto reproduktoru 4NDF34 - dostupný z [59]

## A-F Charakteristiky pro 4NDF34

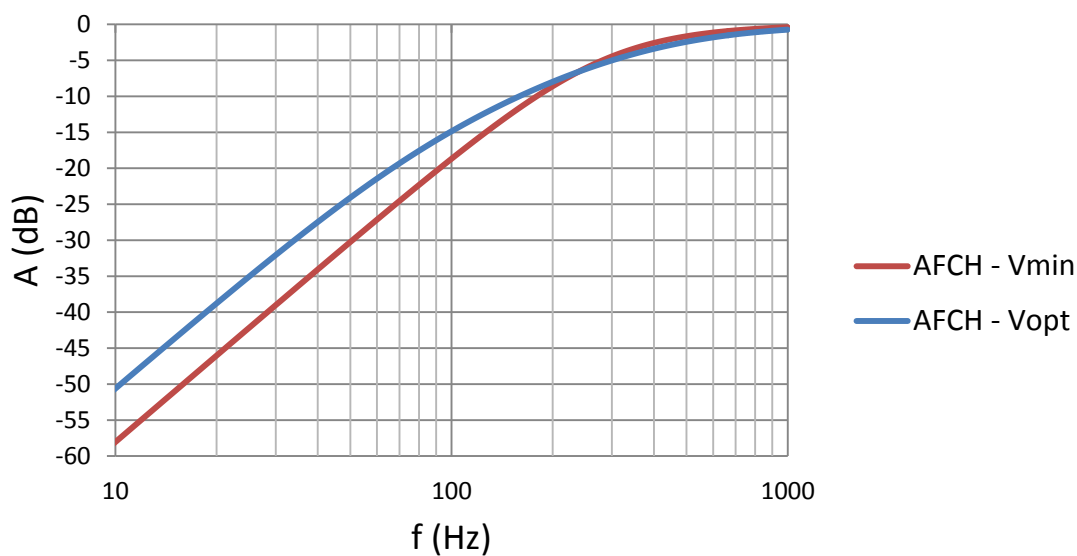
Obr. B 18: A-F charakteristiky reproduktoru 4NDF34 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
1,6	110	0,27	0,210244	5	33	57

Tab. B 9: Limitující parametry reproduktoru 4NDF34

**M5N8-80 – FaitalPRO**

Obr. B 19: Ilustrační foto reproduktoru M5N8-80 - dostupný z [60]

**A-F Charakteristiky pro M5N8-80**Obr. B 20: A-F charakteristiky reproduktoru M5N8-80 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
0,4	180	0,36	0,273121	10	32	94,2

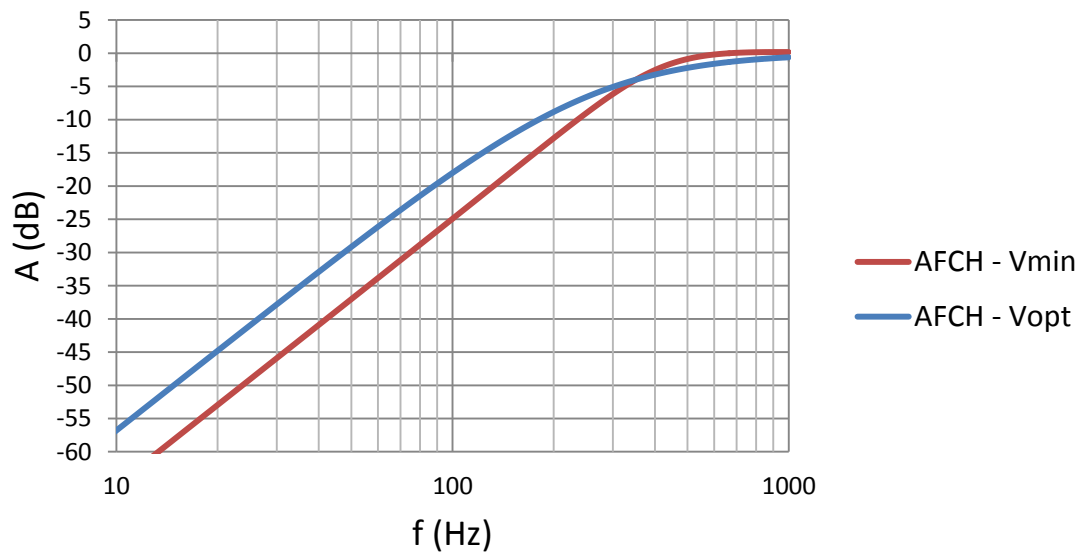
Tab. B10: Limitující parametry reproduktoru M5N8-80

## 5MDN38 – B&amp;C Speakers



Obr. B 21: Ilustrační foto reproduktoru 5MDN38 - dostupný z [61]

## A-F Charakteristiky pro 5MDN38

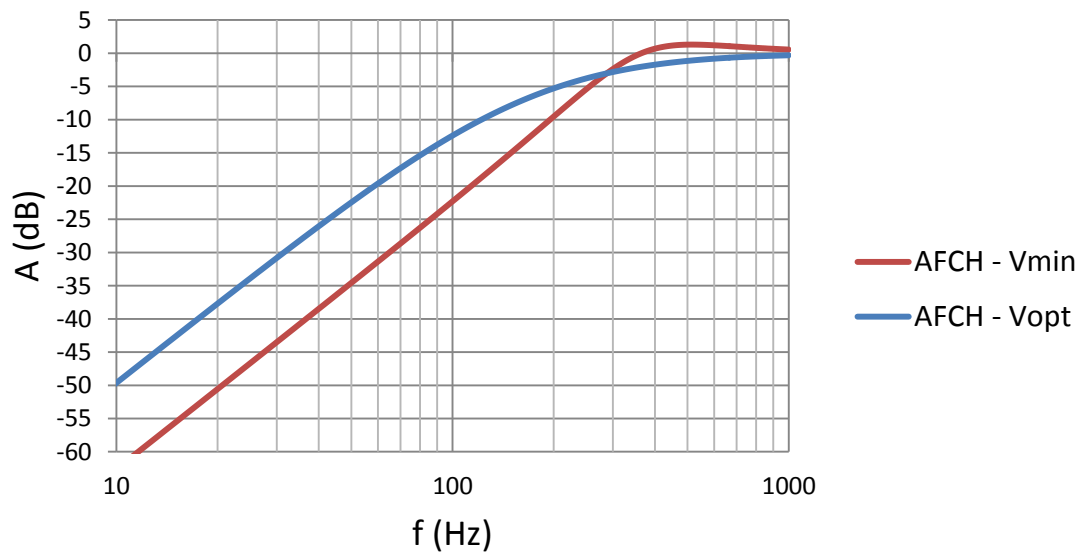
Obr. B 22: A-F charakteristiky reproduktoru 5MDN38 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$Vas$ (l)	$Fs$ (Hz)	$Qts$ (-)	$Vmin$ (l)	$Vopt$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
0,6	240	0,45	0,287102	3	38	95

Tab. B 11: Limitující parametry reproduktoru 5MDN38

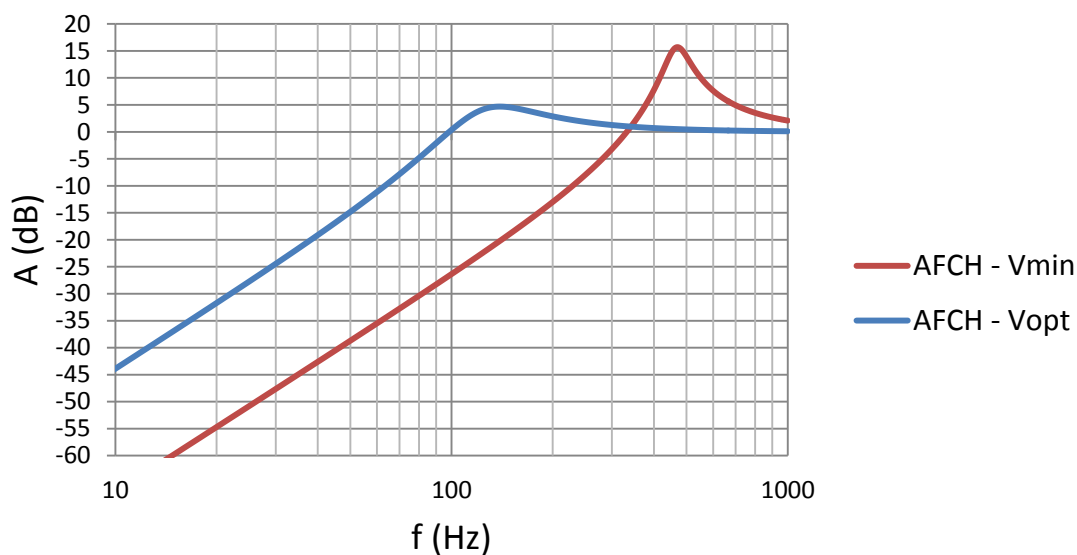
**6MBX44**

Obr. B 23: Ilustrační foto reproduktoru 6MBX44 - dostupný z [62]

**A-F Charakteristiky pro 6MBX44**Obr. B 24: A-F charakteristiky reproduktoru 6MBX44 pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

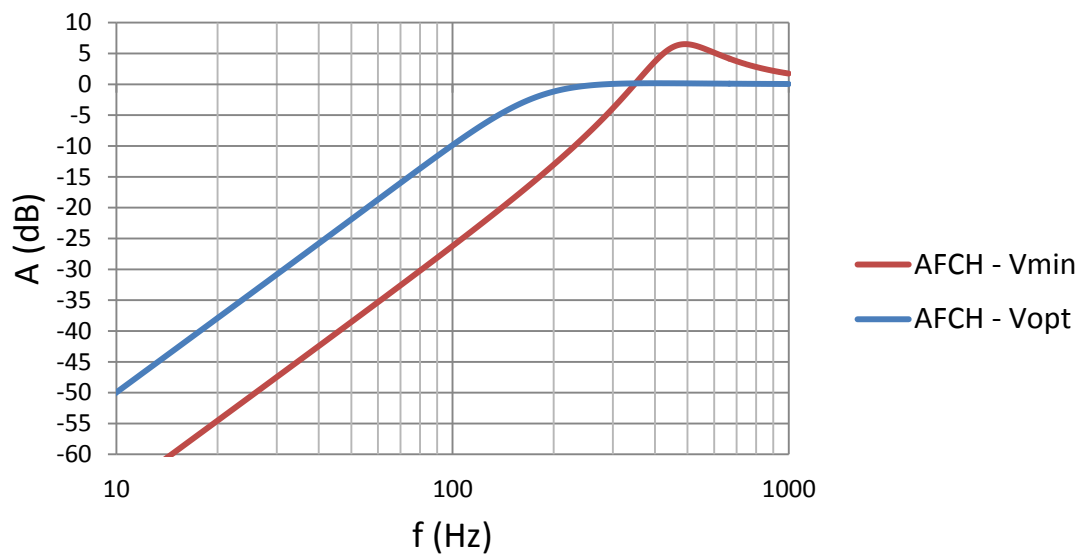
$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,1	113	0,31	0,427794	3	44	132

Tab. B 12: Limitující parametry reproduktoru 6MBX44

**WS 13 E - 8 Ohm - Visaton****Obr. B 25:** Ilustrační foto reproduktoru WS13E - dostupný z [63]**A-F Charakteristiky pro WS 13 E****Obr. B 26:** A-F charakteristiky reproduktoru WS13E pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
7,7	83	1,08	0,251611	6	65	86,5

**Tab. B 13** Limitující parametry reproduktoru WS13E

**ALPHALITE™ 6A - Eminence****Obr. B 27:** Ilustrační foto reproduktoru ALPHALITE™ 6A - dostupný z [64]**A-F Charakteristiky pro ALPHALITE™ 6A****Obr. B28:** A-F charakteristiky reproduktoru ALPHALITE™ 6A pro  $V_{min}$  a  $V_{opt}$ 

$V_{as}$ (l)	$F_s$ (Hz)	$Q_{ts}$ (-)	$V_{min}$ (l)	$V_{opt}$ (l)	$\varnothing$ magnetu (mm)	Plocha membrány (cm <sup>2</sup> )
4,92	126	0,56	0,395472	5	38	129

**Tab. B 14:** Limitující parametry reproduktoru ALPHALITE™

### Příloha C: Odvození vlnové impedance cylindrického vlnovodu

Vlnovody se obvykle řeší pomocí vlnové rovnice. Při odvozování impedance vlnovodu vycházíme ze vztahu pro rychlostní potenciál, což je funkce délky a času.

$$\phi_{(x,t)} = \Psi_{(x)} e^{j\omega t} \quad \text{C1.}$$

Kde:

$\phi$  je rychlostní potenciál

$\Psi$  je amplituda rychlostního potenciálu

Z rychlostního potenciálu můžeme získat rychlost derivací podle délky a akustický tlak derivací podle času:

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{d\Psi}{dx} e^{j\omega t} \quad \text{C2.}$$

$$P = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\rho j\omega \Psi_{(x)} e^{j\omega t} \quad \text{C3.}$$

Impedance je pak dána vztahem:

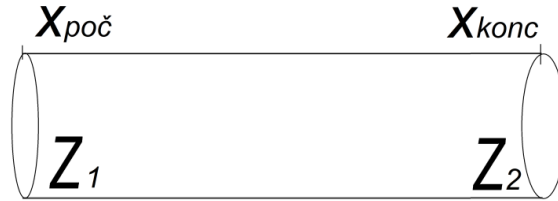
$$Z_x = \frac{P_{(x)}}{v_{(x)}} = \frac{-\rho j\omega \Psi_{(x)} e^{j\omega t}}{\frac{d\Psi}{dx} e^{j\omega t}} = \frac{-\rho j\omega \Psi_{(x)}}{\frac{d\Psi}{dx}} \quad \text{C4.}$$

Dle [4] je řešení  $\Psi_{(x)}$  pro cylindrický vlnovod dáno vztahem:

$$\Psi_{(x)} = C_1 e^{-jkx} + C_1 e^{+jkx} \quad \text{C5.}$$



Kde konstanta  $C_1$  představuje amplitudu rychlostního potenciálu vlny přímé a  $C_2$  vlny odražené. Nyní je však potřeba vyjádřit vstupní impedanci, což provedeme pomocí impedance výstupní. Abychom tak ale mohli učinit, potřebujeme vyjádřit poměr konstant  $C_1$  a  $C_2$ . Definujme tedy výrazy  $Z_{x_{konc}}$  a  $Z_{x_{poč}}$ .



Obr. C1 – náčrt cylindrického vlnovodu

$$\Psi_{(x_{poč})} = C_1 e^{-jkx_{poč}} + C_2 e^{jkx_{poč}} \quad C6.$$

$$\Psi_{(x_{konc})} = C_1 e^{-jkx_{konc}} + C_2 e^{jkx_{konc}} \quad C7.$$

$$Z_1 \equiv Z_{x_{poč}} = \frac{\rho j \omega (C_1 e^{-jkx_{poč}} + C_2 e^{jkx_{poč}})}{-jk C_1 e^{-jkx_{poč}} + jk C_2 e^{jkx_{poč}}} \quad C8.$$

$$Z_2 \equiv Z_{x_{konc}} = \frac{\rho j \omega (C_1 e^{-jkx_{konc}} + C_2 e^{jkx_{konc}})}{jk (C_1 e^{-jkx_{konc}} - C_2 e^{jkx_{konc}})} = \rho \frac{\omega}{k} \frac{\left( e^{-jkx_{konc}} + \frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{konc}} \right)}{\left( e^{-jkx_{konc}} - \frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{konc}} \right)} \quad C9.$$

Poměr konstant  $C_1$  a  $C_2$  vyjádříme ze vztahu pro  $Z_{x_{konc}}$ .

$$Z_2 \left( e^{-jkx_{konc}} - \frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{konc}} \right) = Z_0 \left( e^{-jkx_{konc}} + \frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{konc}} \right) \quad C10.$$

$$\frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{konc}} (Z_0 + Z_2) = e^{-jkx_{konc}} (Z_2 - Z_0) \quad C11.$$

$$\frac{C_2}{C_1} = e^{-2jkx_{konc}} \frac{(Z_2 - Z_0)}{(Z_2 + Z_0)} \quad \text{C12.}$$

Tento vyjádřený poměr pak dosadíme do výrazu pro  $Z_1$ . Tím dostaneme závislost vstupní impedance na impedanci výstupní.  $Z_{x_{poč}}$  je impedance v bodě  $x_{poč}$  a  $Z_{x_{konc}}$  je impedance v bodě  $x_{konc}$ . Viz. obrázek **Obr. C1**.

$$Z_1 = Z_0 \frac{\left( e^{-jkx_{poč}} + \frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{poč}} \right)}{\left( e^{-jkx_{poč}} - \frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{poč}} \right)} = Z_0 \frac{\left( e^{-jkx_{poč}} + \frac{(Z_2 - Z_0)}{(Z_2 + Z_0)} e^{jk(x_{poč} - 2x_{konc})} \right)}{\left( e^{-jkx_{poč}} - \frac{(Z_2 - Z_0)}{(Z_2 + Z_0)} e^{jk(x_{poč} - 2x_{konc})} \right)} \quad \text{C13.}$$

Vztah C13 nyní vydělíme:  $/(Z_2 + Z_0)e^{jkx_{konc}}$

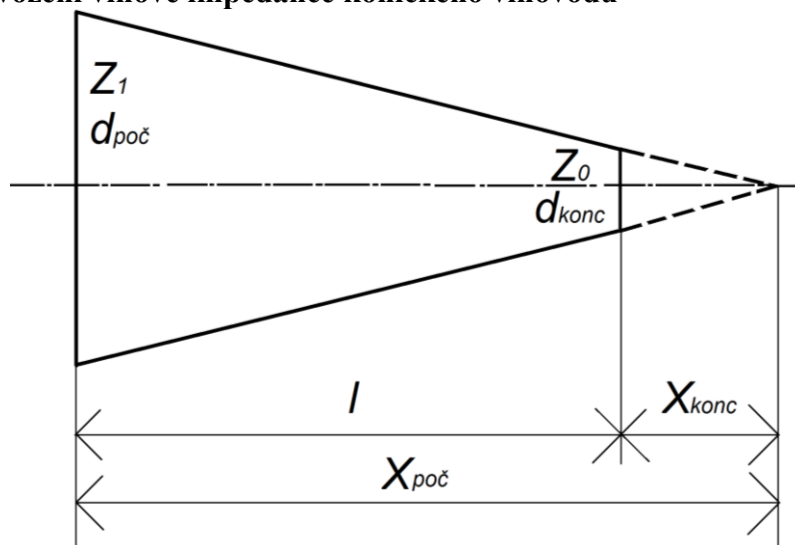
$$Z_1 = Z_0 \frac{(Z_2 + Z_0)e^{-jk(x_{poč} - x_{konc})} + (Z_2 - Z_0)e^{jk(x_{poč} - x_{konc})}}{(Z_2 + Z_0)e^{-jk(x_{poč} - x_{konc})} - (Z_2 - Z_0)e^{jk(x_{poč} - x_{konc})}} \quad \text{C14.}$$

$$Z_1 = Z_0 \frac{Z_2 \cos k(x_{poč} - x_{konc}) - Z_0 j \sin k(x_{poč} - x_{konc})}{Z_2 j \sin k(x_{poč} - x_{konc}) + Z_0 \cos k(x_{poč} - x_{konc})} \quad \text{C15.}$$

$$Z_1 = Z_0 \frac{Z_2 \cos kl + Z_0 j \sin kl}{Z_2 j \sin kl + Z_0 \cos kl} \quad \text{C16.}$$

V tomto případě je však  $Z_2$  rovno  $Z_0$ , tudíž se celý vztah velmi zjednoduší.

$$Z_1 = Z_0 = C_0 \rho \quad \text{C17.}$$

**Příloha D: Odvození vlnové impedance kónického vlnovodu****Obr. D1:** Ilustrační nákres kónického vlnovodu

Při odvozování impedance kónického vlnovodu je postup obdobný, jako tomu bylo u cylindrického vlnovodu. Vycházejme z předpokladu, že amplituda vektorového potenciálu je dána z [4]:

$$\Psi_x = \frac{C_1}{x} e^{-jkx} + \frac{C_2}{x} e^{jkx} \quad \text{D1}$$

Pro výpočet impedance kónického vlnovodu budeme vycházet ze vztahu C4. Abychom mohli do vztahu C4 dosadit, je potřeba opět vypočítat rychlost  $v_{(x)}$  a akustický tlak  $P_{(x)}$ , dle vztahů C2 a C3.

$$v_x = \frac{d\Psi}{dx} e^{j\omega t} = \frac{C_1}{x} \left( -jk - \frac{1}{x} \right) e^{-jkx} + \frac{C_2}{x} \left( jk - \frac{1}{x} \right) e^{jkx} \quad \text{D2}$$

$$P_x = -\rho j \omega \Psi_{(x)} e^{j\omega t} = -\rho j \omega \left( \frac{C_1}{x} e^{-jkx} + \frac{C_2}{x} e^{jkx} \right) \quad \text{D3}$$

Impedance je pak dána vztahem D4:

$$Z_x = \frac{P_x}{v_x} = \frac{-\rho j \omega \left( \frac{C_1}{x} e^{-jkx} + \frac{C_2}{x} e^{jkx} \right)}{\frac{C_1}{x} \left( -jk - \frac{1}{x} \right) e^{-jkx} + \frac{C_2}{x} \left( jk - \frac{1}{x} \right) e^{jkx}} \quad D4$$

Po sérii matematických úprav dostaneme vztah:

$$Z_x = Z_0 \frac{e^{-jkx} + \frac{C_2}{C_1} e^{jkx}}{\left( 1 + \frac{1}{jkx} \right) e^{-jkx} + \frac{C_2}{C_1} \left( -1 + \frac{1}{jkx} \right) e^{jkx}} \quad D5$$

Nyní opět chceme vyjádřit vstupní impedanci pomocí výstupní impedance. Abychom tak ale mohli učinit, potřebujeme vyjádřit poměr konstant  $C_1$  a  $C_2$ . Opět tedy definujeme výraz  $Z_{x_{konc}}$ , abychom mohli vyjádřit poměr konstant  $C_1$  a  $C_2$ , které pak následně dosadíme do  $Z_{x_{poč}}$ .

$$Z_2 \equiv Z_{x_{konc}} = Z_0 \frac{e^{-jkx_{konc}} + \frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{konc}}}{\left( 1 + \frac{1}{jkx_{konc}} \right) e^{-jkx_{konc}} + \frac{C_2}{C_1} \left( -1 + \frac{1}{jkx_{konc}} \right) e^{jkx_{konc}}} \quad D6$$

$$\begin{aligned} Z_{x_{konc}} \left[ \left( 1 + \frac{1}{jkx_{konc}} \right) e^{-jkx_{konc}} + \frac{C_2}{C_1} \left( -1 + \frac{1}{jkx_{konc}} \right) e^{jkx_{konc}} \right] \\ = Z_0 \left( e^{-jkx_{konc}} + \frac{C_2}{C_1} e^{jkx_{konc}} \right) \end{aligned} \quad D7$$

Po provedení matematických úprav dostáváme poměr konstant  $C_1$  a  $C_2$

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{Z_{x_{konc}} \left(1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) - Z_0}{Z_0 - Z_{x_{konc}} \left(-1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right)} e^{-2jkx_{konc}} \quad D8$$

Nyní, jako v rovnici C14 dosadíme poměr konstant  $C_1$  a  $C_2$  do vztahu pro impedanci  $Z_l$ :

$$\begin{aligned} \frac{Z_1}{Z_0} &= \frac{e^{-jkx_{poč}} + \left( \frac{Z_{x_{konc}} \left(1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) - Z_0}{Z_0 - Z_{x_{konc}} \left(-1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right)} \right) e^{jk(x_{poč} - 2x_{konc})}}{\left(1 + \frac{1}{jkx_{poč}}\right) e^{-jkx_{poč}} + \left( \frac{Z_{x_{konc}} \left(1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) - Z_0}{Z_0 - Z_{x_{konc}} \left(-1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right)} \right) \left(-1 + \frac{1}{jkx_{poč}}\right) e^{jk(x_{poč} - 2x_{konc})}} \\ &= \frac{\left[ Z_0 - Z_{x_{konc}} \left(-1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) \right] e^{-jk(x_{poč} - x_{konc})} + \left[ Z_{x_{konc}} \left(1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) - Z_0 \right] e^{jk(x_{poč} - x_{konc})}}{\left[ Z_0 - Z_{x_{konc}} \left(-1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) \right] \left(1 + \frac{1}{jkx_{poč}}\right) e^{-jk(x_{poč} - x_{konc})} + \left[ Z_{x_{konc}} \left(1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) - Z_0 \right] \left(-1 + \frac{1}{jkx_{poč}}\right) e^{jk(x_{poč} - x_{konc})}} \end{aligned}$$

$Z_{x_{konc}}$  je v našem případě rovna  $Z_0$ , jelikož vlnovod ústí do volného prostoru. Dosadíme tedy:

$$\begin{aligned} \frac{Z_1}{Z_0} &= \frac{\left[ 1 - \left(-1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) \right] e^{-jk(x_{poč} - x_{konc})} + \left( \frac{1}{jkx_{konc}} \right) e^{jk(x_{poč} - x_{konc})}}{\left[ 1 - \left(-1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) \right] \left(1 + \frac{1}{jkx_{poč}}\right) e^{-jk(x_{poč} - x_{konc})} + \left[ \left(1 + \frac{1}{jkx_{konc}}\right) - 1 \right] \left(-1 + \frac{1}{jkx_{poč}}\right) e^{jk(x_{poč} - x_{konc})}} \\ &= \frac{\left( 2 - \frac{1}{jkx_{konc}} \right) e^{-jk(x_{poč} - x_{konc})} + \left( \frac{1}{jkx_{konc}} \right) e^{jk(x_{poč} - x_{konc})}}{\left( 2 - \frac{1}{jkx_{konc}} \right) \left(1 + \frac{1}{jkx_{poč}}\right) e^{-jk(x_{poč} - x_{konc})} + \frac{1}{jkx_{konc}} \left(-1 + \frac{1}{jkx_{poč}}\right) e^{jk(x_{poč} - x_{konc})}} \end{aligned}$$

$$\frac{Z_1}{Z_0} = jkx_{poč} \frac{(2jkx_{konc} - 1)e^{-jkl} + e^{jkl}}{(2jkx_{konc} - 1)(jkx_{poč} + 1)e^{-jkl} + (-jkx_{poč} + 1)e^{jkl}} \quad D9$$

Vztah *D9* je konečný vztah, ze kterého je možné vykreslit frekvenční průběh impedance v závislosti na zadaných rozměrech  $x_{konc}$ ,  $x_{poč}$  a  $l$ .