



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření parametrů kytarových reproduktorů

Autor práce: Aleš Vovk

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Bouzek

Plzeň 2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aleš VOVK**  
Osobní číslo: **E14B0225P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Měření parametrů kytarových reproduktorů**  
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 parametry kytarových reproduktorů.
2. Určete důležité parametry kytarových reproduktorů.
3. Důležité parametry pro několik vzorků reproduktorů změřte.
4. Vyhodnoňte a porovnejte naměřené parametry reproduktorů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Stanislav Bouzek**

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

# Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřená na popis parametrů reproduktorů. Jsou zde popsány základní principy reproduktor, parametry reproduktorů a principy jejich měření. Dále je popsán průběh měření kytarových reproduktorů a uvedené výsledky pro některé parametry - amplitudové kmitočtové charakteristiky, směrové charakteristiky, impedanční charakteristiky, Thiele Small parametry, harmonické zkreslení THD.

## Klíčová slova

Reproduktor, kytarový reproduktor, měření reproduktoru, parametr reproduktoru, amplitudová kmitočtová charakteristika, směrová charakteristika, impedanční charakteristika, THD, TS parametry, nelineární zkreslení, konstrukce reproduktoru, elektrodynamický měnič

# Abstract

Vovk, Aleš. *Measurement of guitar loudspeakers parameters [Měření parametrů kytarových reproduktorů]*. Pilsen, 2017. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Stanislav Bouzek

---

The presented bachelor thesis is focused on description of the speakers parameters. The thesis describes the basic principles of the speakers, the parameters of the speakers and the principles of their measurements. The most extensive part is focused on measurement of guitar loudspeakers and described results for some parameters - amplitude frequency characteristics, directional characteristics, impedance characteristics, Thiele Small parameters, harmonic total distortion.

## Keywords

Speaker, guitar speaker, speaker measurement, speaker parameters, amplitude frequency characteristics, directional characteristics, impedance characteristics, THD, TS parameters, nonlinear distortion, speaker structure, electrodynamic transducer

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 8. června 2017

Aleš Vovk

.....

Podpis

# Obsah

Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xi
Seznam symbolů a zkratk	xii
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Elektrodynamický reproduktor</b>	<b>2</b>
2.1 Princip elektrodynamického měniče . . . . .	2
2.2 Konstrukce přímovyzářujícího elektrodynamického reproduktoru . . . . .	3
2.2.1 Magnetický obvod . . . . .	4
2.2.2 Kmitací cívka . . . . .	5
2.2.2.1 Kostra kmitací cívky . . . . .	6
2.2.3 Membrána . . . . .	7
2.2.4 Závěsy membrány . . . . .	8
2.2.5 Koš reproduktoru . . . . .	9
2.2.6 Přívody a připojovací terminál . . . . .	10
2.2.7 Těsnění proti prachu . . . . .	10
2.2.8 Těsnění . . . . .	11
<b>3 Parametry reproduktoru</b>	<b>12</b>
3.1 Rozměry reproduktoru . . . . .	12
3.2 Kmitočtová amplitudová charakteristika . . . . .	13
3.3 Směrová charakteristika . . . . .	15
3.4 Kmitočtový rozsah . . . . .	17
3.5 Thiele-Small parametry . . . . .	18
3.5.1 Rezonanční kmitočet a poddajnost . . . . .	18
3.5.2 Impedanční charakteristika, nominální impedance . . . . .	20
3.5.3 Činitel jakosti . . . . .	20
3.5.3.1 Náhradní schéma reproduktoru . . . . .	21
3.5.3.2 Činitele jakosti reproduktoru . . . . .	23
3.5.4 Ekvivalentní objem . . . . .	25

3.5.5	Maximální lineární výchylka . . . . .	26
3.5.6	Jmenovitá energetická účinnost . . . . .	27
3.5.7	Charakteristická citlivost . . . . .	29
3.6	Maximální dlouhodobý standardizovaný příkon . . . . .	30
3.7	Zkreslení . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Metodika měření reproduktorů</b>	<b>33</b>
4.1	Podmínky měření . . . . .	33
4.2	Amplitudová kmitočtová charakteristika . . . . .	35
4.3	Směrová charakteristika . . . . .	36
4.4	Impedanční charakteristika a činitele jakosti . . . . .	38
4.5	Ekvivalentní objem, poddajnost, Bl faktor, jmenovitá energetická účinnost, charakteristická citlivost . . . . .	39
4.6	Nelineární zkreslení . . . . .	41
4.6.1	THD . . . . .	41
4.6.2	Intermodulační zkreslení . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Měření kytarových reproduktorů</b>	<b>44</b>
5.1	Kytarové reproduktory . . . . .	45
5.2	Prostředí měření . . . . .	45
5.3	Měřicí přístroje . . . . .	46
5.4	Amplitudové kmitočtové charakteristiky . . . . .	47
5.5	Směrové charakteristiky . . . . .	55
5.6	Impedanční charakteristiky . . . . .	58
5.7	TS parametry . . . . .	61
5.8	THD . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>68</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>70</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>72</b>
<b>A</b>	<b>Amplitudové kmitočtové charakteristiky</b>	<b>72</b>
A.1	Měření citlivosti . . . . .	72
A.2	Amplitudové kmitočtové charakteristiky v uzavřené ozvučnici . . . . .	77
<b>B</b>	<b>Směrové charakteristiky</b>	<b>81</b>
B.1	Směrové charakteristiky pro střední kmitočty oktávových pásem . . . . .	81
B.2	Porovnání směrových charakteristik reproduktorů pro střední kmitočty ok- távových pásem . . . . .	87
<b>C</b>	<b>Impedanční charakteristiky</b>	<b>91</b>



<b>D</b>	<b>Rozměry ozvučnice typu Orange</b>	<b>96</b>
<b>E</b>	<b>Parametry dané výrobcí</b>	<b>97</b>
E.1	HH Invader . . . . .	97
E.2	Celestion Classic Vintage 30 . . . . .	98
E.3	Celestion Classic Lead 80 . . . . .	99
E.4	Eminence LEGEND 1218 . . . . .	100
E.5	Jensen p12R . . . . .	101
<b>F</b>	<b>Katalogové listy z měření</b>	<b>102</b>

# Seznam obrázků

2.1	Principální schéma elektrodynamického měniče  Převzato s úpravami z []  . . . . .	2
2.2	Znázornění směru síly vybuze­né kmitací cívkou  Převzato s úpravami z [3]  . . . . .	3
2.3	Řez elektrodynamickým reproduktorem  Převzato s úpravami z [4]  . . . . .	4
2.4	Poměr rozměrů magnetů dle materiálů  Převzato s úpravami z [1]  . . . . .	5
2.5	Vinutí kmitacích cívek  Převzato s úpravami z [4]  . . . . .	6
2.6	Vliv deformací membrány na im­pedanční charakteristiku . . . . .	7
2.7	Tvary kuželových membrán  Převzato s úpravami z [1]  . . . . .	8
2.8	Horní závěs membrány elektrodynamického reproduktoru  Převzato s úpravami z [1]	8
2.9	Výchytky kruhové membrány v závislosti na průměru membrány a kmitočetu  Převzato s úpravami z [1]  . . . . .	9
3.1	Katalogový výkres kytarového reproduktoru Jensen p12R  Převzato s úpravami z [20]	13
3.2	Ukázka amplitudové kmitočtové charakteristiky včetně průběhů 1. a 2. harmonické  Převzato z [4]  . . . . .	14
3.3	Ukázka části směrové charakteristiky v polárním grafu . . . . .	15
3.4	Ukázka směrové charakteristiky pomocí amplitudových kmitočtových charakteristik  Převzato z [2]  . . . . .	15
3.5	Směrové chování reproduktoru  Převzato s úpravami z [13]  . . . . .	16
3.6	Určení kmitočtového rozsahu pomocí amplitudové kmitočtové charakteristiky . . . . .	18
3.7	Popis im­pedanční charakteristiky basového reproduktoru  Převzato s úpravami z [4]	20
3.8	Souvislost impulsní odezvy a přenosové charakteristiky  Převzato s úpravami z [4]	21
3.9	Náhradní schéma reproduktoru s gyrátorem  Převzato s úpravami z [9]  . . . . .	22
3.10	Náhradní schéma reproduktoru  Převzato z [4]  . . . . .	23
3.11	Náhradní schéma reproduktoru včetně ztrát  Převzato s úpravami z [9]  . . . . .	23
3.12	Způsoby udržení lineárních výchylek kmitacího systému pomocí velikosti kmitací cívky  Převzato s úpravami z [16]  . . . . .	27
4.1	Měřicí řetězec amplitudové kmitočtové charakteristiky pomocí bílého šumu	35
4.2	Měřicí řetězec amplitudové kmitočtové charakteristiky pomocí růžového šumu	36
4.3	Měřicí řetězec amplitudové kmitočtové charakteristiky pomocí rozmítaného sinusového signálu . . . . .	36

4.4	Měřicí řetězec směrové charakteristiky pomocí sinusového signálu . . . . .	37
4.5	Základní schéma měření impedanční charakteristiky  Převzato s úpravami z [6]  . . .	38
4.6	Výpočet činitelů jakosti $Q_{es}$ , $Q_{ms}$ a $Q_{ts}$ z impedanční charakteristiky  Převzato s úpravami z [8]  . . . . .	38
4.7	Řetězec pro měření $THD$ . . . . .	42
4.8	Řetězec pro měření $IMD$ . . . . .	43
5.1	Bezodrazová komora Západočeské univerzity FEL . . . . .	45
5.2	Šumové pozadí bezodrazové komory . . . . .	46
5.3	Fotografie měřícího pracoviště . . . . .	47
5.4	Schéma měření amplitudové kmitočtové charakteristiky kytarových reproduktorů . . . . .	48
5.5	Prostředí programu PULSE LabShop v10.3 konfigurované na měření ampl. kmitočtových charakteristik . . . . .	49
5.6	Konfigurace mikrofону při měření citlivosti - Pohled z profilu . . . . .	50
5.7	Konfigurace mikrofону při měření citlivosti - Pohled v ose reproduktoru . . .	51
5.8	Konfigurace mikrofону při měření v uzavřené ozvučnici . . . . .	52
5.9	Citlivost kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 . . . . .	53
5.10	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 ve vzdálenosti 2m . . . . .	53
5.11	Porovnání ampl. kmitočtové charakteristiky reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 v ozvučnici uzavřené a standardní . . . . .	54
5.12	Schéma měření směrové charakteristiky kytarových reproduktorů . . . . .	55
5.13	Prostředí programu PULSE LabShop v10.3 konfigurované na měření směrových charakteristik . . . . .	56
5.14	První 3 střední kmitočty oktávových pásem . . . . .	57
5.15	Čtvrtý, pátý a šestý střední kmitočet oktávových pásem . . . . .	58
5.16	Schéma měření impedanční charakteristiky kytarových reproduktorů . . .	59
5.17	Impedanční charakteristika reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 . . .	60
5.18	Porovnání impedančních charakteristik kytarových reproduktorů . . . . .	61
5.19	Prostředí programu PULSE LabShop v10.3 konfigurované na měření $THD$ . . .	65
5.20	Eminence Legend 1218 při 10 W . . . . .	67
5.21	HH Invader při 10 W . . . . .	67
A.1	Ampl. kmitočtová charakteristika pozadí bezodrazové komory . . . . .	72
A.2	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 . . . . .	73
A.3	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 měřená v 1m příkonem 1W . . . . .	73
A.4	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Eminence Legend 1280 měřená v 1m příkonem 1W . . . . .	74

A.5	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Jensen p12R měřená v 1m příkonem 1W . . . . .	74
A.6	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru HH Invader měřená v 1m příkonem 1W . . . . .	75
A.7	Porovnání ampl. kmitočtových charakteristik kytarových reproduktorů Celestion měřených v 1m příkonem 1 W . . . . .	75
A.8	Porovnání ampl. kmitočtových charakteristik kytarových reproduktorů minence Legend 1280, Jensen p12R a HH Invader měřených v 1m příkonem 1 W . . . . .	76
A.9	Odstup od šumu při měření v bezodrazové komoře . . . . .	76
A.10	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W . . . . .	77
A.11	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W . . . . .	78
A.12	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Eminence Legend 1280 v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W . . . . .	78
A.13	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Jensen p12R v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W . . . . .	79
A.14	Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru HH Invader v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W . . . . .	79
A.15	Porovnání ampl. kmitočtových charakteristik kytarových reproduktorů Celestion v uzavřené ozvučnici měřených ve 2m příkonem 2 W . . . . .	80
A.16	Porovnání ampl. kmitočtových charakteristik kytarových reproduktorů minence Legend 1280, Jensen p12R a HH Invader v uzavřené ozvučnici měřených ve 2m příkonem 2 W . . . . .	80
B.1	Směrové vyzařování točny . . . . .	81
B.2	Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 . . . . .	82
B.3	Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 . . . . .	83
B.4	Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru Eminence Legend 1280 . . . . .	84
B.5	Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru Jensen p12R . . . . .	85
B.6	Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru HH Invader . . . . .	86
B.7	Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 125 Hz . . . . .	87
B.8	Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 250 Hz . . . . .	88
B.9	Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 500 Hz . . . . .	88
B.10	Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 1000 Hz . . . . .	89

B.11 Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 2000 Hz . . . . .	89
B.12 Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 4000 Hz . . . . .	90
C.1 Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 . . . . .	91
C.2 Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 . . . . .	92
C.3 Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Eminence Legend 1280	92
C.4 Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Jensen p12R . . . . .	93
C.5 Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru HH Invader . . . . .	93
C.6 Porovnání impedančních charakteristik kytarových reproduktorů Celestion	94
C.7 Porovnání impedančních charakteristik kytarových reproduktorů minence Legend 1280, Jensen p12R a HH Invader . . . . .	94
C.8 Porovnání všech impedančních charakteristik kytarových reproduktorů . .	95
D.1 Rozměry uzavřené ozvučnice typu Orange . . . . .	96
E.1 Amplitudová kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 udané výrobcem . . . . .	98
E.2 Amplitudová kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 udané výrobcem . . . . .	99
E.3 Amplitudová kmitočtová a impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Eminence LEGEND 1218 udané výrobcem . . . . .	100
E.4 Amplitudová kmitočtová a impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Jensen p12R udané výrobcem . . . . .	101

# Seznam tabulek

5.1	Hodnoty napětí, které odpovídají jednotlivým příkonům reproduktorů . . .	48
5.2	Parametry odvozené z ampl. kmitočtových charakteristik . . . . .	54
5.3	TS parametry reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 . . . . .	62
5.4	Hodnoty získané měřením impedančních charakteristik metodou přidání hmotnosti pro reproduktor Celestion Classic Vintage 30 . . . . .	63
5.5	THD kytarových reproduktorů . . . . .	66
5.6	Ak. tlak jednotlivých n harmonických složek . . . . .	66
E.1	Základní parametry kytarového reproduktoru HH Invader udané výrobcem	97
E.2	Parametry kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 udané výrobcem . . . . .	98
E.3	Základní parametry kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 udané výrobcem . . . . .	99
E.4	Základní parametry kytarového reproduktoru Eminence LEGEND 1218 udané výrobcem udané výrobcem . . . . .	100
E.5	Parametry kytarového reproduktoru Jensen p12R udané výrobcem . . . . .	101

# Seznam symbolů a zkratek

SPL .....	Sound Pressure Level. Hladina akustického tlaku .
MDSP .....	Maximální dlouhodobý standardizovaný příkon.
p.m.p.o .....	Peak Music Power Output. Maximální hodnota okamžitého výkonu.
THD .....	Total harmonic distortion. Celkové harmonické zkreslení.
IMD .....	Intermodulation distortion. Intermodulační zkreslení.
MLS .....	Maximum length sequence. Sekvence maximální délky.
FFT .....	Fast Fourier Transformation. Rychlá Fourierova transformace.
R.M.S .....	Root Mean Square. Efektivní hodnota.
Nf .....	Nízkofrekvenční.
R .....	Reproduktor - značení blokových schématech.
SG .....	Nízkofrekvenční - značení blokových schématech.
A .....	Analyzátor signálů - značení blokových schématech.
F .....	Fltr - značení blokových schématech.
V .....	Voltmetr - značení ve schématech.
S .....	Snímač akustického tlaku - značení blokových schématech.
Z .....	Zesilovač - značení blokových schématech.
M .....	Mikrofon - značení blokových schématech.
LAN .....	Ethernetový kabel - značení ve schématech
PC .....	Počítač.
$\rho_v = 1,21$ .....	Měrná hmotnost vzduchu [ $kg/m^3$ ].
$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ .....	Referenční akustický tlak [ $Pa$ ].
$W_{RMS}$ .....	Jednotka maximálního dlouhodobého standardizovaného výkonu.
$W_{sin}$ .....	Jednotka maximálního sinusového výkonu.
$W_{max}$ .....	Jednotka maximálního impulsního výkonu.
$i$ .....	Okamžitá hodnota proudu [ $A$ ].
$B$ .....	Magnetická indukce [ $T$ ].
$F$ .....	Síla vyvolaná kmitací cívkou [ $N$ ].
$l$ .....	Délka vodiče [ $m$ ].
$Bl$ .....	Gyrační konstanta, Bl faktor [ $Tm$ ].
$S_d$ .....	Efektivní plocha membrány [ $m^2$ ].

$r_d$ .....	Efektivní poloměr membrány [ $m$ ].
$L_p$ .....	Hladina akustického tlaku [ $dB$ ].
$p$ .....	Akustický tlak [ $Pa$ ].
$q$ .....	Činitel směrovosti [ $-$ ].
$I_q$ .....	Index směrovosti [ $dB$ ].
$p_s$ .....	Střední vyzářený akustický tlak [ $Pa$ ].
$c_0$ .....	Rychlost vzduchu [ $m/s$ ].
$P_a$ .....	Akustický výkon [ $W$ ].
$I_s$ .....	Průměrná intenzita zvuku na měřené ploše [ $W/m^2$ ].
$f_{kr}$ .....	Kritický kmitočet membrány [ $Hz$ ].
$f_s$ .....	Rezonanční kmitočet [ $Hz$ ].
$f_{pr}$ .....	Rezonanční kmitočet pružiny [ $Hz$ ].
$k$ .....	Tuhost pružiny [ $N/m$ ].
$c_{md}$ .....	Poddajnost membrány [ $m/N$ ].
$c_{ms}$ .....	Celková poddajnost včetně poddajnosti vzduchu [ $m/N$ ].
$m_{md}$ .....	Hmotnost kmitacího systému [ $g$ ].
$m_v$ .....	Hmotnost vzduchu [ $g$ ].
$m_{ms}$ .....	Celková hmotnost kmitacího systému včetně hmotnosti vzduchu [ $g$ ].
$Z_{nom}$ .....	Nominální impedance [ $\Omega$ ].
$R_e$ .....	Činný odpor kmitací cívky [ $\Omega$ ].
$Q$ .....	Činitel jakosti [ $-$ ].
$Q_{es}$ .....	Elektrický činitel jakosti [ $-$ ].
$Q_{ms}$ .....	Mechanický činitel jakosti [ $-$ ].
$Q_{ts}$ .....	Celkový činitel jakosti [ $-$ ].
$r_{md}$ .....	Mechanický odpor systému [ $kg/s$ ].
$r_v$ .....	Odporu vzduchu [ $kg/s$ ].
$r_{ms}$ .....	Celkový mechanický odpor systému včetně odporu vzduchu [ $kg/s$ ].
$R_z$ .....	Ztráty kmitací cívky [ $\Omega$ ].
$V_{as}$ .....	Ekvivalentní objem [ $l$ ].
$V_b$ .....	Objem ozvučnice [ $l$ ].
$f_b$ .....	Rezonanční kmitočet reproduktoru s ozvučnicí [ $Hz$ ].
$L_b$ .....	Indukčnost, kterou je reprezentována ozvučnice [ $H$ ].
$X_{max}$ .....	Maximální lineární výchylka [ $mm$ ].
$P_{zd}$ .....	Příkon reproduktoru [ $W$ ].
$\eta$ .....	Účinnost [%].
$\eta_{rep}$ .....	Účinnost reproduktoru [%].
$\eta_0$ .....	Jmenovitá energetická účinnost [%].
$L_s$ .....	Charakteristická citlivost [ $dB$ ].



---

$S_n$ .....	Ak. tlak odpovídající tlaku charakteristické citlivosti [ $Pa$ ].
$f_{1h}$ .....	Frekvence první harmonické [ $Hz$ ].
$P_{nf}$ .....	Výkon $n$ harmonické [ $W$ ].
$P_{fn}$ .....	Výkon kmitočtu $n$ [ $W$ ].
$Z_{rep}$ .....	Impedance reproduktoru [ $\Omega$ ].

# 1

## Úvod

Kytarový reproduktor je nástrojem mnoha hudebníků, neslouží pouze k reprodukci zvuku, ale i k jeho tvorbě. V tomto směru jsou kytarové reproduktory vybírány dle osobních preferencí a na technické parametry se tolik nehledí. Ovšem při výběru optimálního nástroje, v našem případě kytarového reproduktoru, je vhodné technické parametry prostudovat.

Výrobci kytarových reproduktorů neudávají podrobné technické údaje, a proto vznikla tato bakalářská práce. Předmětem jsou primárně parametry kytarových reproduktorů, avšak jejich nedílnou součástí je měření a způsoby, jímž jsou stanoveny.

Prvním krokem k determinaci vhodných parametrů, které budou vypovídat o vlastnostech kytarových reproduktorů, je vhodné prostudovat problematiku reproduktorů samotných. Znalost konstrukčních prvků reproduktoru a principu elektromechanických měničů napomáhá k vyhodnocení parametrů, které je ovlivňují. Z tohoto důvodu je první kapitola věnována právě konstrukci a principu elektromechanického měniče.

Parametry reproduktorů nejsou pouze jednoho druhu a rozlišují se na mechanické, elektrické a akustické. V další kapitole jsou hlavní představitelé těchto parametrů popsány a vysvětleny

V druhé polovině práce jsou předmětem vybrané parametry a realizace jejich měření pro několik kytarových reproduktorů.

## 2

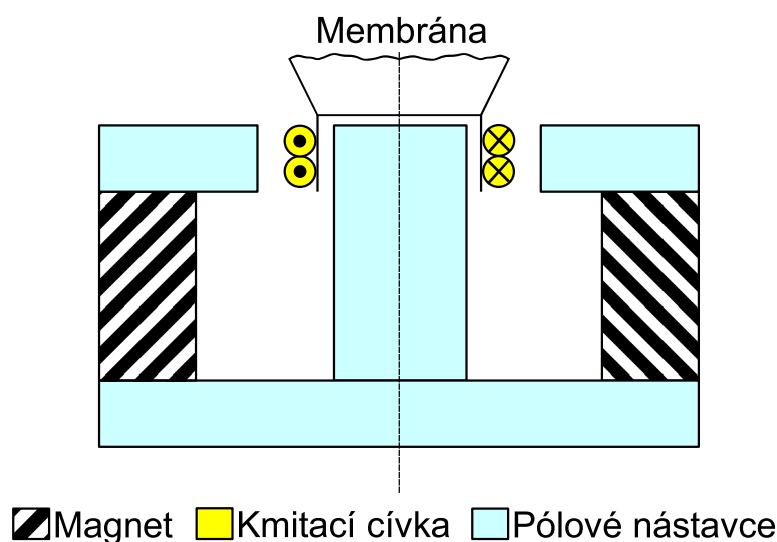
# Elektrodynamický reproduktor

## 2.1 Princip elektrodynamického měniče

Kytarové reproduktory jsou elektroakustické měniče, které způsobují přeměnu elektrické energie na mechanickou energii. Akustický vjem vytváří pohyblivá část měniče, která v okolním prostředí způsobí rozruch částic. Dle druhů použitých mechanismů rozlišujeme základní typy měničů: piezoelektrické, elektrostatické, elektromagnetické a elektrodynamické.[9]

Kytarový reproduktor a velké množství dnes používaných reproduktorů patří do skupiny elektrodynamických přímovyzářujících reproduktorů. Z tohoto důvodu je třeba pochopit princip tohoto měniče. Pojem přímovyzářující vyjadřuje přímé spojení membrány s okolním prostředím, do kterého je vyzářována akustická energie. Pro srovnání existují reproduktory nepřímovyzářující, jejichž charakteristickou vlastností je přídavný akustický obvod tzv. zvukovod.[2]

O převod energie z elektrické na mechanickou se stará magnetické soustrojí, jehož principiální znázornění představuje obrázek 2.1, kde základ tvoří permanentní magnet s pólovými nástavci a kmitací cívka spojená s membránou.

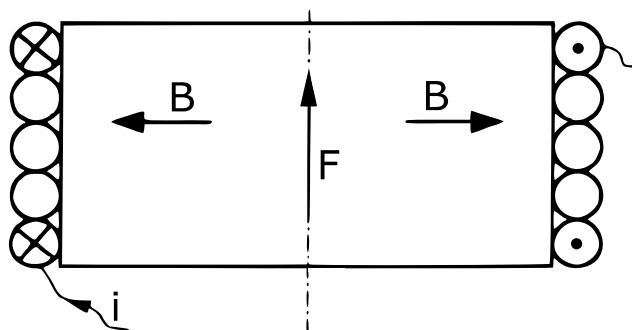


Obr. 2.1: Principiální schéma elektrodynamického měniče |Převzato s úpravami z [1]|

Předpokládejme, že kmitací cívkou prochází proud  $i$  a působí zde homogenní magnetické pole vytvořené permanentním magnetem. Síla  $F$  vyvolaná průchodem proudem cívkou bude úměrná magnetické indukci  $B$  a délce vodiče  $l$  kolmé ke směru vektoru indukce. Velikost této síly bude úměrná proudu a je dána vztahem 2.1.[2][3]

$$F = \int_0^l iBdl = iBl \quad [N; A, T, m] \quad (2.1)$$

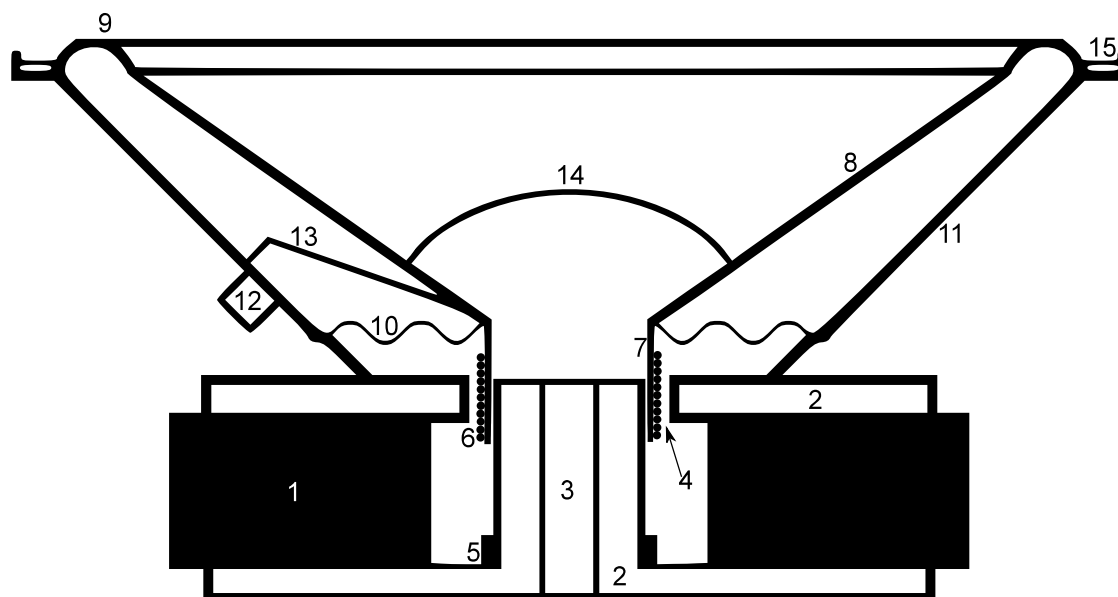
Směr síly lze určit dle Flemingova pravidla levé ruky, které říká „*Položíme-li otevřenou levou ruku dlaní nahoru tak, že prsty ukazují směr proudu vodičem a indukční čáry magnetického pole vstupují do dlaně, pak bude palec ukazovat směr síly, kterou magnetické pole na vodič působí zdroj.*“ [10] Takto definované pravidlo je znázorněno na obrázku 2.2, na kterém je respektován směr toku proudu a směr magnetické indukce.



**Obr. 2.2:** Znázornění směru síly vybuzevané kmitací cívkou [Převzato s úpravami z [3]]

## 2.2 Konstrukce přímovyzářujícího elektroynamického reproduktoru

K vyjádření parametrů reproduktoru je nutné znát jeho konstrukční uspořádání, které velmi výrazně ovlivní výsledný akustický vjem. Na první pohled vypadá reproduktor jako velmi jednoduchý prvek, ale opak je pravdou. Při konstrukci je nutné dbát na mnoho aspektů, které svými vlastnostmi ovlivní reproduktor. Mezi takové aspekty patří např. tepelné účinky, hmotnost kmitacího systému, užití materiály a spousta dalších na první pohled nevýznamných prvků např. přívody vstupního signálu. Předmětem následujícího textu je popis konstrukčních prvků elektroynamického přímovyzářujícího reproduktoru s ohledem na vliv některých z parametrů. Uspořádání popisovaného reproduktoru je znázorněno obrázkem 2.3.[4]



**Obr. 2.3:** Řez elektrodynamickým reproduktorem |Převzato s úpravami z [4]|

1. Permanentní magnet
2. Pólové nástavce
3. Chladicí otvor
4. Vzduchová mezera
5. Zkratovací prstenec
6. Kmitací cívka
7. Kostra kmitací cívky
8. Membrána
9. Horní závěs membrány
10. Spodní závěs membrány (středící membrána)
11. Koš reproduktoru
12. Připojovací terminál
13. Přívody
14. Těsnění proti prachu (prachovka)
15. Těsnění

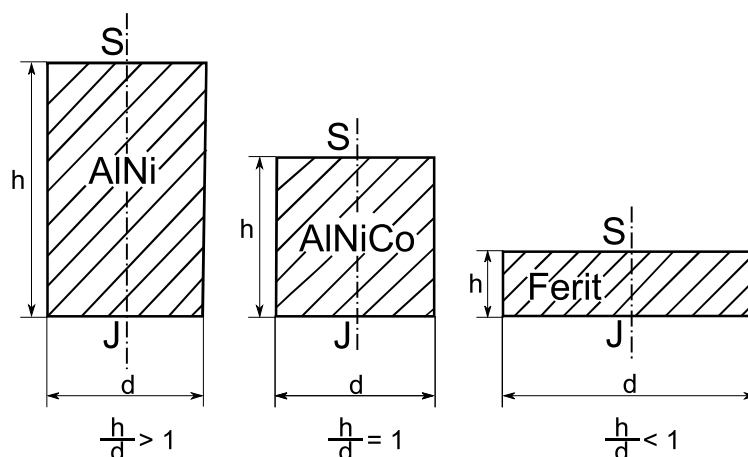
### 2.2.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod je jednou z důležitých částí reproduktoru, konstrukce a použité materiály ovlivní účinnost, váhu a přenosové vlastnosti reproduktoru. Je tvořen permanentním magnetem, pólovými nástavci, chladicím otvorem a vzduchovou mezerou. Permanentní magnet a pólové nástavce z magneticky měkkých materiálů soustředí magnetický tok do vzduchové mezery, kde je umístěna kmitací cívka. [4]

Magnetickému toku vzduchovou mezerou je přímo úměrná účinnost reproduktoru, a proto je snaha tuto mezeru konstruovat co nejmenší. Tvar vzduchové mezery je obvykle

prstencový, který je dán šířkou, výškou a vnitřním průměrem. Šířka odpovídá průměru drátu, počtu vrstev kmitací cívky a šířce kostry kmitací cívky, navíc se musí navýšit o bezpečnou vzdálenost od pólových nástavců, jak uvnitř cívky, tak vně. Výška musí odpovídat výšce kmitací cívky. Pro tyto parametry platí, že čím menší budou, tím větší bude magnetický tok procházející vzduchovou mezerou. [1]

Materiály permanentních magnetů jsou nejčastěji tvrdé ferity a slitiny AlNi nebo AlNiCo. Tvar magnetu je obvykle rotační a poměr výšky k průměru závisí na použitém materiálu, kdy každý materiál má pro maximální využití magnetických vlastností jiný poměr, který je znázorněn na obrázku 2.4. [1]



**Obr. 2.4:** Poměr rozměrů magnetů dle materiálů |Převzato s úpravami z [1]|

Chladicí otvor nebo také středový kanálek je určen k odvodu tepla z magnetického obvodu reproduktoru. Další pozitivní vlastností je vyrovnání tlaku při pohybu kmitací cívky, kdy bez středového kanálku stlačený vzduch klade kmitací cívce odpor. [4]

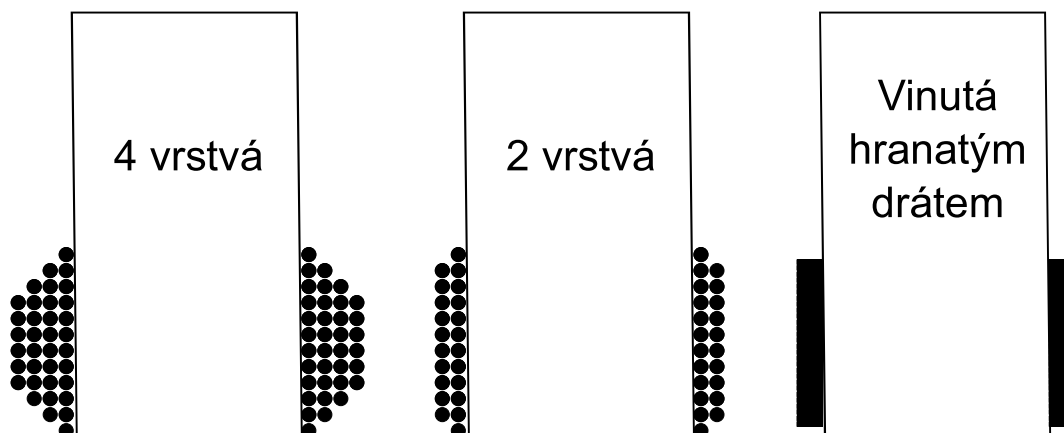
Magnetický obvod je obohacen o zkratovací prsteneček, který zamezuje nežádoucí modulaci malého střídavého magnetického pole cívky s polem permanentního magnetu. [4]

## 2.2.2 Kmitací cívka

Kmitací cívka je umístěna ve vzduchové mezeře a délka navinutého vodiče spolu s indukčností magnetického obvodu udávají konstantu  $Bl$ , která neúměrně svým kvadrátem ovlivňuje elektrický činitel jakosti popsány v kapitole 3.5.3.2. Průměr navinutého drátu udává impedanci reproduktoru. To znamená, že návrh cívky přímo ovlivní výslednou citlivost reproduktoru.[1][4]

Konstrukčně se kmitací cívky liší v množství navinutých vrstev a tvaru vodiče. Užívá se dvouvrstvých a čtyřvrstvých vinutí, kdy každé má své klady a záporny. Reprodukory s dvouvrstvými kmitacími cívkami lépe reprodukuje vyšší kmitočty, naopak čtyřvrstvé cívky jsou vhodné pro kmitočty nižší. Hranatá vinutí efektivněji vyplní prostor mezi vodiči a využívá se v jednovrstvé variantě. Je lehčí a vzduchová mezera je menší, výsledkem

této konstrukce je nárůst účinnosti na vyšších kmitočtech. Uspořádání kmitacích cívek je znázorněno na obrázku 2.5.[4]



**Obr. 2.5:** Vinutí kmitacích cívek |Převzato s úpravami z [4]

Mezi nejčastěji využívané materiály kmitacích cívek patří měď, hliník a hliník potažený mědí. Obvykle se využívá mědi, která má dobré elektrické vlastnosti a tepelnou odolnost, ale kvůli snížení váhy kmitacího systému se u dražších reproduktorů využívá hliníku. Hliník je lehčí, má větší odpor a lepší tepelné vlastnosti z hlediska dlouhodobého zatížení nežli měď. Větší odpor se projeví lepší reprodukcí vyšších kmitočtů a je potřeba méně závitů, avšak tato vlastnost vede na snížení indukčnosti kmitací cívky. Užití u dražších reproduktorů je dáno obtížnějším opracováním hliníku. Hliník potažený mědí kombinuje výhody obou materiálů.[4]

Vliv konstrukce kmitací cívky se projeví do značné míry také na kmitočtové charakteristice, kdy je z výše popsaných důvodů již jasné, že s nárůstem délky vinutí  $l$  vzroste síla budící membránu reproduktoru. Na první pohled je takové řešení přínosem, ale při bližším rozboru problematiky vyjde najevo, že výsledek není vždy dle očekávání. Zvýšením počtu závitů vzroste váha celého kmitacího systému a to nepříznivě ovlivní účinnost reproduktoru na vyšších kmitočtech a celková citlivost systému nebude tak razantní, jak by se očekávalo.[4]

Za zmínku stojí vliv kmitací cívky na harmonické zkreslení, kdy při vychýlení cívky přibližně o jednu desetinu své délky způsobí 5% zkreslení, kdy je výška kmitací cívky rovna výšce vzduchové mezery. Harmonické zkreslení je možné potlačit úpravou poměru mezi výškami vzduchové mezery a kmitací cívky.[1]

### 2.2.2.1 Kostra kmitací cívky

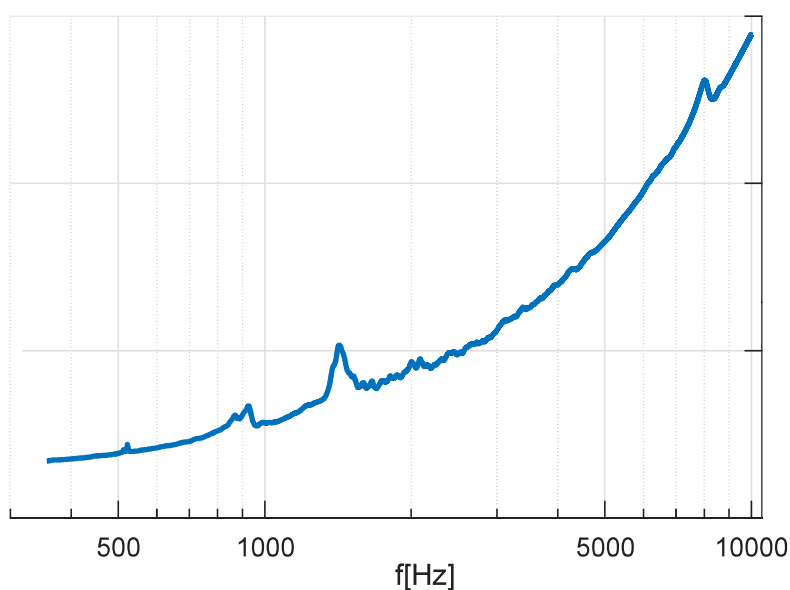
Kostra kmitací cívky, také přezdívaná jako former, plní funkci můstku mezi cívkou a membránou. Na formeru je umístěno vinutí, které se většinou lepí a izoluje pomocí smaltu. Kvalitou formeru je do jisté míry určována životnost a mechanická odolnost reproduktoru. Na kmitací cívkě vznikají poměrně velké tepelné ztráty, které je potřeba při konstrukci formeru zvážit.[4] [12]

Maximální teplota je v této části reproduktoru důležitým parametrem, který je dán kvalitou lepení, materiálem formeru a adhesivní látkou, jejíž účelem je pevné spojení vlnutí s formerem. Mezi často užívané materiály formeru patří papír, nomex a hliník. Papír, který je využíván při výrobě levnějších reproduktorů vydrží teplotu cca 160 °C, má vysoké tlumení a nízkou tepelnou vodivost. Nomex vydrží tepelné zatížení cca 240 °C a vysoké tlumení. Jelikož byl tento materiál vyvinut primárně jako ohnivzdorný, má nízkou tepelnou vodivost[14]. Hliníkový former ve formě trubky obsahuje podélnou mezeru, aby nevytvářela závit na krátko. Hliník vydrží teplotu cca 150 °C, má slušnou tepelnou vodivost a střední tlumení. Adhesivní látkou je již zmíněný smalt. [4] [2]

### 2.2.3 Membrána

Funkce membrány spočívá v pístovém pohybu, který vytváří rozruch částic ve vzduchu. Tento pohyb musí být v ose reproduktoru, z tohoto důvodu se požaduje po membráně maximální tuhost. Velkou roli zde hraje váha membrány, která nesmí tlumit pístový pohyb (reproduktor ztrácí účinnost). V praxi se bohužel s maximálně tuhou membránou nesetkáme a v důsledku toho vznikají deformace při silovém působení kmitací cívky na membránu.[4]

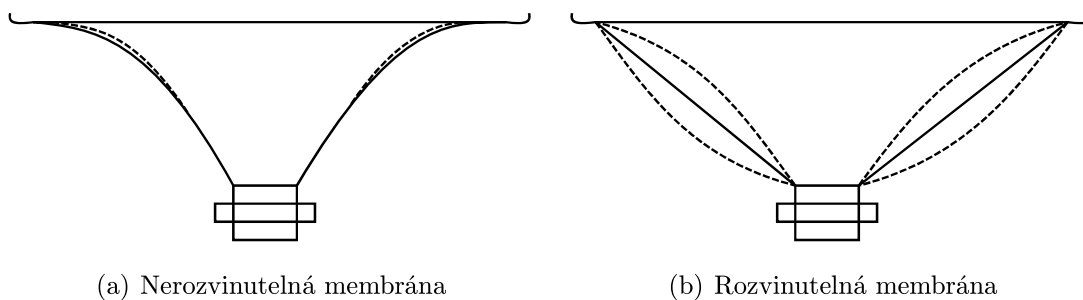
Deformace membrány nevznikají pouze v bodě působení síly, ale šíří se postupnou vlnou. V ustáleném stavu vzniká obvykle stojaté vlnění, které při sloučení s pístovým pohybem produkuje subharmonické kmitočty. Tyto vlastní kmity membrány považujeme za nežádoucí a jejich vliv můžeme pozorovat na impedanční charakteristice v podobě špiček v okolí 1-2 kHz a na kmitočtové charakteristice, kde způsobují zvlnění. Obecně platí, že čím tvrdší membrána, tím jsou menší kmitočtové deformace, které odpovídají povrchovým deformacím membrány. Na obrázku 2.6 je znázorněn vliv deformací membrány na impedanční charakteristiku.[4]



**Obr. 2.6:** Vliv deformací membrány na impedanční charakteristiku



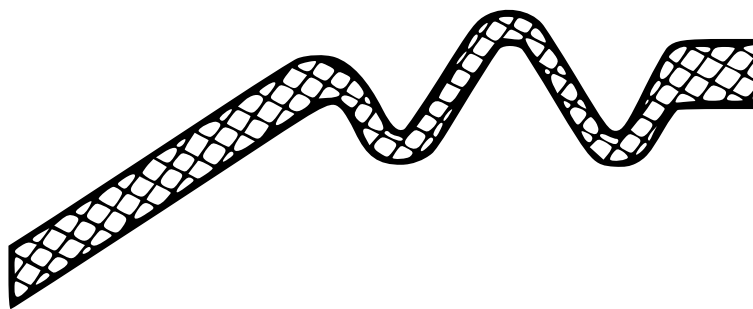
Vhodným tvarem a materiálem membrány lze do určité míry popsané deformace eliminovat. Kuželové membrány se dělí na rozvinutelné a nerozvinutelné (obr. 2.7). Nerozvinutelné membrány svým tvarem značně eliminují plastické deformace. Úpravou tvaru základny (kužele) membrány na eliptický docílíme vyrovnanější kmitočtové charakteristiky. Dalším způsobem tlumení vlastních kmitů membrány je použití materiálu, který dobře tlumí a je zároveň dostatečně lehký. Mezi běžně používané materiály patří: různé kombinace papíroviny, uhlíková vlákna, hliník s keramickým povlakem atd. K dodatečnému utlumení se membrána zpevní pomocí impregnace nebo nátěru.[2][4]



**Obr. 2.7:** Tvary kuželových membrán |Převzato s úpravami z [1]|

## 2.2.4 Závěsy membrány

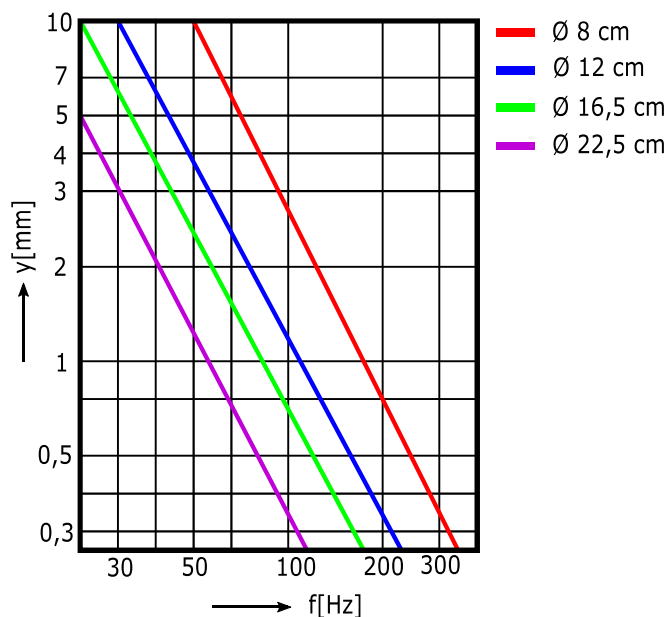
Závěsy slouží k vymezení pohybu membrány a její pružném uložení. Horní závěs, jak již název napovídá, kotví membránu v bodech, kde je její průřez největší a je tvořen jednou nebo více vlnkami (obr. 2.8). Materiály využívané k výrobě závěsů se liší dle využití reproduktoru. Některé reproduktory řeší závěs pouze zpevněnými vlnkami na membráně jiné např. gumou, plasty nebo také textilií.



**Obr. 2.8:** Horní závěs membrány elektrodynamického reproduktoru |Převzato s úpravami z [1]|

Životnost membrány je úzce spjatá s životností závěsu, který čelí největšímu mechanickému namáhání. Obecně platí, že čím větší plocha membrány, tím je potřeba menší výchylky pro dosažení stejného akustického výkonu a čím vyšší je kmitočet, tím je potřebná výchylka menší. Obrázek 2.9 popisuje teoretickou závislost výchylky na průřezu membrány a kmitočtu. Z tohoto poznatku je zřejmé, že menší reproduktory ke korektnímu

akustickému výkonu na nízkých kmitočtech potřebují poddajnější závěsy (jsou schopné většího vychýlení) nežli reproduktory větších rozměrů.[1]



**Obr. 2.9:** Výchylky kruhové membrány v závislosti na průměru membrány a kmitočtu [Převzato s úpravami z [1]]

Spodní závěs membrány (středící membrána) slouží k ukotvení membrány tak, aby nedocházelo ke tření cívky o magnetický obvod. Ukotvení se provádí k magnetickému obvodu nebo ke koši reproduktoru. Sekundárně spodní závěs chrání magnetický obvod proti prachu a nečistotám, které mohou způsobit zkreslení nebo až destrukci elektrodynamického soustrojí. Hlavními požadavky jsou prodyšnost a lehkost, aby nezatěžovala kmitací systém. Požadované vlastnosti spodního závěsu jsou shodné s horním závěsem - dobrá poddajnost a tlumení nežádoucích kmitů membrány.[4][12]

Závěsy membrány spolu se samotnou membránou ovlivňují poddajnost, odpor a hmotnost kmitacího systému, tyto parametry jsou popsány podrobněji v sekci 3. Obecně se po závěsech požaduje: teplotní a časovou stálost, optimální pružnost, dobré tlumení dynamického pohybu membrány a souosost.[4]

## 2.2.5 Koš reproduktoru

Koš reproduktoru představuje nosný prvek jak pro membránu, tak pro magnetický obvod. Koš se na první pohled jeví jakožto nepodstatná část reproduktoru, avšak může způsobit řadu obtíží při nevhodném technickém návrhu koše samotného. Pnutí vzniklé provozem reproduktoru či stárnutím materiálu na nevhodně navrženém koši způsobí deformace, které precizně vycentrovaný systém nějakým způsobem vychýlí z původní polohy. Takové vychýlení může znamenat drnčení, pazvuky a další nepříjemnosti, kterým se při návrhu v první řadě zamýšlelo vyhnout. Patříčné úvahy ke správnému návrhu koše by měli zahrnovat alespoň následující body:

- Maximální možné výchylky membrány
- Tuhost a stálost materiálu
- Prostředí, v němž bude reproduktor pracovat
- Kmitočtový rozsah, na který je reproduktor navrhován[1][4]

Odpovědi na uvedené body se zúží výběr materiálu a konstrukční řešení koše. Materiály užívané ke konstrukci levnějších reproduktorů jsou např. ocelový plech nebo také plast. Dražší nebo robustnější reproduktory bývají osazené košem ze slitiny hliníku. Materiál by také neměl ovlivňovat funkci reproduktoru vlastní rezonancí. Tvar koše hraje roli při reprodukci různých kmitočtových pásem. K reprodukci spodních pásem se využívá velkých aerodynamických otvorů, aby vzduch pod membránou neovlivňoval tuhost samotné membrány. U vyšších kmitočtů je situace opačná, uzavření koše způsobí posun rezonance výše s ohledem na kmitočet.[1][4][12]

## 2.2.6 Přívody a připojovací terminál

Připojovací terminál, jak název napovídá, slouží k připojení zdroje vstupního signálu. Polarita (směr toku proudu cívkou) se bere v úvahu, pokud se spojí dva a více reproduktorů s náhodně zapojenými vstupy. Taková konfigurace může způsobit zkreslení výsledného akustického vjemu. Značení kladné svorky je v takovém případě důležité a šetří čas. Konektory svorek připojovacího terminálu mohou být různé, typicky pérkové svorky nebo fastonové konektory. Rozebíratelné konektory způsobují vznik přechodového odporu, a proto je vhodnějším řešením pájení.[4]

Přívody vytváří elektrické spojení mezi terminálem a kmitací cívkou pomocí měděných nebo stříbrných lanek. Délka přívodů je relativně malá a z pohledu elektrického nezpůsobují žádné problémy. Z mechanického hlediska však přívody jsou dalším prvkem, který může kmitat. Kmitání způsobí zúžení průřezu na koncích lanka, kde takto zúžený průřez znamená úbytek napětí a s tím spojený pokles výkonu. Opatření vůči „ukmitání“ lanek je takové, že pájení bude provedeno kvalitně a pájený spoj se opatří speciální výztuží, jejíž zásluhou lanka vydrží mechanické namáhání při provozu reproduktoru.[4]

## 2.2.7 Těsnění proti prachu

Těsnění proti prachu neboli prachovka překrývá otvor nad kmitací cívkou, tím brání styku cívkou s prachem a nečistotami. Prachovky se liší velikostí a umístěním. U basových reproduktorů se nachází mezi okrajem membrány a cívkou. Taková pozice je výhodná a zesiluje tuhost membrány. Středotónové reproduktory mají prachovky malé a aplikované přímo na cívku. Varianta s prachovkou na cívce zesiluje reprodukci vyšších kmitočtů. Podobného efektu se docílí i u vysokotónových reproduktorů s kalotou. Kalota je vrchlíková membrána a její tvrdostí je možné upravovat směrové vlastnosti výškového reproduktoru.[4]

### **2.2.8 Těsnění**

Těsnění reproduktoru souvisí spíše s vlastnostmi týkající se ozvučnic, kdy uzavřená ozvučnice klade požadavky na hermeticky uzavřený vnitřní prostor. Těsnění tedy můžeme odstranit, pokud reproduktor umístíme na jiný typ ozvučnice.[4]

# 3

## Parametry reproduktoru

V dnešní době je trh nasycen spoustou různých reproduktorů, na první pohled vidíme rozdíly v rozměrech a s tím také spojené váhy reproduktoru. Avšak tyto parametry neurčují do jisté míry kvalitu reprodukce, pouze částečně napovídají o kmitočtovém pásmu, ve kterém reproduktor může být provozován. Proto se k určení kvality reproduktorů využívá soubor parametrů, které svým rozsahem zahrnují jak mechanické, tak elektrické vlastnosti.[4]

Parametry se dělí na již zmiňované mechanické, dále na všeobecné a grafické, kde mechanické parametry zahrnují hmotnost, rozměry atd. Všeobecné parametry jsou dány maximálním standardizovaným příkonem, citlivostí, jmenovitou impedancí, kmitočtovým rozsahem atp. Grafické parametry reprezentují nejčastěji kmitočtové, impedanční a směrové charakteristiky. Thiele – Small parametry definují elektromechanickou analogii reproduktoru.[4]

### 3.1 Rozměry reproduktoru

Rozměry reproduktoru hrají velkou roli při konstrukci ozvučnice, jež se dimenzuje dle právě zmiňovaných rozměrů. V katalogovém listu se obvykle uvádí:

- Vnější průměr
- Průměr středů otvorů pro šrouby
- Průměr otvorů pro šrouby
- Průměr montážních otvorů
- Celková výška reproduktoru
- Rozměry magnetu
- Celková hmotnost
- Průměr a výška kmitací cívky [4]

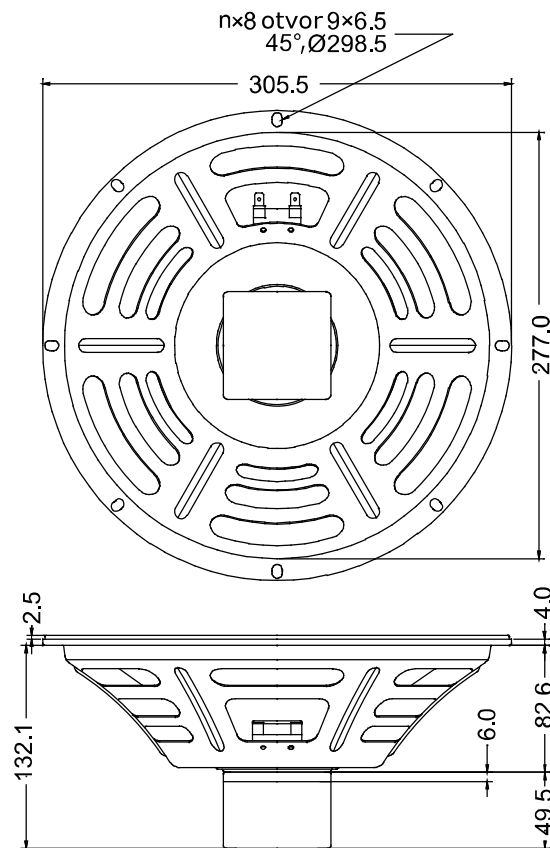
K následujícím výpočtům parametrů reproduktoru je důležitý poloměr membrány na rozhraní horního závěsu. Plocha, která je dána tímto poloměrem se nazývá ekvivalentní plocha membrány  $S_d$ . Je to aktivní plocha působící na vzduch před reproduktorem. Výpočet aktivní plochy kruhové membrány je dán vztahem 3.1. Aktivní plocha eliptické membrány je dána vztahem 3.2. [4]

$$S_d = \pi r_d^2 \quad [m^2] \quad (3.1)$$

$$S_d = \frac{\pi}{4}(ab) \quad [m^2] \quad (3.2)$$

kde:

$r_d$	Poloměr na rozhraní membrány a horního závěsu [m]
$a, b$	Osy elipsy na rozhraní membrány a horního závěsu [m]



Obr. 3.1: Katalogový výkres kytarového reproduktoru Jensen p12R [Převzato s úpravami z [20]]

## 3.2 Kmitočtová amplitudová charakteristika

Kmitočtová amplitudová charakteristika obecně vyjadřuje závislost amplitudy signálu na kmitočtu. V akustice je amplitudou akustický tlak, resp. hladina akustického tlaku, někdy

také označována jako SPL. Převod mezi hladinou akustického tlaku a akustickým tlakem je vyjádřen vztahem 3.3.[4]

$$L_P = SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad [dB] \quad (3.3)$$

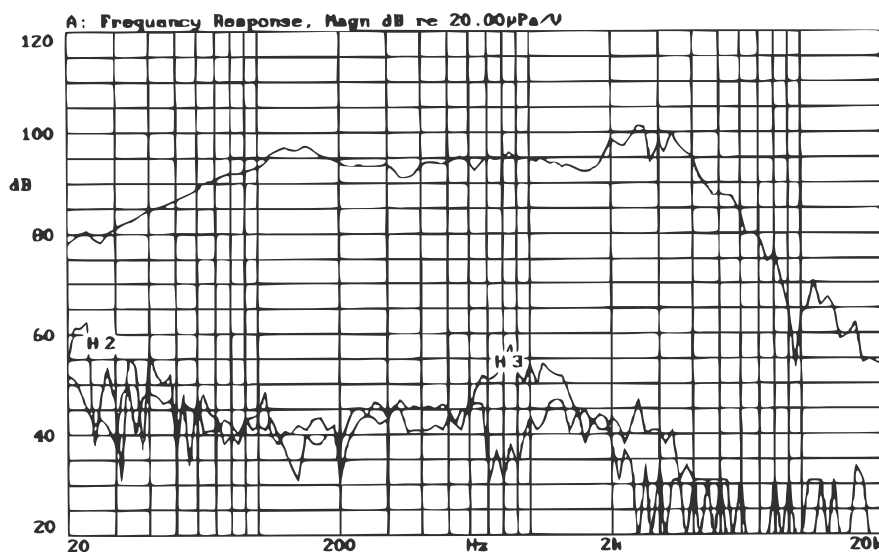
kde:

$p$	Akustický tlak [Pa]
$p_0$	Referenční akustický tlak, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa]

Nejčastěji se vynáší úroveň charakteristické citlivosti, která je jedním z popisovaných parametrů v kapitole 3.5.7. Mimo kmitočtové závislosti hladiny akustického tlaku se vynáší pomocí kmitočtové charakteristiky také průběhy zkreslení. Na takovém průběhu je možné pozorovat vliv zkreslení v závislosti na kmitočtu a úrovně sledovaného zkreslení.[4]

Korektní kmitočtová charakteristika se měří při konstantním výkonu a musí obsahovat údaj o umístění měřícího mikrofonu. Neznalost těchto údajů vede k znehodnocení charakteristiky, jelikož změnou vzdálenosti mikrofonu a příkonu reproduktoru se kmitočtová charakteristika také změní. Proto většina výrobců v katalogových listech udává kmitočtovou závislost charakteristické citlivosti.[1]

Z kmitočtové charakteristiky je možné získat údaje o kmitočtovém rozsahu, průměrnému akustickému tlaku ve vzdálenosti měření a zvlnění charakteristiky. Zvlnění je obecně nežádoucí, protože se požaduje konstantní hladina akustického tlaku v bodě poslechu. Ideální stav je hladká a nezvlněná charakteristika v celém kmitočtovém pásmu reproduktoru.[4]

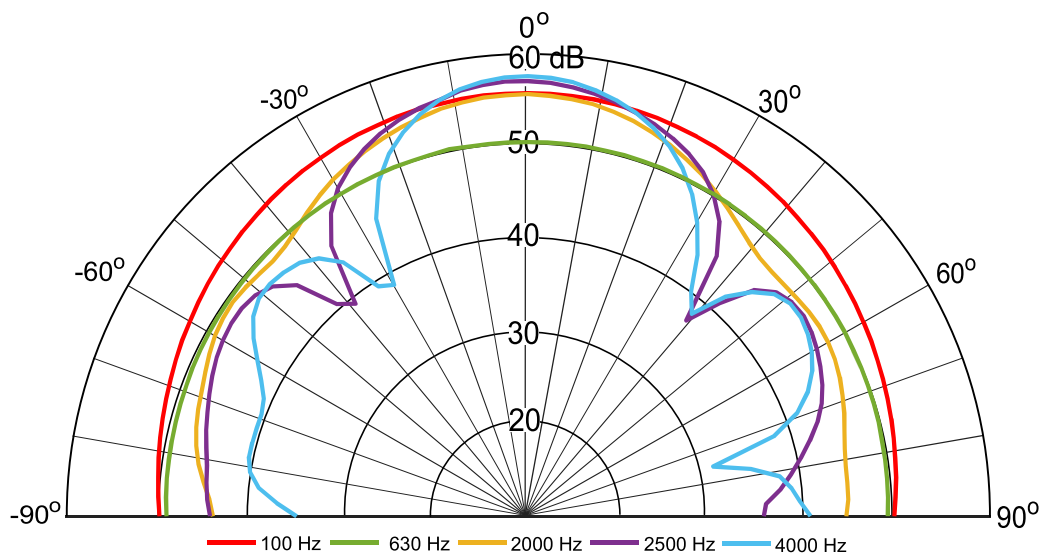


**Obr. 3.2:** Ukázka amplitudové kmitočtové charakteristiky včetně průběhů 1. a 2. harmonické

[Převzato z [4]]

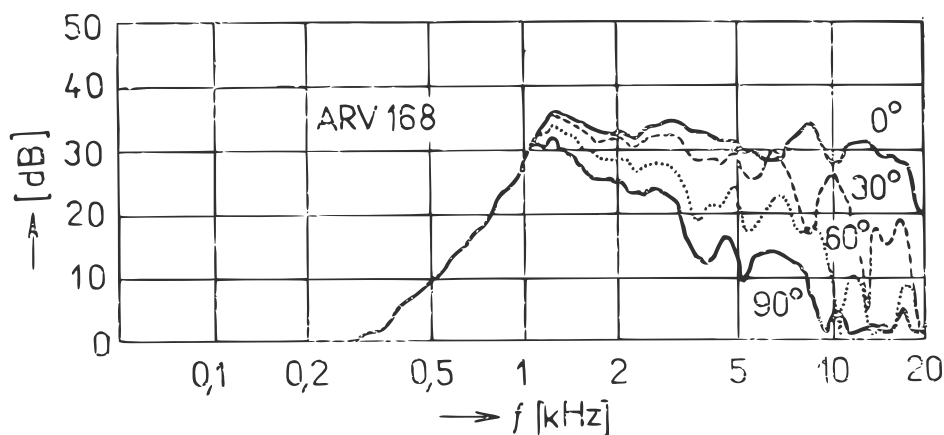
### 3.3 Směrová charakteristika

Reproduktor nevyzařuje do všech směrů v prostoru stejný akustický výkon a obecně se dá říci, že čím vyšší kmitočet, tím méně výkonu vyzáří mimo akustickou osu. Z tohoto důvodu se uvádí směrová charakteristika, jež udává závislost hladiny akustického tlaku na úhlu vychýlení od akustické osy. Vynáší se pomocí polárních souřadnic, kde v radiálním směru jsou znázorněny úhly a v axiálním směru úroveň. Každá křivka přitom odpovídá jedinému kmitočtu. Ukázka polárního zobrazení je na obr. 3.3.[1]



Obr. 3.3: Ukázka části směrové charakteristiky v polárním grafu

Směrové charakteristiky je možné zobrazovat také pomocí amplitudové kmitočtové charakteristiky, kde jsou vyneseny průběhy pro každý úhel zvlášť. Výhodou takového zobrazení je informace o kmitočtové závislosti v celém rozsahu na rozdíl od polárních souřadnic, ve kterých je zobrazení diskrétní z hlediska kmitočtu. Směrové charakteristiky zobrazené pomocí amplitudové kmitočtové charakteristiky jsou na obr. 3.4 [2]

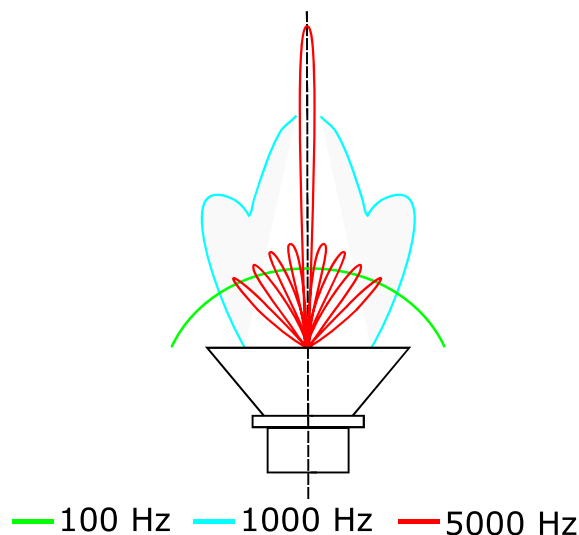


Obr. 3.4: Ukázka směrové charakteristiky pomocí amplitudových kmitočtových charakteristik

[Převzato z [2]]



Na nízkých kmitočtech se reproduktor chová všesměrově tzn., že hladina akustického tlaku je ve všech směrech při konstantní vzdálenosti od reproduktoru totožná a na směrové charakteristice tvoří kružnici. Zvyšováním kmitočtu vznikají postranní laloky a v ose reproduktoru se vytváří hlavní lalok, který nese nejvíce energie. Směrové chování reproduktoru je znázorněno na obr. 3.5.



**Obr. 3.5:** Směrové chování reproduktoru |Převzato s úpravami z [13]|

Ze směrové charakteristiky se může dále určit činitel směrovosti  $q$  resp. index směrovosti  $I_q$ , který udává číselnou informaci o směrovosti reproduktoru. Činitel směrovosti  $q$  je dán vztahem 3.4.

$$q = \frac{p_x^2}{p_s^2} \quad [-] \quad (3.4)$$

kde:

$p_x$	Akustický tlak ve sledovaném směru $[Pa]$
$p_s$	Střední vyzářený akustický tlak $[Pa]$

Střední akustický tlak  $p_s$  je možné určit graficky pomocí směrové charakteristiky, výpočtem daným vztahem 3.5 nebo aproximačním vzorcem 3.7. Podmínkou pro aproximaci je plynulá změna křivky směrové charakteristiky. [3]

$$p_s = \sqrt{\frac{1}{4\pi r^2} \cdot \rho_v c_0 P_a} \quad [Pa] \quad (3.5)$$

$$P_a = I_s S = \frac{p_s^2}{\rho_v c_0} \cdot 4\pi r^2 \quad [W] \quad (3.6)$$

kde:

$\rho_v$	Měrná hmotnost vzduchu $[\frac{kg}{m^3}]$
$c_0$	Rychlost vzduchu $[\frac{m}{s}]$
$P_a$	Vyzářený akustický výkon $[W]$
$S$	Plocha vyzářeného výkonu $[m^2]$
$I_s$	Průměrná intenzita zvuku na měřené ploše $[\frac{W}{m^2}]$
$r$	Poloměr plochy vyzařování $[m]$

$$p_s^2 = 0,03p_x^2 + 0,26p_{30}^2 + 0,45p_{60}^2 + 0,26p_{90}^2 \quad [W] \quad (3.7)$$

kde:

$p_{30}$	Akustický tlak měřený 30° od akustické osy $[Pa]$
$p_{60}$	Akustický tlak měřený 60° od akustické osy $[Pa]$
$p_{90}$	Akustický tlak měřený 90° od akustické osy $[Pa]$

Index směrovosti  $I_q$  udává míru vyzářeného výkonu v hlavním směru proti výkonu vyzářeném do okolního prostoru. V praxi to znamená, že když je index směrovosti 3 dB, tak v ose reproduktoru je dvojnásobná hladina akustického tlaku nežli v ostatních směrech. Index směrovosti  $I_q$  je dán vztahem 3.8.[1][4]

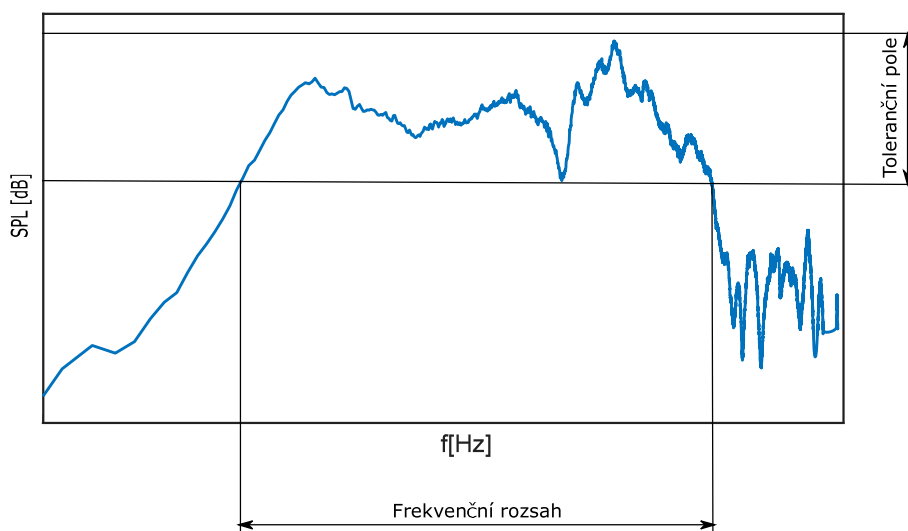
$$I_q = 10 \log_{10} q \quad [dB] \quad (3.8)$$

### 3.4 Kmitočtový rozsah

Kmitočtový rozsah je definován jako interval kmitočtů, ve kterých reproduktor vytváří akustický tlak s přijatelným rozptylem. Jedním ze způsobů vyjádření je pomocí kmitočtové charakteristiky, kde se určí toleranční pole, které vymezení přijatelné zvlnění charakteristiky. Rozsah tolerančního pole není vždy jednoznačný a je nutné si jej prostudovat v katalogovém listu. Běžně používané rozsahy jsou  $\pm 3$  a  $\pm 6$  dB, avšak se po dohodě mohou měnit.[4]

Dalším způsob determinace kmitočtového rozsahu je odhadem z parametrů reproduktoru. Dolní mezní kmitočet je možné reprezentovat rezonančním kmitočtem  $f_s$ , který je popsán v kapitole 3.5.1. Horní mezní kmitočet určíme z pozorování směrových a kmitočtových charakteristik, kde se počínaje jistým kmitočtem začnou křivky deformovat. Směrová charakteristika vykazuje na velkých úhlech laloky a kmitočtová charakteristika se začne vlnit. Takový kmitočet nese název kritický kmitočet membrány a je dán vztahem 3.9.[4]

$$f_{kr} = \frac{115}{r_d} \quad [Hz] \quad (3.9)$$



**Obr. 3.6:** Určení kmitočtového rozsahu pomocí amplitudové kmitočtové charakteristiky

kde:

$$r_d \quad \text{efektivní poloměr membrány [m]}$$

Kritický kmitočet membrány říká, že čím menší membrána, tím vyšší kmitočet dokáže reproduktor korektně zahrát. Tento způsob výpočtu je orientační a hodnoty kritického kmitočtu jsou často překračovány.[4]

## 3.5 Thiele-Small parametry

Thiele-Small parametry, označovány také jako TS parametry, popisují elektrodynamický reproduktor jako elektromechanický systém v oblasti nízkých kmitočtů. TS parametry se využívají ke konstrukci ozvučnice, která při nevhodném návrhu ovlivní rozsah reprodukce nízkých kmitočtů. Ostatně jako všechny uváděné parametry slouží k porovnání a kvalitativnímu začlenění reproduktorů.

### 3.5.1 Rezonanční kmitočet a poddajnost

Rezonanční kmitočet  $f_s$  udává kmitočet, na kterém je uložena největší energie kmitacího systému. Při rezonančním kmitočtu membrána reproduktoru kmitá s největší amplitudou výchylky a provoz na tomto kmitočtu může vést až k poškození reproduktoru. Reproduktor je na podrezonančních kmitočtech velmi neefektivní, a proto se jako dolní mezní kmitočet označuje právě rezonanční kmitočet. Rezonanční kmitočet také nese informaci o jakosti hlubokotónových reproduktorů.[1][11]

Odvození rezonančního kmitočtu reproduktoru vychází z modelu pružiny se zavěšeným závažím, jejíž pohyb podstatně připomíná pohyb membrány reproduktoru. Pružina je dána tuhostí  $k$  a hmotností závaží  $m$ . Při vychýlení pružiny z výchozí polohy a při

zanedbání tlumení bude pružina kmitat právě vlastní rezonančním kmitočtem  $f_{pr}$ , který je dán vztahem 3.10.[4]

$$f_{pr} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [Hz] \quad (3.10)$$

K aplikaci vztahu rezonančního kmitočtu  $f_{pr}$  na reproduktor je zapotřebí si upřesnit tuhost  $k$  a hmotnost  $m$ , které jsou uvedeny ve vztahu 3.10. Tuhost pružiny  $k$  odpovídá převrácené hodnotě poddajnosti membrány  $c_{md}$ .

$$k = \frac{1}{c_{md}} \quad \left[ \frac{N}{m}; \frac{m}{N} \right] \quad (3.11)$$

Hmotnost zavěšeného závaží pružiny  $m$  odpovídá hmotnosti celého kmitacího systému  $m_{md}$ . Po dosazení do vztahu 3.10 lze určit rezonanční kmitočet  $f_s$ . [4]

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{c_{md}m_{md}}} \quad [Hz] \quad (3.12)$$

Reálný reproduktor ovšem vyzařuje do akustické impedance, kterou tvoří vzduch, jež kmitá spolu s membránou. Je tedy zapotřebí vliv akustické impedance započíst do rezonančního kmitočtu. Kmitací systém ovlivní hmotnost spolukmitajícího vzduchu aktivní plochy membrány, kterou je nutné k hmotnosti kmitacího systému přičíst. Celková hmotnost kmitacího systému včetně spolukmitajícího vzduchu je dána vztahem 3.14, hmotnost vzduchu  $m_v$  je dána vztahem 3.13 a aktivní plocha membrány  $S_d$  vztahem 3.1.

$$m_v \cong \frac{8\rho_v}{3\pi^2 r_d} \quad [kg] \quad (3.13)$$

$$m_{ms} = m_{md} + S_d^2 m_v \quad [kg] \quad (3.14)$$

Poddajnost kmitacího systému  $C_{md}$  je taktéž ovlivněna spolukmitajícím vzduchem, avšak z předpokladu, že reproduktor vyzařuje do otevřeného, libovolně stlačitelného prostoru je poddajnost spolukmitajícího vzduchu  $C_v$  rovna nekonečnu. Celková poddajnost kmitacího systému  $c_{ms}$  je dána vztahem 3.15.

$$\frac{1}{c_{ms}} = \frac{1}{c_{md}} + \frac{1}{c_v} \cong \frac{1}{c_{md}} \Rightarrow c_{ms} \cong c_{md} \quad \left[ \frac{m}{N} \right] \quad (3.15)$$

Rezananční kmitočet  $f_s$ , který zahrnuje vliv spolukmitajícího vzduchu je popsán vztahem 3.16.[4]

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{c_{ms}m_{ms}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{c_{ms}(m_{md} + S_d^2 m_v)}} \quad [Hz] \quad (3.16)$$

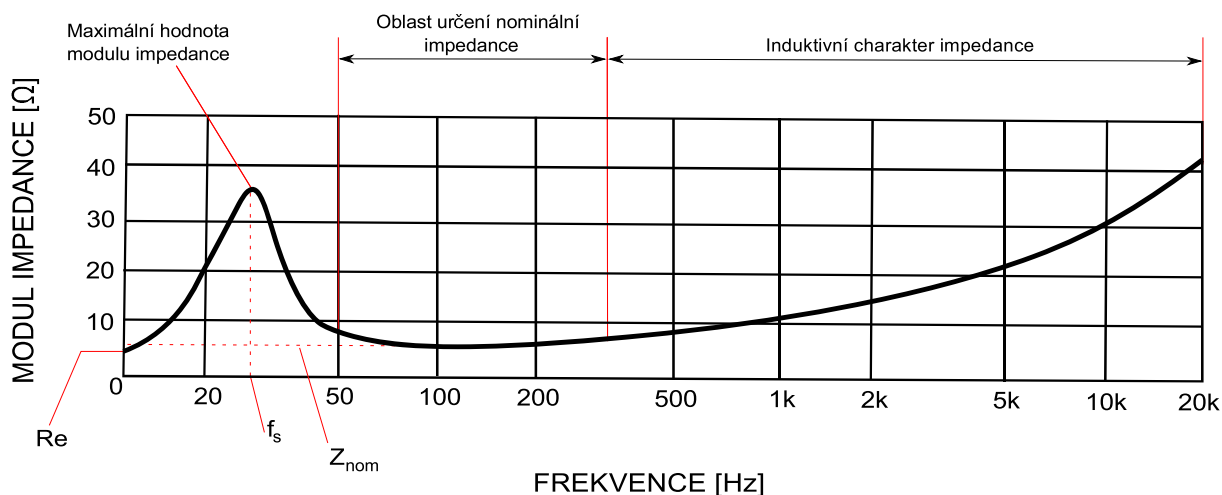
### 3.5.2 Impedanční charakteristika, nominální impedance

Impedanční charakteristika udává závislost impedance resp. modulu impedance na kmitočtu nebo také zřídka obsahuje křivku znázorňující fázi impedance. Impedanční charakteristika sama o sobě mezi TS parametry nepatří, avšak výpočty TS parametrů z této charakteristiky vychází.

Tvar impedanční charakteristiky samotného reproduktoru je induktivního charakteru, jelikož kmitací cívka vykazuje indukčnost. V pásmu nízkých kmitočtů modul impedance prudce roste a při rezonančním kmitočtu  $f_s$  dosahuje svého maxima. S narůstajícím kmitočtem je pozorovatelný prudký pokles blízko rezonančního kmitočtu. Takový průběh je znázorněn obázkem 3.7, na kterém jsou vyznačeny důležité body impedanční charakteristiky.[4]

Nominální impedance  $Z_{nom}$  udává minimální možnou hodnotu modulu impedance na kmitočtech vyšších než je rezonanční kmitočet  $f_s$ . V praxi to znamená, že průběh impedanční charakteristiky na kmitočtech  $f > f_s$  nepřekročí nominální hodnotu garantovanou výrobcem. Hodnoty nominální impedance jsou typicky 4,8,16  $\Omega$ . Tato hodnota je informativní, ale je také úzce spjata s maximálním příkonem dodávaným zdrojem do reproduktoru. Na obrázku 3.7 je znázorněná oblast určující nominální impedanci.[4]

Reálná složka impedance neboli činný odpor kmitací cívky  $R_e$  je dán při kmitočtu  $f = 0$  Hz. Slouží k výpočtu elektrického činitele jakosti  $Q_{es}$ , který je popsán v následující kapitole. V případě chybějícího údaje o nominální impedanci reproduktoru je možné rychlým měřením multimetrem získat činný odpor  $R_e$ , který je přibližně o 20% menší než nominální impedance.[4]



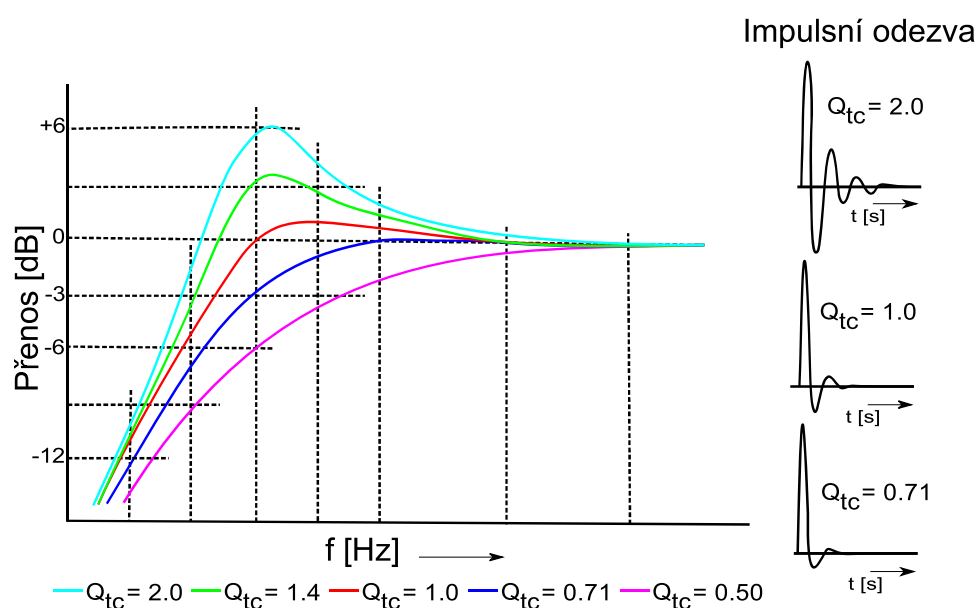
Obr. 3.7: Popis impedanční charakteristiky basového reproduktoru [Převzato s úpravami z [4]]

### 3.5.3 Činitel jakosti

Reálné obvody jak mechanické, tak elektrické obsahují konečné hodnoty odporů, na kterých vznikají ztráty. Příkladem může být cívka, která obsahuje vlastní parazitní odpor

nebo tlumení pružiny atp. Činitel jakosti  $Q$  vypovídá o míře ztrát obvodu, čím větší jsou ztráty, tím větší činitel jakosti bude.[4]

Činitel jakosti  $Q$  je obecně dán poměrem kmitočtu a šířky pásma. Vliv činitele jakosti můžeme pozorovat na impedančních charakteristikách, kde obvody s větším činitelem jakosti vykazují užší a vyšší rezonanční špičku. Méně výrazné rezonanční špičky ukazují na menší hodnotu činitele jakosti. Pozorování přenosových charakteristik obvodů s různými činiteli jakosti vede k závěru, že vyšší hodnoty činitele jakosti způsobují strmější nárůst křivky. Naopak obvody s nižšími činiteli jakosti vykazují menší strmost. Vlivem strmějšího nárůstu přenosové charakteristiky vznikají při impulzní odezvě systému zákmity, kde doba ustálení těchto zákmitů je dána strmostí charakteristiky. Příklad souvislosti činitele jakosti s přenosovou charakteristikou je znázorněn na obrázku 3.8.[4]



**Obr. 3.8:** Souvislost impulzní odezvy a přenosové charakteristiky |Převzato s úpravami z [4]|

Jelikož je reproduktor elektromechanický prvek, míry ztrát jsou klasifikovány třemi činiteli jakosti. Mechanický činitel jakosti  $Q_{ms}$  představuje ztráty celého pohyblivého aparátu reproduktoru. Elektrický činitel jakosti  $Q_{es}$  představuje ztráty kmitací cívky a celkový činitel jakosti  $Q_{ts}$ , kterým jsou reprezentovány oba zmíněné činitele jakosti. K určení těchto činitelů jakosti je potřeba uvést elektromechanickou analogii reproduktoru tzn. náhradní schéma reproduktoru.

### 3.5.3.1 Náhradní schéma reproduktoru

Náhradní schéma reproduktoru vyjadřuje elektrické i mechanické prvky elektrickým obvodem. Takové schéma je vhodné k dalšímu zkoumání chování a simulaci reproduktoru či návrhu výhybek, ozvučnic atp.

Porovnáním vztahu 3.16, který udává rezonanční kmitočet reproduktoru, a Thomsova vztahu 3.17 pro paralelní rezonanční obvod  $LC$  vidíme podobnost. Celková hmotnost

$m_{ms}$  odpovídá indukčnosti  $L$  a poddajnost  $c_{ms}$  odpovídá kapacitě  $C$ .

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad [Hz; H, F] \quad (3.17)$$

V souvislosti s činitelem jakosti byl zmíněn odpor. Mechanické ztráty reproduktoru jsou dány celkovým mechanickým odporem systému  $r_{ms}$  3.18, kterým je respektován odpor kmitacího systému  $r_{md}$  a odpor spolukmitajícího vzduchu plochou membrány  $r_v$ . Elektrickou analogií k mechanickému odporu je elektrický odpor  $R$ . Analogií k elektrickým veličinám napětí  $U$  a proudu  $I$  jsou mechanické veličiny síla  $F$  a rychlost  $v$ . Napětí  $U$  odpovídá síle  $F$  a proud  $I$  odpovídá rychlosti  $v$ . [4]

$$r_{ms} = r_{md} + S_d^2 r_v = r_{md} + \frac{\pi \rho_v r_d^4}{2c_0} \quad \left[ \frac{kg}{s}; \frac{kg}{m^3}, m, \frac{m}{s} \right] \quad (3.18)$$

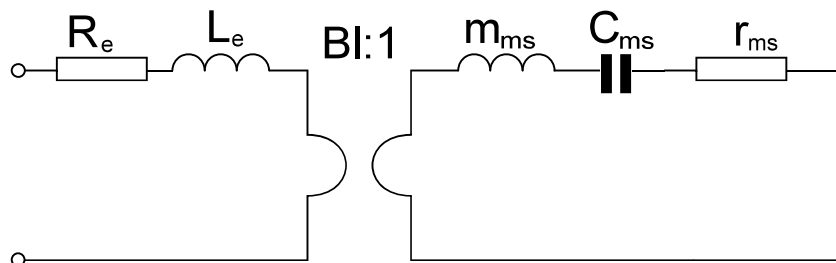
Ze vztahu 2.1 pro sílu  $F$  vyvolanou kmitací cívkou po dosažení z popsané elektromechanické analogie vznikne vztah 3.21. Tento vztah poukazuje na převod elektrické energie na mechanickou s konstantou  $Bl$ . Takový převod je možné uskutečnit pomocí teoretického prvku tzv. gyrátoru. Funkcí gyrátoru je převod napětí na proud, odporu na vodivost, indukčnost na kapacitu atd. [4]

$$F = IBl \Rightarrow U = IBl \quad (3.19)$$

$$v = \frac{U}{Bl} \quad (3.20)$$

$$\frac{U}{I} = Bl \quad (3.21)$$

Pomocí takové analogie je možné sestavit náhradní schéma reproduktoru s gyrátorem, kdy jedna strana obsahuje prvky elektrické a druhá strana elektrickou analogii mechanických vlastností reproduktoru. Náhradní schéma obsahující gyrátor je znázorněno na obrázku 3.9. [4]

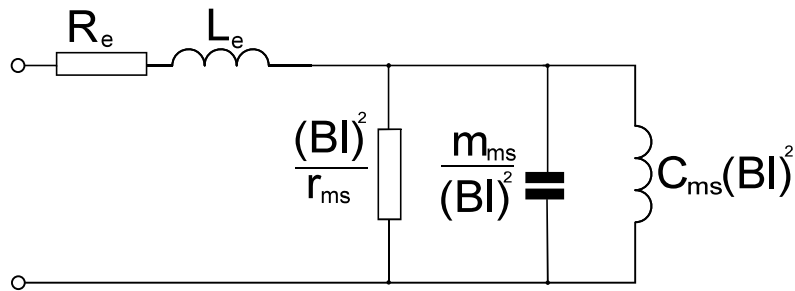


**Obr. 3.9:** Náhradní schéma reproduktoru s gyrátorem |Převzato s úpravami z [9]|

Elektrická část náhradního schématu obsahuje činný odpor kmitací cívky  $R_e$  a indukčnost kmitací cívky  $L_e$  zapojeny v sérii. Síla  $F$  vyvolaná kmitací cívkou je transformována pomocí gyráčního převodu  $Bl$  na rychlost  $v$ . Mechanickou část představuje sériové spojení

hmotnosti celkového kmitacího systému  $m_{ms}$ , poddajnosti kmitacího systému  $c_m$  a mechanického odporu spolukmitajícího vzduchu  $r_m$ . Důvodem sériového spojení těchto prvků je takové, že síla vyvíjená kmitací cívkou působí v opačném směru proti síle vyvolané hmotností kmitacího systému a odporem spolukmitajícího vzduchu.[4][9]

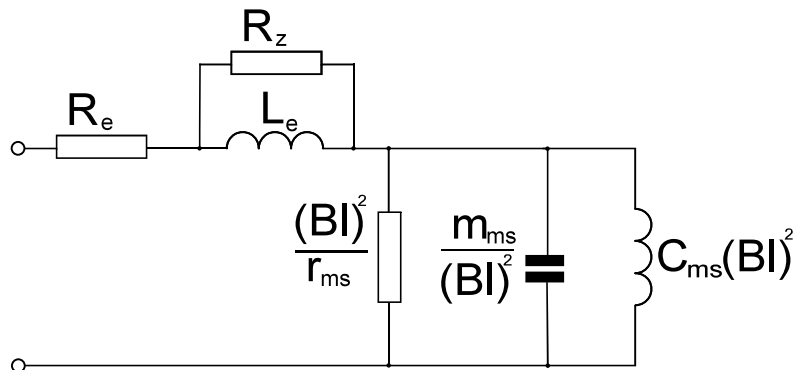
Převodem mechanické strany náhradního schématu na elektrickou získáme obvod, který je znázorněn na obrázku 3.10. Funkcí gyrátoru je transformace impedance, a proto není překvapením, že poddajnost  $c_{ms}$ , hmotnost  $m_{ms}$  a mechanický odpor  $r_{ms}$  změní charakter.[4][9]



Obr. 3.10: Náhradní schéma reproduktoru |Převzato z [4]|

Výsledné náhradní schéma popisuje pouze samotný reproduktor. Vložení reproduktoru do ozvučnice se změní parametry a zároveň také náhradní schéma, kterým jsou tyto parametry respektovány.[4]

Pro úplnost je na obrázku 3.11 uvedeno náhradní schéma, na kterém jsou respektovány ztráty kmitací cívky odporem  $R_z$ . [9]



Obr. 3.11: Náhradní schéma reproduktoru včetně ztrát |Převzato s úpravami z [9]|

### 3.5.3.2 Činitele jakosti reproduktoru

Ze vztahu 3.22 pro činitel jakosti  $Q_{RLC}$  elektrického obvodu  $RLC$  a znalosti náhradního schématu reproduktoru je možné odvodit činitele jakosti  $Q_{ms}$  a  $Q_{es}$ .

$$Q = 2\pi f_s \frac{L}{R} \quad (3.22)$$



kde:

$f_s$	Rezonanční kmitočet RLC obvodu [Hz]
$L$	Indukčnost [H]
$R$	Činný odpor [ $\Omega$ ]

Úpravou vztahu 3.22 pro mechanickou stranu náhradního schématu vznikne vztah 3.23, kterým je popsán mechanický činitel jakosti  $Q_{ms}$ .

$$Q_{ms} = 2\pi f_s \frac{m_{ms}}{r_{ms}} \quad (3.23)$$

kde:

$f_s$	Rezonanční kmitočet reproduktoru [Hz]
$m_{ms}$	Celková hmotnost kmitacího systému [kg]
$r_{ms}$	Mechanický odpor reproduktoru [ $\frac{kg}{s}$ ]

Úpravou vztahu 3.22 pro elektrickou stranu náhradního schématu vznikne vztah 3.24, kterým je popsán elektrický činitel jakosti  $Q_{es}$ .

$$Q_{ms} = 2\pi f_s \frac{m_{ms} R_e}{(Bl)^2} \quad (3.24)$$

kde:

$f_s$	Rezonanční kmitočet reproduktoru [Hz]
$R_e$	Činný odpor kmitací cívky [ $\Omega$ ]
$Bl$	$Bl$ faktor, gyrační konstanta [Tm]

Reprezentací  $Q_{ms}$  a  $Q_{es}$  je celkový činitel jakosti  $Q_{ts}$ , který je definován vztahem 3.25.[4][6]

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} \quad (3.25)$$

Takto definované činitele jakosti představují reproduktor při zkratované kmitací cívce. Provoz reproduktoru však při zkratované cívce nikdy nenastane, poněvadž zdroj signálu na vstupu reproduktoru bude mít vždy nenulovou impedanci. Připojení takového zdroje zvýší činitele jakosti oproti zkratované cívce.[4]

Dalším faktorem jsou výhybky, které vlastním nenulovým odporem v kombinaci se zdrojem signálu výrazně ovlivní činitele jakosti. Korekce je možná zvýšením činného odporu kmitací cívky  $R_e$ , avšak taková úprava vede ke změně kmitočtové charakteristiky v okolí rezonance. Důsledkem je změna impulsní odezvy membrány dle obrázku 3.8.[4]

Souvislost činitele jakosti s impedanční a kmitočtovou charakteristikou napovídá o chování reproduktoru v okolí rezonance. Celkový činitel jakosti reproduktoru  $Q_{ts}$  napovídá také o velikosti uzavřené ozvučnice, která nevhodnou konstrukcí nepříznivě ovlivní

rezonanční kmitočet  $f_s$  tzn., výrazně zvýší rezonanční kmitočet. Důsledkem takového posunu rezonančního kmitočtu reproduktor ztrácí schopnost vyzářovat nízké kmitočty.[6]

V praxi reproduktor s malým celkovým činitelem jakosti  $Q_{ts}$  bude umístěn do méně rozměrné ozvučnice než reproduktor s větším celkovým činitelem jakosti  $Q_{ts}$ . Avšak volba ozvučnice není dána pouze činitelem jakosti. Dalším parametrem, který rozhodne o rozměrech ozvučnice je ekvivalentní objem  $V_{as}$  popsáný v kapitole 3.5.4. [4]

### 3.5.4 Ekvivalentní objem

Závěrem kapitoly 3.5.3.2 byl zmíněn ekvivalentní objem  $V_{as}$  v souvislosti s rozměry uzavřené ozvučnice. Tento parametr je vyjádřen objemem vzduchu, jehož poddajnost je shodná s celkovou poddajností kmitacího systému  $c_{ms}$ . Ekvivalentní objem  $V_{as}$  je dán vztahem 3.26.[4]

$$V_{as} = c_{ms}c_0\rho_v S_d^2 \quad [m^3] \quad (3.26)$$

kde:

$c_{ms}$	Celková poddajnost membrány $[\frac{m}{N}]$
$c_0$	Rychlost zvuku $[\frac{m}{s}]$
$\rho_v$	Měrná hmotnost vzduchu $[\frac{kg}{m^3}]$

Důvod definice ekvivalentního objemu  $V_{as}$  je takový, že umístění reproduktoru do uzavřené ozvučnice má za následek změnu rezonančního kmitočtu reproduktoru tzn., že závěsy jsou méně poddajné. Výpočet rezonančního kmitočtu reproduktoru s ozvučnicí  $f_b$  je pomocí elektromechanické analogie takový, že v náhradním schématu (obr.3.10) přibude paralelní indukčnost  $L_b$ , která znázorní změnu poddajnosti závěsů reproduktoru. Resonanční kmitočet  $f_b$  je dán vztahem 3.27. Takové vyjádření je nepraktické, protože se veličiny elektromechanické analogie běžně neudávají a výpočet indukčnosti  $L_b$  je nepohodlný.[4][6]

$$f_b = f_s \cdot \sqrt{1 + \frac{c_{ms}(Bl)^2}{L_b}} \quad [Hz] \quad (3.27)$$

kde:

$c_{ms}$	Celková poddajnost membrány $[\frac{m}{N}]$
$Bl$	$Bl$ faktor, gyrační konstanta $[Tm]$
$L_b$	Indukčnost, kterou je reprezentována ozvučnice $[H]$

Na druhou stranu vyjádření ekvivalentního objemu  $V_{as}$  a objemu ozvučnice  $V_b$  z rozměrů je snadné. Resonanční kmitočet reproduktoru v uzavřené ozvučnici  $f_b$  je dán vztahem 3.28.[6]

$$f_b = f_s \cdot \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V_b}} \quad [Hz] \quad (3.28)$$

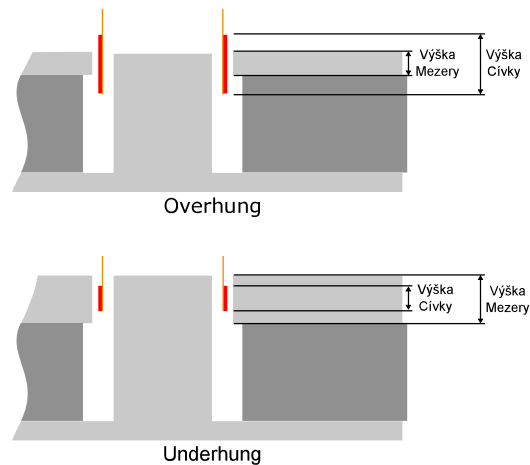
Praktický dopad ekvivalentního objemu  $V_{as}$  je takový, že čím menší tento parametru bude, tím jsou menší nároky na rozměry ozvučnice. Další informací, kterou ekvivalentní objem  $V_{as}$  nese, je poddajnost závěsu reproduktoru. Reprodukter s nižší hodnotou  $V_{as}$  je osazen méně poddajnými závěsy nežli reproduktory s hodnotami vyššími.[4]

### 3.5.5 Maximální lineární výchylka

Maximální lineární výchylka  $\pm X_{max}$  pojednává o nejvyšším možném vychýlení kmitací cívky z klidové polohy. Překročení parametru  $X_{max}$  má za následek zvýšení nelineárního zkreslení. Parametr  $X_{max}$  je možné určit dle způsobu provedení reproduktoru. Pokud kmitací cívka překročí hranice pólových nástavců, tak se  $X_{max}$  určí z rozměrů cívky a pólových nástavců. Druhým případem je vychýlení membrány takovým způsobem, že závěsy membrány se již nepohybují lineárně.[4] [16]

Příčinou limitace lineární výchylky kmitací cívky je magnetické pole magnetu, které je do jisté míry homogenní pouze v šíři vzduchové mezery. Výchylka cívky v homogenním magnetickém poli je lineární, avšak při překročení  $X_{max}$ , část kmitací cívky již v magnetickém poli není. Takto popsané překročení výchylky kmitací cívky má za následek změny konstanty  $Bl$ , kdy se aktivní délka vodiče zmenší (část cívky již není v magnetickém poli). Z toho vyplývá, že  $Bl$  je možné prohlásit za konstantu pouze vně širě pólových nástavců. Avšak tato definice platí v případě, kdy závěsy membrány dovolí výchylku mimo vzduchovou mezeru magnetického obvodu.

Elektrodynamický systém je kategorizován dle využitého způsobu kmitací cívky. Existují dva způsoby umístění cívky, prvním způsobem je overhung a druhým underhung (obr.13.12). Terminologie vychází z anglického jazyka, kde elektrodynamický systém s cívkou overhung je specifikován větší výškou kmitací cívky než výškou vzduchové mezery. Underhung je přesným opakem overhung. Oba způsoby elektrodynamického systému mají za úkol udržet lineární vychylování kmitacího systému, avšak každý způsob má své klady i zápory. Při překročení  $X_{max}$  je kmitací systém v provedení underhung značně nelineární. Overhung má po překročení  $X_{max}$  menší nelinearitu výchylek, avšak větší počet závitů (větší hmotnost) nepříznivě ovlivní citlivost.[16]



**Obr. 3.12:** Způsoby udržení lineárních výchylek kmitacího systému pomocí velikosti kmitací cívky [Převzato s úpravami z [16]]

Maximální lineární výchylka  $X_{max}$  je dána také závěsy membrány. V případě ošetření nadměrného vychýlení cívky se nelinearita projeví překročením jisté hodnoty výchylky závěsů. Ovšem není vyloučena kombinace obou případů a  $X_{max}$  je dána nejmenší hodnotou, která způsobí nelinearitu systému vlivem nadměrného vychýlení kmitacího systému. [4]

Vyzářený akustický výkon má souvislost s efektivní hodnotou lineární výchylky  $X$ . Akustický výkon v závislosti na lineární výchylce je dán vztahem 3.29. [4]

$$P_a = 0,859 \cdot S_d^2 X f^4 \quad [W] \quad (3.29)$$

kde:

$S_d$	Ekvivalentní plocha membrány [ $m^2$ ]
$X$	Efektivní hodnota lineární výchylky membrány [ $m$ ]
$f$	Aktuální kmitočet [ $Hz$ ]

Tento vztah je platný pro kmitočty  $f > f_s$  a říká, že pro danou výchylku  $X$  je akustický výkon  $P_a$  úměrný aktivní ploše membrány  $S_d$  a kmitočtu  $f$ . Avšak je možné tento vztah interpretovat tak, že pro daný akustický výkon  $P_a$  a plochu membrány  $S_d$  je výchylka úměrná kmitočtu  $f$  tzn., že s rostoucím kmitočtem výchylka klesá a je možné pozorovat překročení  $X_{max}$  v oblasti nízkých kmitočtů. [4]

### 3.5.6 Jmenovitá energetická účinnost

Účinnost  $\eta$  je obecně definována poměrem mezi výkonem a příkonem systému. V případě reproduktoru je to poměr mezi akustickým výkonem  $P_a$  a celkovým elektrickému příkonem  $P_{zd}$ . Kapitola 2.2 pojednává o návrhu konstrukčních prvků reproduktorů tak, aby odolali vysokým teplotám vlivem ztrát elektrických i mechanických. S pojmem ztráty je spjatá účinnost, kdy veškeré ztráty systému vyjadřuje již zmíněný poměr mezi výkonem a příkonem. Účinnost udává informaci o množství energie, kterou systém spotřeboval k

vykonání práce. Vztah 3.30 udává obecné vyjádření účinnosti reproduktoru.[4]

$$\eta_{rep} = \frac{P_a}{P_{zd}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.30)$$

kde:

$P_a$	Akustický výkon reproduktoru [W]
$P_{zd}$	Příkon dodaný ze zdroje signálu [VA]

Akustický výkon  $P_a$  je dán vztahem 3.31. Pro běžné výpočty je  $\varphi = 1$  tzn., že jsou ve fázi.[4]

$$P_a = \frac{Sp^2}{c_0\rho_v} \cos(\varphi) \quad [W] \quad (3.31)$$

kde:

$S$	Ozařovaná plocha [ $m^2$ ]
$p$	Akustický tlak [Pa]
$\rho_v$	Měrná hmotnost vzduchu [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
$\varphi$	Fázový posuv mezi vektory akustického tlaku a rychlostí zvuku [Pa]

Akustický výkon  $P_a$  vyjádřen pomocí hladiny tlaku  $L_p$  a vyzařované plochy  $S$  je dán vztahem 3.32. Při výpočtu akustického výkonu je velmi důležité znát směrový charakter reproduktoru, jež definuje ozařovanou plochu.[4]

$$P_a = SP_0 \cdot 10 \frac{L_p}{10} \quad [W] \quad (3.32)$$

kde:

$S$	Ozařovaná plocha [ $m^2$ ]
$P_0$	Referenční akustický výkon $P_0 = 1pW$
$L_p$	Hladina akustického tlaku [dB]

Elektrický příkon je dán vztahem 3.33.

$$P_{zd} = UI \quad [VA] \quad (3.33)$$

kde:

$U$	Napětí na svorkách reproduktoru [V]
$I$	Proud procházející kmitací cívkou [A]

Jmenovitá energetická účinnost  $\eta_o$  je dána vztahem 3.34.

$$\eta_o = 9,87 \cdot 10^{-7} V_{as} \frac{f_s^3}{Q_{es}} \quad [-] \quad (3.34)$$

kde:

$V_{as}$	Ekvivalentní objem [ $m^3$ ]
$f_s$	Rezonanční kmitočet reproduktoru [ $Hz$ ]
$Q_{es}$	Elektrický činitel jakosti [-]

Takto definovaná účinnost  $\eta_o$  je platná pro dostatečně nízký kmitočet a za předpokladu izotropního vyzařování (ve všech směrech stejný ak. tlak). Vlivem zvyšujícího kmitočtu se směrovost reproduktoru v ose zvýší a tím se účinnost mimo osu potlačí, zatímco účinnost v ose vzroste. [4]

Účinnost reproduktoru je velmi malá, přibližně 1-5 %. Takto nízká účinnost je dána velikostí činné složky impedance, která se promění v teplo. Z toho také vyplývá již zmíněný návrh reproduktoru k efektivnímu odvodu tepla.

### 3.5.7 Charakteristická citlivost

Charakteristická citlivost  $L_s$  je průměrná úroveň hladiny akustického tlaku v ose reproduktoru měřené při 1 m a příkonu 1 VA. Odečítá se z amplitudové kmitočtové charakteristiky v určeném kmitočtovém rozsahu. Takto je definována normou ČSN EN 60268-5. Charakteristická citlivost tedy není jednoznačně dána, jelikož závisí na určeném kmitočtovém rozsahu a tudíž rozšířením frekvenčního rozsahu k vyšším kmitočetům se vlivem směrovosti citlivost navýší. [4] [8]

Pokud je reproduktor měřen jinak, než-li udává norma, lze charakteristickou citlivost určit dle vztahu 3.35. [1]

$$L_s = 20 \log\left(\frac{S_n}{p_0}\right) \quad [dB] \quad (3.35)$$

kde:

$S_n$	Ak. tlak odpovídající tlaku charakteristické citlivosti [ $Pa$ ]
$p_0$	Referenční hodnota ak. tlaku [ $m$ ]

$$S_n = \frac{p_s l \sqrt{Z_{nom}}}{u} \quad [Pa] \quad (3.36)$$

kde:

$p_s$	Průměrný ak. tlak v definovaném pásmu kmitočetů [ $Pa$ ]
$l$	Vzdálenost měřícího mikrofону od reproduktoru [ $m$ ]
$Z_{nom}$	Nominální impedance reproduktoru [ $\Omega$ ]
$u$	Napětí na svorkách reproduktoru [ $V$ ]

Charakteristickou citlivost  $L_s$  je možné odhadnout pomocí jmenovité energetické účinnosti  $\eta_o$ . Charakteristická citlivost  $L_s$  pomocí  $\eta_o$  je dána vztahem 3.37 .

$$L_s = 112,2 + 10 \log \eta_o \quad [dB] \quad (3.37)$$

kde:

$$\eta_o \quad \text{Jmenovitá energetická účinnost [-]}$$

Takto definovaný odhad charakteristické citlivosti je platný pro dostatečně nízké kmitočty, kde reproduktor vyzařuje do poloprostoru. Hodnota charakteristické citlivosti  $L_s$  se může lišit o jednotky dB oproti charakteristické citlivosti vyjádřené z frekvenční charakteristiky. Z tohoto důvodu se jedná o odhad.[4]

V souvislosti s charakteristickou citlivostí  $L_s$  byl zmíněn pojem poloprostor. V akustice je velký rozdíl, zda reproduktor vyzařuje do prostoru, poloprostoru či čtvrtprostoru. Prostor je definován tak, že se zvuk může šířit ze zdroje ve všech směrech. Poloprostor je prostor rozdělený jednou rovinou. Čtvrtprostor je doplněn o rovinu kolmou k rovině poloprostoru.[4][15]

Umístění zdroje ak. tlaku do prostoru, poloprostoru atd. má význam při definici citlivosti. V prostoru je relativní úroveň ak. tlaku 0 dB, v poloprostoru je relativní úroveň ak. tlaku 6 dB a ve čtvrtprostoru je relativní úroveň ak. tlaku 12 dB. Tyto změny jsou dány odrazy zvukových vln od roviny prostoru, kdy se vlivem fázového posuvu odražené vlny zvýší ak. tlak. Takto definované prostory mají význam zejména na nízkých kmitočtech, kdy zdroj ak. tlaku vyzařuje izotropně. Příkladem je subwoofer, který změnou umístění ze středu místnosti do rohu nabude 6 dB na citlivosti.

### 3.6 Maximální dlouhodobý standardizovaný příkon

Jmenovitý příkon reproduktoru je parametr, který sebou přináší poněkud mlhavé informace. Některé parametry příkonů reproduktoru jsou zcela fiktivní a slouží pouze ke komerčním účelům. K posouzení reproduktorů dle příkonu je nutné prostudovat katalogové listy, kde by měl být uveden dodržovaný standard při měření daných příkonů.[4]

K měření MDSP se užívá např. standard dle IEC 268-5, kterým je definován standardní měřicí signál. Tímto signálem jsou simulovány běžné podmínky, kterým je reproduktor vystaven. Standardní testovací doby jsou stanoveny na 100,80 nebo 8h přerušovaného provozu. Reproduktor v průběhu celého testovacího intervalu nesmí jevit známky mechanického či elektrického poškození, překročit teplotní limit kmitací cívky atd. Vlivem tepelné komprese nesmí citlivost reproduktoru poklesnout o více než 1 dB. Dále je sledována výchylka membrány, která nesmí přesáhnout limitní hodnotu. Výrobce garantovaný MDSP měřený dle standardu IEC 268-5 udává maximální příkon, kterým je možné reproduktor trvale napájet při běžném provozu. Jednotky MDSP dle standardu IEC 268-5 jsou udány ve tvaru  $W_{RMS}$ . [4]

Katalogové listy osahují mimo MDSP také další maximální příkony, které jsou dány označovány jednotkami  $W_{max}$  a  $W_{sin}$ . Příkon označený jednotkou  $W_{max}$  vypovídá o maximálním příkonu, kterým je možné zařízení napájet po dobu jednotek ms. Reprodukter v takto krátkém časovém intervalu není namáhán tepelně, ale pouze mechanicky. Tento parametr je do značné míry zavádějící, jelikož zkrácením intervalu testovaného impulsu a zvětšením periody signálu lze dosáhnout enormních hodnot. Výsledkem takového měření je např. parametr p.m.p.o, který je pouze komerční.[4]

Příkon označený jednotkou  $W_{sin}$  vypovídá o maximálním příkonu, kterým je možné budít reproduktor harmonickým signálem. Užitečným parametrem se stává v případě, kdy je reproduktor podroben testovacím signálům.[4]

Některé maximální výkony jsou měřeny se zařazenými filtry mezi reproduktor a generátor, takové měření navýší hodnotu výkonu oproti skutečnosti. Avšak při konstrukci reprosoustavy, kde je nezbytné rozdělit kmitočtová pásma reproduktorů pomocí výhybek, nese tento parametr užitečnou informaci.[4]

### 3.7 Zkreslení

Zkreslení přímovyzářujícího elektrodynamického reproduktoru je v jednotkách až desítkách % a je způsobeno vlivem nelineárního chování reproduktoru. Z předchozích kapitol je patrné, že lineární chování reproduktoru je pouze v určitých mezích, které jsou stanovené konstrukcí a technologií výroby. Mezi hlavní příčiny nelinearit patří:

- Mechanické omezení závěsu
- Nehomogenní rozložení mg. pole ve vzduchové mezeře
- Modulace magnetického pole magnetu s magnetickým polem kmitací cívky
- Vířivé proudy v magnetickém obvodu
- Turbulentní proudění vzduchu [4]

Hlavním představitelem nelineárního chování reproduktoru je harmonické zkreslení, které je pozorovatelné při vybuzení reproduktoru harmonickým signálem, tzn. jedním tónem. Vliv nelinearity reproduktoru se projeví superpozicí vyšších harmonických na původní signál. Harmonické zkreslení je možné pozorovat ve spektrální rovině, kde jsou mimo první harmonickou složku signálu viditelné také vyšší harmonické. Úrovně vyšších harmonických signálů jsou nižší, než úroveň první harmonické složky. Takto popsané zkreslení je v mnoha případech vyjádřeno pomocí činitele zkreslení *THD*. *THD* je definováno poměrem výkonů všech vyšších harmonických produktů zkreslení a výkonu první harmonické složky. Požadavky reproduktoru na *THD* jsou dány konkrétní aplikací, ve které bude reproduktor provozován. Avšak čím menší zkreslení, tím je reproduktor kvalitnější a výsledný akustický vjem čistší.



Dalším parametrem je intermodulační zkreslení, které je označováno zkratkou *IMD*. Tímto parametrem je reprezentováno zkreslení standardního poslechového signálu. Vlivem nelinearity vzniká modulace podobná AM modulaci. V okolí kmitočtově vyššího signálu vznikají produkty zkreslení, jejichž kmitočet je dán součtem a rozdílem vzájemně modulovaných složek. K měření se využívá dvou harmonických tónů s dostatečným kmitočtovým a amplitudovým rozestupem. Součet výkonů modulovaných produktů zkreslení je dán do poměru s výkonem vyššího tónu. Tímto poměrem je definován činitel zkreslení *IMD*. Za zmínku stojí také zkreslení přechodové a zkreslení subharmonickými tóny.

# 4

## Metodika měření reproduktorů

### 4.1 Podmínky měření

Měření přenosových vlastností reproduktorů přináší mnoho úskalí, kterým je potřeba předejít např. odrazy, šumové pozadí atd. K měření akustických vlastností samostatného reproduktoru např. amplitudovou kmitočtovou charakteristiku je zapotřebí prostoru, ve kterém nevznikají odrazy tzv. volný prostor. Volný prostor je ovšem problém, jelikož je měření ve volném prostoru náročné na rozměry. Z tohoto důvodu se nejčastěji provádějí měření v bezodrazové komoře nebo pomocí speciálních metod měření v místnosti. [1]

#### Bezodrazová komora

Kvalitních výsledků je možné dosáhnout měřením v bezodrazové komoře, která svými vlastnostmi eliminuje odrazy. Interference v bezodrazové komoře však nejsou potlačeny na minimum, tzn. že bezodrazová komora netlumí ideálně. Podmínka, kterou musí bezodrazová komora splnit je taková, že naměřené hodnoty nesmí poklesnout o 1 dB oproti měření ve volném prostoru. Rozměry bezodrazové komory udávají spodní kmitočet, který je v takové komoře naměřen korektně. Měření se provádí způsoby, které jsou popsány v kapitolách 4.2, 4.3, 4.6.[1]

#### Měření v místnosti

Při absenci bezodrazové komory je možné měřit přenosové vlastnosti reproduktoru pomocí metody impulsní odezvy, která využívá MLS sekvence. MLS sekvence je digitálně generovaná pseudonáhodná šumová sekvence. Každá kombinace bitů se v jednom cyklu MLS sekvence objeví pouze jednou a při průchodu takového signálu reproduktorem se provede korelace mezi vstupním a výstupním signálem. Výsledkem korelace je impulsní odezva reproduktoru. Výhodou této metody je možnost měřit reproduktor v prostředí s odrazy.[5]

Odrazy je možné eliminovat při snímání impulsní odezvy reproduktoru, kdy je nastá-

veno časové okno, ve kterém je prováděno měření reproduktoru. Princip tkví ve vzdálenosti měřicího mikrofону od reproduktoru a vzdálenosti od prvního dominantního odrazu (např. zdi). Časové okno se nastaví pouze na dobu, kdy zvukové vlny doputují od reproduktoru k měřicímu mikrofону. Výsledek je platný pouze pro kmitočty, jejichž perioda je menší než doba časového okna, tzn. doba časového okna určí spodní mezní korektní kmitočty.[5]

### Měření v blízkém akustickém poli

Pokud není k dispozici žádná z uvedených metod je možné měřit reproduktor v blízkém akustickém poli, kdy je měřicí mikrofón umístěn bezprostředně před membránou. Výsledky takového měření eliminují odrazy, ale jsou zkreslené pokud nejsou provedeny dobře. Tato metoda je složitější na proveditelnost.

### Měřicí zařízení

Měřicí mikrofón, kterým je snímán akustický tlak reproduktoru nesmí výsledky měření ovlivnit. Takový mikrofón musí být kalibrován pro měřicí účely. Signálový generátor, zesilovač a mikrofón musí mít dostatečně vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku, kdy zvlnění nepřesáhne toleranční pásmo  $\pm 0,5dB$ . Veškerá měřicí technika nesmí měnit své parametry s časem, kdy maximální chyba časovou nestálostí nesmí být větší než  $\pm 1dB$ . Měřicí technika musí podporovat měření R.M.S.[8]

### Umístění reproduktoru

Reproduktor je možné umístit :

- a) Bez ozvučnice.
- b) V nekonečné ozvučnici.
- c) V standardní ozvučnici.
- d) Do ozvučnice, ve které bude reproduktor provozován.

Varianta a) ukáže pouze vady samotného reproduktoru. Varianta b) je nejvhodnějším způsobem umístění reproduktoru. V nekonečné ozvučnici nedochází k akustickému zkratu, avšak nekonečná ozvučnice v pravém smyslu neexistuje. Je možné reproduktor zabudovat do země, kdy vyznačuje kolmo k povrchu země nebo namísto okna dostatečně velké budovy. Varianta c) je nejvíce využívanou v bezodrazové komoře. Rozměry standardní ozvučnice jsou dány v [8]. Varianta d) je vhodná při zkoumání reproduktoru v ozvučnici nebo vlivu ozvučnice na parametry.

## 4.2 Amplitudová kmitočtová charakteristika

Měření ampl. kmitočtové charakteristiky se provádí při konstantním příkonu reproduktoru, pro který je vykreslen graf. Měří se pro celé slyšitelné pásmo od  $20\text{Hz}$  -  $22\text{kHz}$ . Avšak není vyloučené měřit ampl. kmitočtovou charakteristiku pro jiná pásma, např. basový reproduktor měřený pouze na spodních kmitočtech. Podmínkou je dobře viditelné celé kmitočtové pásmo. Více podrobností o ampl. kmitočtové charakteristice je v kapitole 3.2.[8]

Způsobů měření kmitočtových amplitudových charakteristik je několik. Mezi nejrozšířenější způsoby patří měření pomocí šumových signálů, které obsahují v určitém rozmezí kmitočtů všechny spektrální složky. Další možností měření je rozmítaný sinusový signál.

### Měření bílým šumem

Měření pomocí bílého šumu, který má po celé šířce pásma konstantní výkon, tzn. že stejně široké úseky v celém pásmu mají stejný výkon. [5]

Do reproduktoru je ze signálového generátoru vyslán šumový signál odpovídající parametrům bílého šumu. Měřicí mikrofon snímá akustický výstup reproduktoru. K zpracování signálů před vstupem do analyzátoru nedochází a analýza je provedena pro celé pásmo. Nejčastěji se využívá FFT analýzy.[8]



**Obr. 4.1:** Měřicí řetězec amplitudové kmitočtové charakteristiky pomocí bílého šumu

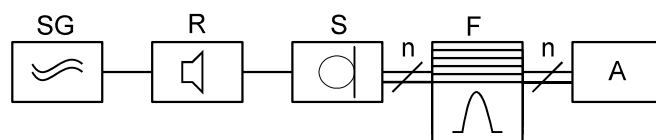
Legenda:

SG	Signálový generátor
R	Reproduktor
S	Snímač akustického tlaku
A	Analyzátor signálů

### Měření růžovým šumem

Měření pomocí růžového šumu, který má v logaritmickém měřítku lineárně rozložené spektrum, tzn. že v každé oktávě je rozložený stejný výkon. Spektrální rozložení růžového šumu je  $\frac{1}{f}$ . [5]

Do reproduktoru je ze signálového generátoru vyslán šumový signál odpovídající parametrům růžového šumu ve stanoveném kmitočtovém pásmu. Měřicí mikrofon snímá akustický výstup reproduktoru, který je pomocí pásmových filtrů rozdělen na 1/3 oktávová pásma. Každé 1/3 pásmo je analyzováno a vyneseno do grafů. K takovému měření je potřeba dostatečný počet přesných pásmových filtrů.[8]



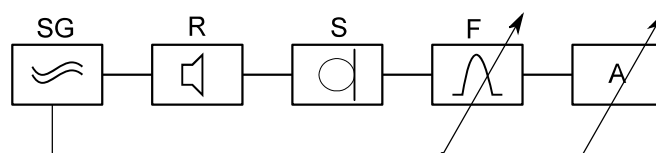
**Obr. 4.2:** Měřicí řetězec amplitudové kmitočtové charakteristiky pomocí růžového šumu

Legenda:

SG	Signálový generátor
R	Reproduktor
S	Snímač akustického tlaku
A	Analyzátor signálů
F	1/3 oktávové pásmové filtry

### Měření rozmítaným sinusovým signálem

K měření rozmítaným sinusovým signálem je zapotřebí laditelného pásmového filtru, který se zavěsí na signálový generátor. Princip měření je podobný ostatním zmíněným měřením s tím rozdílem, že analyzátozem je vykreslena signálová úroveň bez matematické analýzy.



**Obr. 4.3:** Měřicí řetězec amplitudové kmitočtové charakteristiky pomocí rozmítaného sinusového signálu

Legenda:

SG	Signálový generátor
R	Reproduktor
S	Snímač akustického tlaku
A	Analyzátor signálů
F	Laditelný pásmový filtr

## 4.3 Směrová charakteristika

Směrová charakteristika zobrazuje závislost ak. tlaku na úhlu odklonění od referenční osy a frekvenci signálu. Více podrobností o směrové charakteristice v kapitole 3.3.[8]

Reproduktor je umístěn do volného prostoru a mikrofon do specifikované roviny v prostoru, pro kterou bude prováděno měření. Umístěním mikrofonu je definován referenční bod měření.[8]

Testovacími signály jsou buď harmonické tóny (sinusový signál) nebo šumový signál v měřeném pásmu. Vstupní napětí reproduktoru je potřeba nastavit tak, aby pro každý harmonický tón nebo pásmo šumového signálu byl akustický tlak v referenčním bodě konstantní.[8]

Kmitočtová pásma, na kterých je prováděno měření jsou dány po 1/3 oktávy nebo po oktávě. V případě sinusového signálu je dán kmitočet středním kmitočtem 1/3 oktávových pásem nebo středním kmitočtem jedno-oktávových pásem. Reproduktoř by měl být měřen alespoň pro kmitočty  $500Hz$ ,  $1kHz$ ,  $4kHz$  a  $8kHz$ . Pokud jsou měřené kmitočty mimo kmitočtový rozsah reproduktoru, tak je možné zvolit jiné hodnoty. [8]

Měření směrových charakteristik probíhá v předem stanovených úhlech vychýlení reproduktoru resp. mikrofonu od referenčního bodu. Vzdálenost mezi mikrofonem a reproduktorem je zachována po celou dobu měření.

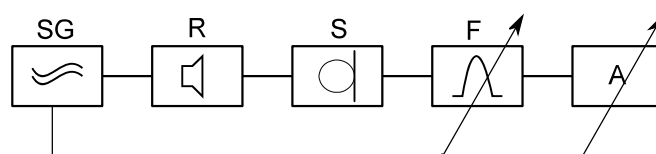
### Měření šumovými signály

Metody měření směrových charakteristik šumovými signály jsou shodné s metodami popsanými v kapitole 4.2.

### Měření sinusovým signálem

Do reproduktoru je ze signálového generátoru vyslán jediný tón na stanoveném kmitočtu. Měřicí mikrofon snímá akustický výstup reproduktoru a laditelný pásmový filtr, který je zavěšen na výstup generátoru signálu filtruje pouze aktuální kmitočet. Analyzátořem je vykreslena úroveň signálu.

Směrové charakteristiky je možné měřit také pomocí multitónového signálu, který obsahuje více harmonických složek stejné amplitudy. K tomuto měření je potřeba stejného počtu pásmových filtrů jako generovaných tónů. Analyzátoř zpracuje každý tón odděleně.



**Obr. 4.4:** Měřicí řetězec směrové charakteristiky pomocí sinusového signálu

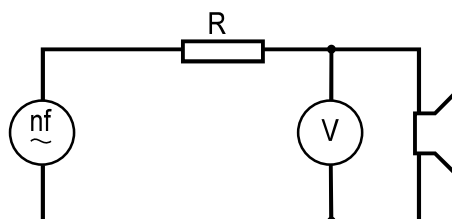
Legenda:

SG	Signálový generátor
R	Reproduktor
S	Snímač akustického tlaku
A	Analyzátoř signálů
F	Laditelný pásmový filtr

## 4.4 Impedanční charakteristika a činitele jakosti

### Impedanční charakteristika

Měření impedanční charakteristiky není tolik náročné oproti akustickému měření. V tomto případě je pro nejzákladnější měření potřeba nf generátor, voltmetr či multimetr a rezistor. Je možné měřit impedanční charakteristiku všemi způsoby, kterými se impedance měřit dá. Výsledkem je frekvenční charakteristika, která je podrobněji popsána v kapitole 3.5.2. Základní schema měření impedanční charakteristiky je dáno obrázkem 4.5.



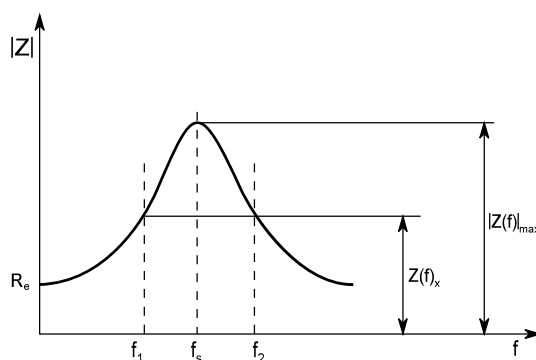
**Obr. 4.5:** Základní schéma měření impedanční charakteristiky |Převzato s úpravami z [6]|

Reproduktor je potřeba umístit na podložku, kterou je zajištěna izolace proti vibracím okolního prostředí. Krátce před samotným měřením je vhodné reproduktor dostat do podmínek, ve kterých je běžně provozován, tzn. zahřát jej na provozní teplotu. Takto připravený reproduktor je možné měřit a výsledky měření nebudou zkresleny. [8]

Úroveň měřicího signálu musí být zvolena tak, aby bylo dodrženo lineární chování reproduktoru. Dále je měření impedance závislé na velikosti úrovně signálu, tzn. že velmi nízká nebo vysoká úroveň vstupního signálu zanáší do měření chyby. Impedanční charakteristika by měla být měřena alespoň v rozsahu  $20Hz - 20kHz$ . [8]

### Činitele jakosti $Q_{es}$ , $Q_{ms}$ a $Q_{ts}$

Činitel jakosti je možné vypočítat z naměřené impedanční charakteristiky. K výpočtu činitelů jakosti je nutné z impedanční charakteristiky vypočítat rezonanční kmitočet  $f_s$  a kmitočty  $f_1$ ,  $f_2$ , které jsou znázorněny na obrázku 4.6.[4][8]



**Obr. 4.6:** Výpočet činitelů jakosti  $Q_{es}$ ,  $Q_{ms}$  a  $Q_{ts}$  z impedanční charakteristiky |Převzato s úpravami z [8]|

K determinaci kmitočtů  $f_1$ ,  $f_2$  a  $f_s$  je nutné využít graficko-početní metodu, kdy se vypočte  $Z(f)_x$  a z impedanční charakteristiky se odečtou kmitočty  $f_1$  a  $f_2$ .  $Z(f)_x$  je dán vztahem 4.2.

$$R_0 = \frac{Z(f)_{max}}{R_e} \quad [\Omega] \quad (4.1)$$

kde:

$Z(f)_{max}$	Maximální hodnota modulu impedance při rezonanční frekvenci $[\Omega]$
$R_e$	Činný odpor kmitací cívky $[\Omega]$

$$Z(f)_x = R_e \sqrt{R_0} \quad [\Omega] \quad (4.2)$$

Z takto získaných kmitočtů  $f_1$  a  $f_2$  je možné získat rezonanční kmitočet  $f_s$ , který je dán vztahem 4.3.

$$f_s \approx \sqrt{f_1 f_2} \quad [Hz] \quad (4.3)$$

Vztahem 4.4 je dán mechanický činitel jakosti  $Q_{ms}$ .

$$Q_{ms} = f_s \frac{\sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} \quad [-] \quad (4.4)$$

Vztahem 5.12 je dán elektrický činitel jakosti  $Q_{es}$ .

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{R_0 - 1} \quad [-] \quad (4.5)$$

Celkový činitel jakosti  $Q_{ts}$  je dán vztahem 3.25. [4] [8]

## 4.5 Ekvivalentní objem, poddajnost, Bl faktor, jmenovitá energetická účinnost, charakteristická citlivost

Princip měření ekvivalentního objemu  $V_{as}$  a tudíž i poddajnosti kmitacího systému  $c_{ms}$  a dalších TS parametrů spočívá v zatížení mechanické části reproduktoru. Z matematického pohledu se jedná o soustavu dvou rovnic, kdy první rovnice popisuje reproduktor nezatížený a druhá rovnice reproduktor zatížený. Z této úvahy vychází dvě níže popsané metody měření ekvivalentního objemu  $V_{as}$ . [4]

### Metoda vestavění reproduktoru do ozvučnice

Jedním ze způsobů zatížení je umístění reproduktoru do uzavřené ozvučnice s čistým objemem  $V_b$ . Ozvučnice musí být dobře utěsněna a odpovídat geometricky ozvučnici, ve které bude reproduktor provozován. [4] [8]



Prvním krokem je změření impedanční charakteristiky samotného reproduktoru a výpočet  $Q_{es}$ ,  $Q_{ms}$ ,  $Q_{ts}$  a  $f_s$  postupem popsáním v kapitole 4.4. Stejným způsobem se následně změří reproduktor v uzavřené ozvučnici s objemem  $V_b$  a provede se výpočet  $Q'_{es}$ ,  $Q'_{ms}$ ,  $Q'_{ts}$  a  $f'_s$ . K docílení relativně přesných výsledků je požadováno, aby se rezonanční kmitočty posunul v rozsahu 20% - 50%. [4] [8]

Z hodnot získaných měření se následně vypočítá ekvivalentní objem  $V_{as}$  dle vztahu 4.6.

$$V_{as} = \frac{V_b}{\frac{f'_s Q'_{ts}}{f_s Q_{ts}} - 1} \quad [m^3] \quad (4.6)$$

kde:

$V_b$	Vnitřní objem ozvučnice, ve které je reproduktor měřen $[m^3]$
$f_s$	Rezonanční kmitočty reproduktoru bez ozvučnice $[Hz]$
$Q_{ts}$	Celkový činitel jakosti reproduktoru bez ozvučnice $[-]$
$f'_s$	Rezonanční kmitočty reproduktoru s ozvučnicí $[Hz]$
$Q'_{ts}$	Celkový činitel jakosti reproduktoru s ozvučnicí $[-]$

Poddajnost  $c_{ms}$  je určena z aktivní plochy membrány  $S_d$  a ekvivalentního objemu  $V_{as}$  dle vztahu 4.7.

$$c_{ms} = \frac{V_{as}}{1,4 \cdot 10^5 S_d^2} \quad \left[\frac{m}{N}\right] \quad (4.7)$$

Hmotnost kmitacího systému včetně spolukmitajícího vzduchu je dána vztahem 4.8.

$$m_{ms} = \frac{1}{c_{ms} 4\pi^2 f_s^2} \quad \left[\frac{m}{N}\right] \quad (4.8)$$

Odpor kmitacího systému včetně odporu vzduchu je dán vztahem 4.9

$$r_{ms} = 2\pi f_s \frac{m_{ms}}{Q_{ms}} \quad \left[\frac{Ns}{m}\right] \quad (4.9)$$

$Bl$  faktor je dán vztahem 4.10.

$$Bl = \sqrt{2\pi f_s \frac{m_{ms} R_e}{Q_{es}}} \quad \left[\frac{T}{m}\right] \quad (4.10)$$

Akustická poddajnost kmitacího systému  $c_a$  je vyjádřena vztahem 4.11.

$$c_a = \frac{V_{as}}{c_0^2 \rho_v} \quad \left[\frac{m^5}{N}\right] \quad (4.11)$$

kde:

$c_0$	Rychlost zvuku $\left[\frac{m}{s}\right]$
$\rho_v$	Měrná hmotnost vzduchu $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Účinnost reproduktoru je dána vztahem 4.12 a charakteristická citlivost vztahem 3.37.[4]  
[8]

$$\eta_0 = 9,78 \cdot 10^{-7} V_{as} \frac{f_s^3}{Q_{es}} \quad [-] \quad (4.12)$$

### Metoda přidání hmotnosti

Principem této metody je zatížení kmitacího systému reproduktoru pomocí externí hmotnosti. Závaží je umístěno kolem prachovky a hmotnost  $m$  by se měla pohybovat okolo 20-30  $g$ . Postup měření je velice podobný metodě vestavění reproduktoru do ozvučnice, kdy se změří hodnoty  $Q_{es}$ ,  $Q_{ms}$ ,  $Q_{ts}$  a  $f_s$  samostatného reproduktoru a poté hodnotu rezonančního kmitočtu  $f'_s$  se závažím.[4]

Poddajnost  $c_{ms}$  se určí ze vztahu 4.13

$$c_{ms} = \frac{1}{4\pi^2 m} \frac{(f_s + f'_s) \cdot (f_s - f'_s)}{(f_s f'_s)^2} \quad \left[ \frac{m}{N} \right] \quad (4.13)$$

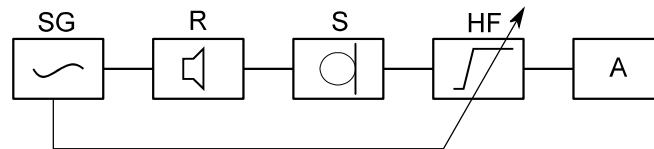
Ekvivalentní objem  $V_{as}$  je dán vztahem 3.26, kde se do výpočtu dosadí  $c_{ms}$  ze vztahu 4.13. Hmotnost kmitacího systému včetně spolukmitajícího vzduchu  $m_{ms}$  je dána vztahem 4.8. Odpor kmitacího systému včetně odporu vzduchu  $r_{ms}$  se vypočítá vztahem 4.9.  $Bl$  faktor je dán vztahem 4.10. Akustická poddajnost  $c_a$  je vyjádřena vztahem 4.11 a účinnost reproduktoru  $\eta_0$  vztahem 4.12. Tyto vztahy jsou shodné pro obě metody. Hodnoty, které jsou dosazeny do těchto vztahů musí být změřeny pouze jedinou metodou.

## 4.6 Nelineární zkreslení

### 4.6.1 THD

Měření *THD* reproduktoru je prováděno řadou kmitočtově se zvyšujících sinusových signálů až do  $5kHz$ . Je možné signál rozmítat nebo použít metodu step-by-step, avšak při použití této metody není měření dostatečně přesné. Napětí reproduktoru nesmí překročit takovou hodnotu, při které by se projevilo v průběhu měření zkreslení od zesilovačů (clipping) atp. Měřicí mikrofon musí být umístěn ve vzdálenosti  $1m$  od reproduktoru, pokud není specifikováno jinak. Všechny údaje o způsobu měření musí být uvedeny spolu s výsledky měření. [8]

Měřicí smyčka je znázorněna na obrázku 4.7, kde je signálový generátor zdrojem jednotlivých tónů. Vlivem nelineárního chování reproduktoru vzniká zkreslení vyššími harmonickými. Snímač akustického tlaku zachytí celý průběh a filtr typu horní propust, který je zavěšen na generátor a propustí pouze signál s kmitočtem  $f \geq f_{1h}$ . Analyzátozem je vyhodnoceno spektrum signálu, který projde filtrem. Měřicí přístroj musí udávat efektivní hodnoty harmonických složek. [8]

Obr. 4.7: Řetězec pro měření  $THD$ 

Legenda:

SG	Signálový generátor
R	Reproduktor
S	Snímač akustického tlaku
A	Analyzátor signálů
HF	Laditelný filtr typu horní propust

Výpočet  $THD$  se provádí pomocí výkonů a je dán vztahem 4.14 pro metodu step-by-step.

$$THD = \frac{\sqrt{P_{2f}^2 + P_{3f}^2 + \dots + P_{nf}^2}}{P_{1f}} \quad [\%] \quad (4.14)$$

kde:

$P_{nf}$	Výkony vyšších harmonických složek signálu [W]
$P_{1f}$	Výkon první harmonické složky signálu [W]

Metodou rozmítaného signálu se uvádí průběh  $THD$  v  $dB$ . Úroveň  $THD$  je dána vztahem 4.15.[8]

$$L_{THD} = 20 \log \frac{THD}{100} \quad [dB] \quad (4.15)$$

$THD$  je možné měřit v závislosti na amplitudě nebo kmitočtu. V případě amplitudy je na každém měřeném kmitočtu zvyšována úroveň amplitudy vstupního signálu dokud  $THD$  nepřesáhne určenou hodnotu. Prakticky to znamená, že pokud se stanoví hodnota  $THD = 5\%$ , tak se zvyšuje amplituda dokud se této hodnoty  $THD$  nedosáhne. Poté se generátor přeladí na další kmitočet a zvyšování amplitudy se opakuje.

$THD$  v závislosti na kmitočtu se měří tak, že se nastaví konstantní úroveň vstupního signálu a kmitočet se zvyšuje. Výsledkem je křivka, která popisuje zkreslení reproduktoru na určité úrovni pro měřené pásmo.

#### 4.6.2 Intermodulační zkreslení

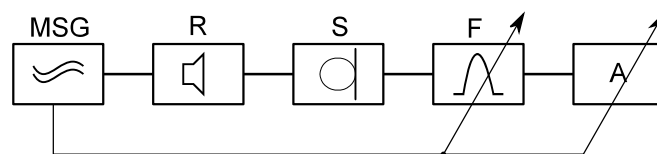
$IMD$  je měřeno pomocí dvou harmonických signálů, které jsou v poměru amplitud 4:1 a poměru kmitočtů alespoň  $f_1 < 8f_2$ . Takto definované signály se vlivem nelinearity signálu moduluje a v okolí signálu s vyšším kmitočtem jsou vytvořeny postranní modulační

produkty, jejichž výkon je měřen. Kmitočty modulovaných postranních produktů jsou :[8]

$$f_{IMD1} = f_2 - f_1 \quad [Hz] \quad (4.16)$$

$$f_{IMD2} = f_2 + f_1 \quad [Hz] \quad (4.17)$$

Měřicí smyčka pro *IMD* je znázorněna na obrázku 4.8, kde multitónový signálový generátor slouží jako zdroj. Reproduktorem je provedena modulace signálů a snímačem akustického tlaku je zachycen celý průběh včetně zkreslení v podobě modulačních produktů. Laditelný pásmový filtr je zavěšen na generátor a propouští pouze pásmo, ve kterém je složka s kmitočtem  $f_2$  a postranní produkty zkreslení. Synchronizace generátoru s analyzátozem zajistí informaci o právě měřeném kmitočtu.



**Obr. 4.8:** Řetězec pro měření *IMD*

Legenda:

MSG	Multitónový signálový generátor
R	Reproduktor
S	Snímač akustického tlaku
A	Analyzátor signálů
F	Laditelný pásmový filtr

Takto se měří produkty *IMD* prvního a druhého řádu. Výpočet *IMD* prvního řádu je dán vztahem 4.18

$$IMD_1 = \frac{P_{(f_2-f_1)} + P_{(f_2+f_1)}}{P_{f_2}} \quad [%] \quad (4.18)$$

$$L_{IMD1} = 20 \log \frac{IMD_1}{100} \quad [dB] \quad (4.19)$$

Zkreslení *IMD* druhého řádu je dáno vztahem 4.20.[8]

$$IMD_2 = \frac{P_{(f_2-2f_1)} + P_{(f_2+2f_1)}}{P_{f_2}} \quad [%] \quad (4.20)$$

$$L_{IMD2} = 20 \log \frac{IMD_2}{100} \quad [dB] \quad (4.21)$$

Výsledkem je grafická závislost *IMD* na frekvenci. Všechny údaje o způsobu měření musí být uvedeny spolu s výsledky měření.

## 5

# Měření kytarových reproduktorů

K vyhodnocení a následnému porovnání byli vybrány základní parametry, které vypovídají o akustických i mechanických vlastnostech reproduktoru. Měřené parametry jsou amplitudová kmitočtová charakteristika, směrová charakteristika, impedanční charakteristika, TS parametry a THD při  $1kHz$ .

Amplitudová kmitočtová charakteristika je základním parametrem, na který se hledí při výběru reproduktoru. Každý výrobce tuto charakteristiku uvádí, proto je zajímavé porovnat naměřenou ampl. kmitočtovou charakteristiku individuálního kusu vůči té, kterou udává výrobce. Společně se směrovou charakteristikou udává ampl. kmitočtová charakteristika základní akustické vlastnosti reproduktoru.

Impedanční charakteristika je také základní parametr, na kterém je dobře viditelný rezonanční kmitočet, nominální impedance a činný odpor kmitací cívky. Velikost rezonanční špičky nese informaci o magnetickém obvodu resp. při porovnání s reproduktory stejné třídy je možné odhadnout kvalitu magnetického obvodu.

Elektrická kytara pracuje v kmitočtovém pásmu přibližně od  $75Hz$  do  $5kHz$  a z tohoto důvodu by měli být kytarové reproduktory schopny vyzařovat alespoň v tomto pásmu. Kvůli schopnosti vyzařování nízkých kmitočtů je nutné navrhovat ozvučnice s dostatečným vnitřním objemem. K návrhu ozvučnice napomáhá znalost TS parametrů. Překvapením je, že v katalogových listech kytarových reproduktorů často tyto parametry schází. [7]

THD při  $1kHz$  je běžně uváděný parametr v katalogových listech. Zkreslení měřené pro více frekvencí nebylo měřeno z důvodu toho, že kytarový reproduktor je spíše nástroj, nežli zařízení pro věrnou reprodukci zvuku. Tudíž si kytaristé vybírají komba a reproboxy podle základních technických parametrů a osobních preferencí.

Měření výkonů nebylo provedeno kvůli způsobu měří těchto parametrů. Princip měření výkonů je ve stanovení hranic, které reproduktor musí vydržet, tzn. že taková měření reproduktor ve většině případů zničí.

Měření výchylek membrány nebylo provedeno kvůli náročnosti na měřící techniku. Západočeská univerzita disponuje takovouto technikou, ale její provoz je velice nákladný.

## 5.1 Kytarové reproduktory

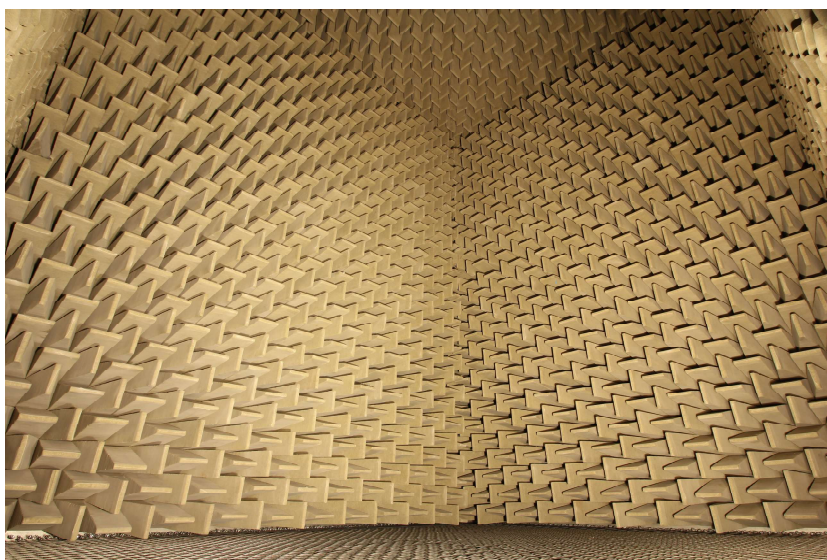
K měření bylo vybráno několik 12" kytarových reproduktorů, které se řadí mezi zástupce této třídy. Vybrány byly reproduktory Celestion Classic Vintage 30, Celestion Classic Lead 80, Eminence LEGEND 1218, Jensen p12R a HH Invader. V příloze F jsou uvedeny parametry, které jsou dány výrobcí. Tyto parametry byly převzaty z [17][18][19][20].

Reproduktor HH Invader byl vybrán kvůli porovnání s ostatními reproduktory. Jedná se o kytarový reproduktor, kterým jsou často osazovány aparáty značky Laney. Testovaný reproduktor má poškozenou membránu, a proto bude zajímavé pozorovat vliv membrány na parametry.

## 5.2 Prostředí měření

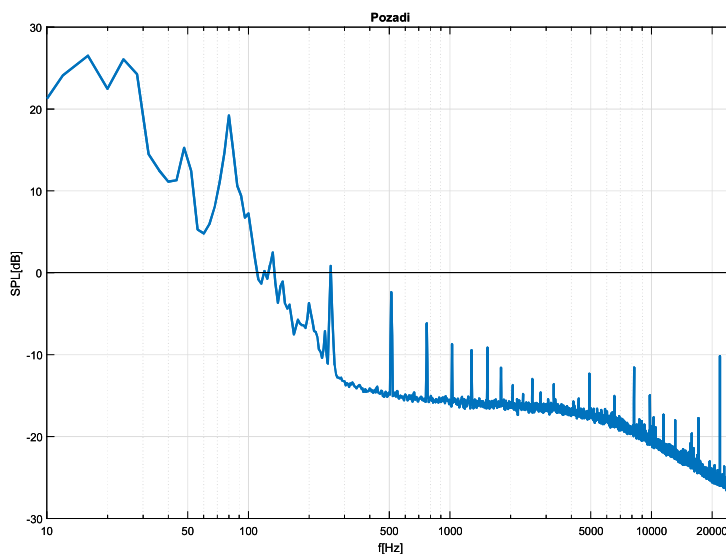
### Akustická měření

Akustická měření probíhala v bezodrazové komoře Západočeské univerzity FEL, jež účinně tlumí akustické odrazy a splňuje požadavky normy ČSN EN ISO 3745. Rozměry komory jsou 5 x 4,1 x 6,4 m a tlumicí obklad tvoří 5500 klínů z minerální vaty. Komora tlumí odrazy počínaje kmitočtem 100 Hz. Na obrázku 5.1 je možné vidět bezodrazovou komoru FEL.



**Obr. 5.1:** Bezodrazová komora Západočeské univerzity FEL

Na obrázku 5.2 je znázorněn graf, jež ukazuje informaci o šumovém pozadí bezodrazové komory. Na tomto grafu je možné vidět propustnost hluku do komory z okolí. V příloze A.9 je znázorněn graf odstupů naměřených charakteristik od šumového pozadí.



Obr. 5.2: Šumové pozadí bezodrazové komory

### Impedanční charakteristiky

Při měření impedanční charakteristiky není snímán akustický výstup reproduktoru, nýbrž závislost impedance na kmitočtu. Avšak hluk a vibrace z okolí se přenášejí na membránu reproduktoru. Pohyb membrány se přenáší na kmitací cívku, která svým pohybem mění elektrické parametry. Měření bylo provedeno v laboratoři EK009 a opatřením vůči těmto nechtěným změnám bylo zajištěno podložení reproduktoru akustickou pěnou Basotect, která tlumí vibrace. V průběhu měření bylo dodržováno ticho.

## 5.3 Měřicí přístroje

### Systém PULSE

Všechny parametry byly měřeny pomocí systému PULSE od dánské firmy Brüel & Kjær, který je specializován k měření akustických veličin. Systém PULSE je tvořen uživatelským rozhraním v podobě programu PULSE LabShop v10.3 na PC a samostatným stejnojmenným analyzátozem. Analyzátor je tvořen z bloků, jež se starají o zpracování signálu, filtrů, vstupních a výstupních karet. Pomocí výstupních karet, které obsahují 2 samostatné výstupy, je možné generovat zvolené signály s amplitudou 0-5 V. Vstupní karty obsahují 4 vstupy.

### Měřicí mikrofón

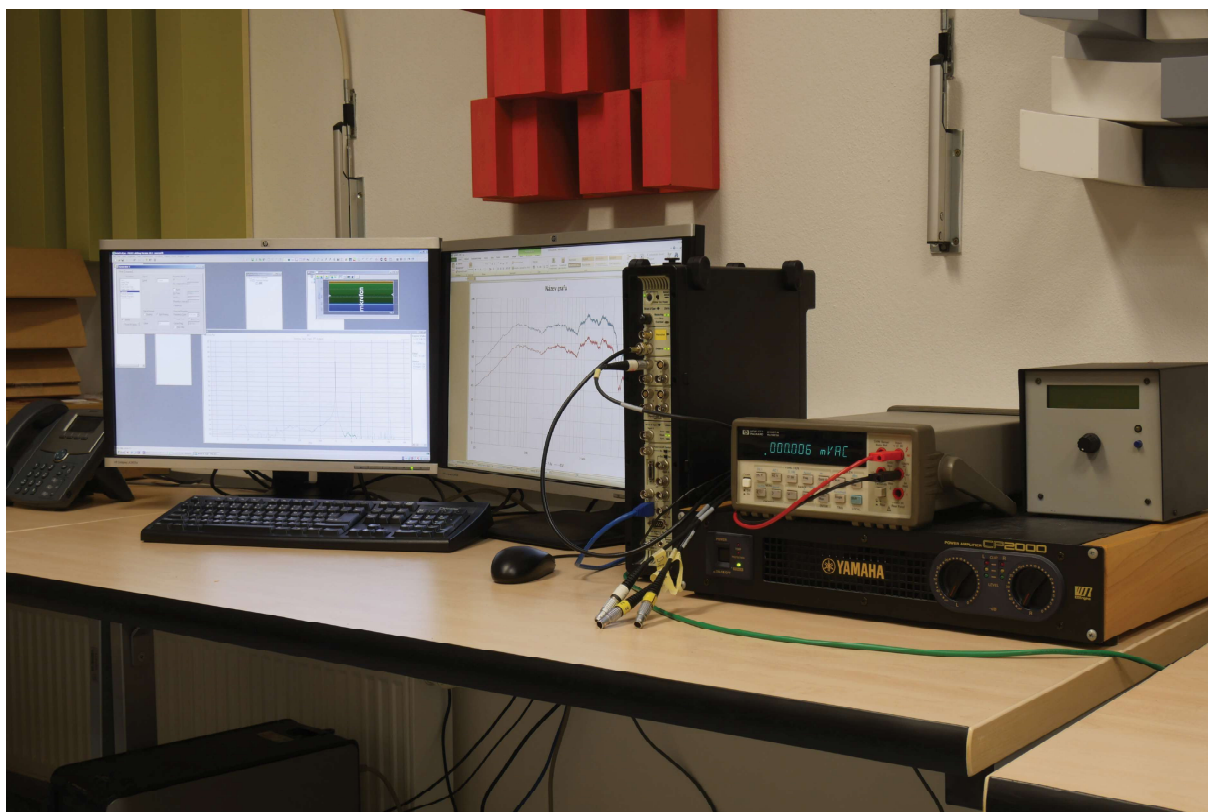
K systému PULSE je dodávána sada kalibrovaných měřících mikrofónů třídy 1. Akustické parametry reproduktoru byli měřeny mikrofónem typu 4190. Tento mikrofón disponuje v celém měřícím pásmu dostatečně rovnou kmitočtovou charakteristikou a citlivostí  $S = 51,1 \text{ mV/Pa}$ .

Mikrofóny obsahují údaje o své kmitočtové charakteristice. Připojením mikrofónu k

analyzátoru PULSE jsou tyto charakteristiky načteny jako korekční charakteristiky. Tímto je docíleno pohodlného a přesného měření.

### Zesilovací stupeň

K zesílení výstupu z analyzátoru PULSE byl použit zesilovač YAMAHA CP2000, který je schopen dodat až 450 W při 8  $\Omega$  zátěži beze zkreslení. Měření probíhala při relativně nízkém příkonu reproduktorů a tudíž je tento zesilovač vhodným řešením. Kontrola výstupního napětí zesilovače byla prováděna multimetrem HP 34401A v režimu voltmetr. Celé měřicí pracoviště je možné vidět na obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Fotografie měřicího pracoviště

## 5.4 Amplitudové kmitočtové charakteristiky

### Přípravy měření

Prvním krokem k měření amplitudových kmitočtových charakteristik bylo vyhodnocení příkonů, které se budou měřit. V tabulce 5.1 jsou uvedené měřené příkony, ke kterým jsou vypočítány dle vztahu 5.1 hodnoty napětí na svorkách reproduktoru. Výpočet napětí pro příkon 1 W do 8  $\Omega$  zátěže je znázorněn vztahem 5.2. Měření byly reproduktory s nominální impedancí  $X_{nom} = 8 \Omega$  a  $X_{nom} = 16 \Omega$ .

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow U = \sqrt{RP} \quad [V; \Omega, W] \quad (5.1)$$

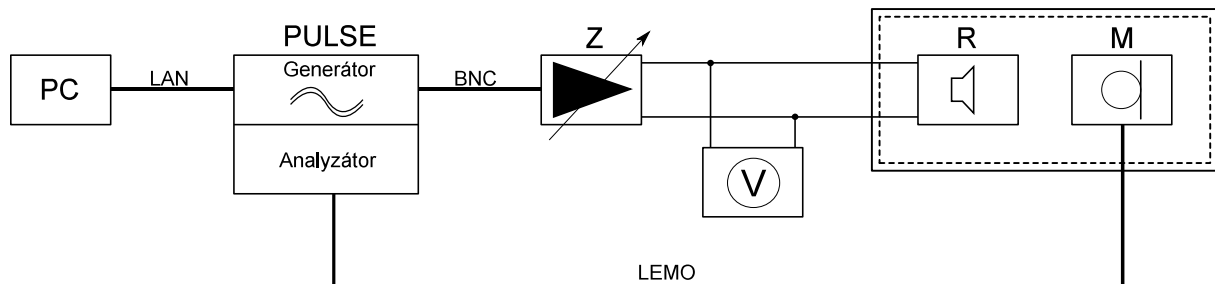


$$U = \sqrt{X_{nom}P} = \sqrt{8 \cdot 1} = 2,828 \quad [V] \quad (5.2)$$

$X_{nom}$ [ $\Omega$ ]	8	16
$P_{in}$ [W]	$U$ [V]	
1	2,828	4,000
2	4,000	5,657
3	4,899	6,928
10	8,944	12,649

**Tab. 5.1:** Hodnoty napětí, které odpovídají jednotlivým příkonům reproduktorů

Dalším krokem bylo zapojení měřicí techniky a reproduktorů dle schématu na obrázku 5.4. Počítač, který disponuje uživatelským prostředím PULSE LabShop v10.3 je propojen s analyzátozem PULSE pomocí síťového rozhraní ethernetovým UTP kabelem.



**Obr. 5.4:** Schéma měření amplitudové kmitočtové charakteristiky kytarových reproduktorů

Legenda:

PC	Počítač s uživatelským rozhraním PULSE LabShop v10.3
Generátor	Výstupní karta analyzátoru PULSE
Analyzátor	Vstupní karta analyzátoru PULSE
Z	Zesilovač YAMAHA CP2000
V	Multimetr HP 34401A
R	Měřený kytarový reproduktor
M	Měřicí mikrofón 4190
LAN	Ethernetový kabel s UTP konektory
BNC	Koaxiální kabel s BNC konektory
LEMO	Kabel s LEMO konektory

Výstupní karta je osazena dvěma oddělenými výstupy s BNC konektory. K následujícímu měření bylo využito výstupu č.2, který byl propojen se zesilovačem YAMAHA CP2000 pomocí koaxiálního kabelu. Zesilovač není osazen vstupním BNC konektorem, proto byl využit banánkový vstup.

Výstup zesilovače byl připojen na vstupní svorky kytarového reproduktoru umístěného v bezodrazové komoře. Paralelně k výstupním svorkám zesilovače byl připojen multimetr

v režimu voltmetr, který měl za úkol sledovat výstupní napětí zesilovače. Podle tohoto voltmetru se ladilo napětí na svorkách reproduktoru.

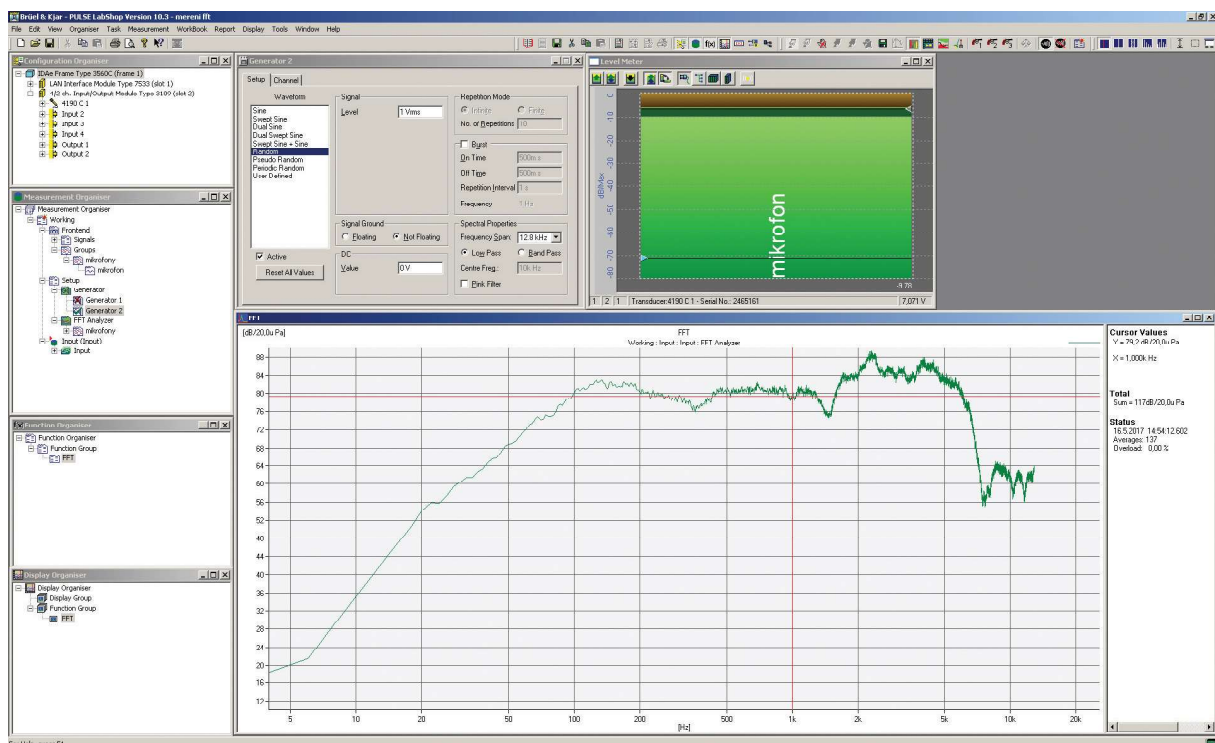
V bezdrazové komoře se nacházel také měřící mikrofón 4190. Propojení mezi mikrofonem a vstupem analyzátoru č.1 bylo zprostředkováno pomocí kabelu s LEMO konektory. Umístění mikrofónu je uvedeno zároveň s naměřenými daty.

Následně po zapojení bylo nutné nastavit analyzátor v uživatelském prostředí PULSE LabShop v10.3. Nastavoval se generátor signálů a analyzátor, který prováděl rozbor signálu z mikrofónu.

Generátor signálu byl nastaven tak, aby produkoval bílý šum v rozsahu 0 - 25600 Hz pro měření citlivosti a pro měření reproduktoru v uzavřené ozvučnici byl nastaven na 0 - 12800 Hz. Amplituda výstupního signálu byla nastavena na  $1 V_{RMS}$ . Pro nastavení potřebného napětí na svorkách reproduktoru byl využit zesilovač. V průběhu měření bylo nastavené napětí vždy konstantní.

Analyzátor byl nastaven na FFT analýzu výstupního signálu z mikrofónu. Počet vzorků za jednu měřící periodu byl nastaven na 6400, tzn. že pásmo o šíři 25,6 kHz je vzorkováno s krokem 4 Hz a pásmo o šíři 12,8 kHz je vzorkováno s krokem 2 Hz. Měřící perioda byla zvolena dle počtu hodnot k průměrování. Zvolena byla exponenciální metoda průměrování s počtem průměrů nastavených na 200.

K zápisu hodnot byl připraven graf, který na ose X obsahoval frekvenci v hertzech a na ose Y úroveň akustického tlaku v decibelech.



**Obr. 5.5:** Prostředí programu PULSE LabShop v10.3 konfigurované na měření ampl. kmitočtových charakteristik

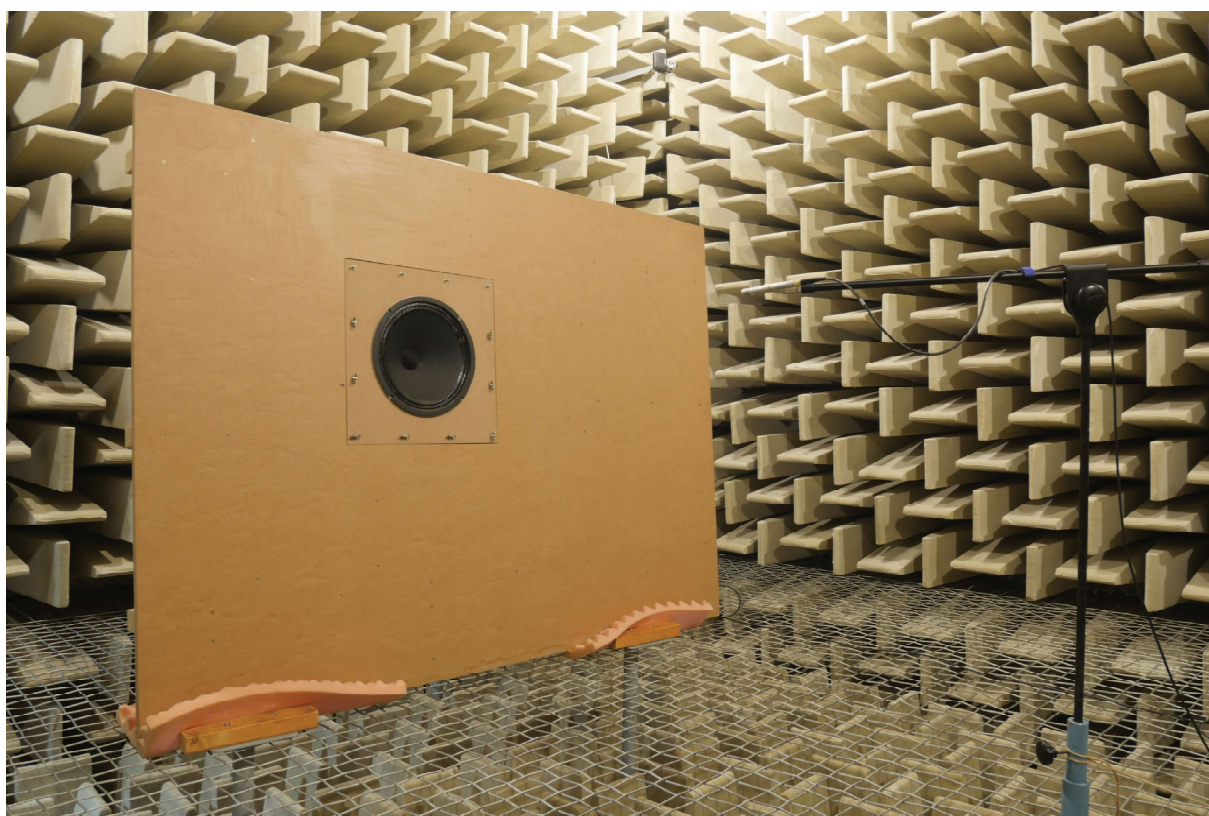
## Postup měření

Po následné konfiguraci analyzátoru byl proveden test měřicí smyčky a zároveň zahřátí reproduktoru. Nastavena byla také citlivost mikrofону, tak aby nebyl přebuzený. Přebuzení mikrofónu by se projevilo chybným výsledkem měření, proto bylo po celou dobu měření sledováno.

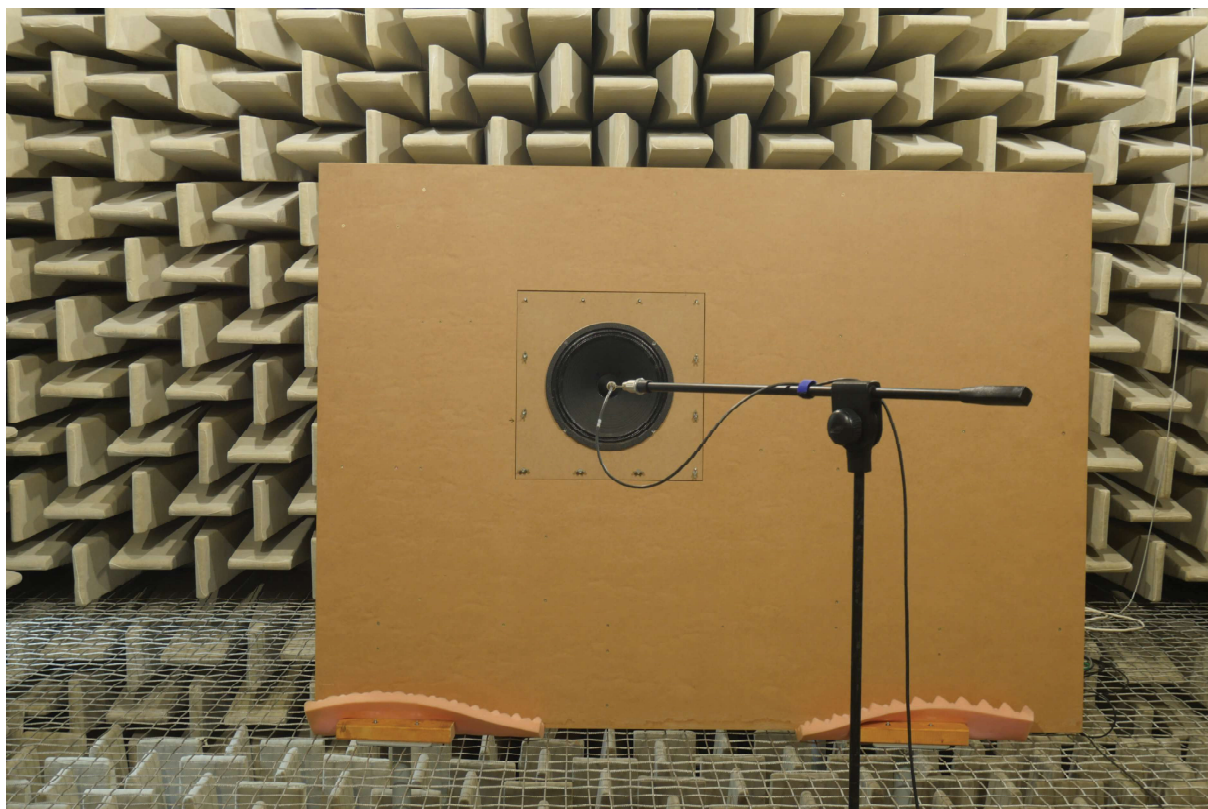
Po spuštění měření, se provádělo průměrování hodnot přibližně z 200 měřících cyklů a naměřené hodnoty se zapisovaly do zvoleného grafu. Následně po skončení měření byl vyměněn reproduktor a výsledné hodnoty byly vyexportovány do datového souboru. Zpracování dat bylo provedeno v programu MATLAB. Na obrázku 5.5 je zachyceno prostředí PULSE LabShop v10.3 nakonfigurované k měření ampl. kmitočtové charakteristiky.

## Konfigurace měření citlivosti

Citlivost byla měřena příkonem 1 W. Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 1 m od reproduktoru v jeho akustické ose. Reproduktor byl umístěn v standardní ozvučnici. Definovaná konfigurace je zachycena na obrázcích 5.6 a 5.7, které byly pořízeny v průběhu měření.



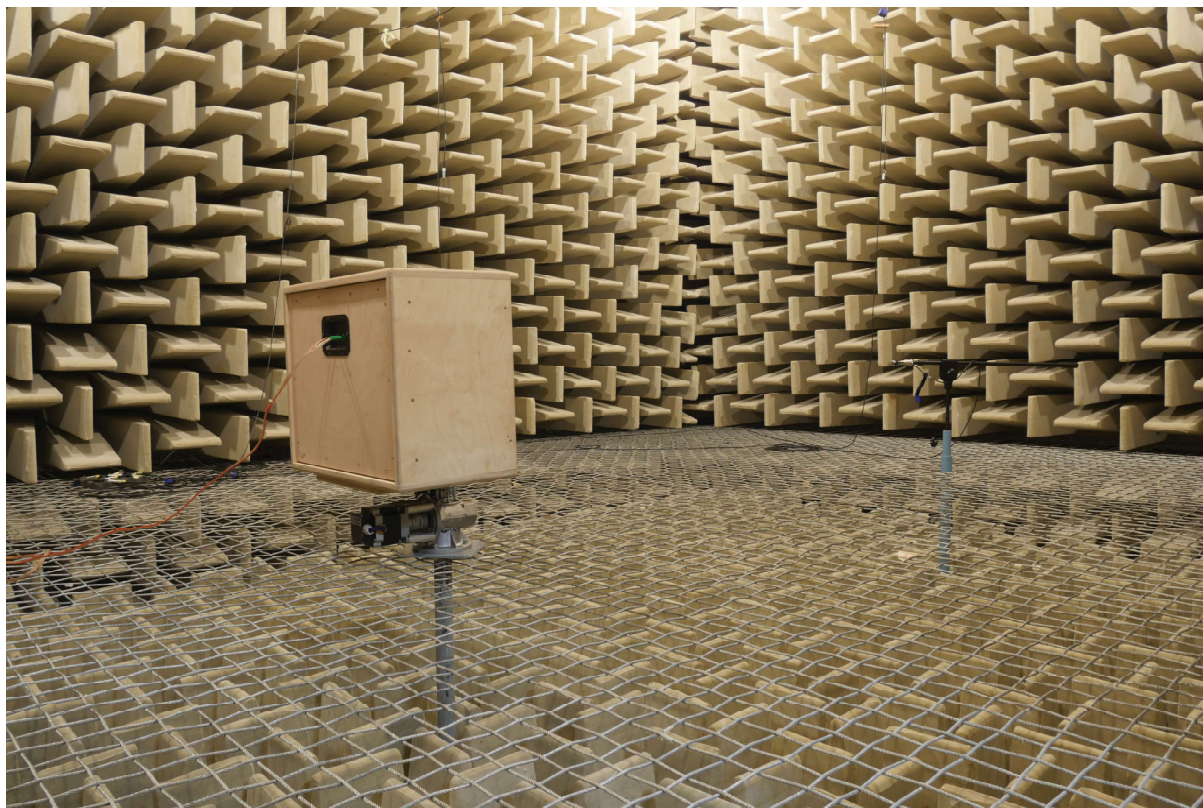
**Obr. 5.6:** Konfigurace mikrofónu při měření citlivosti - Pohled z profilu



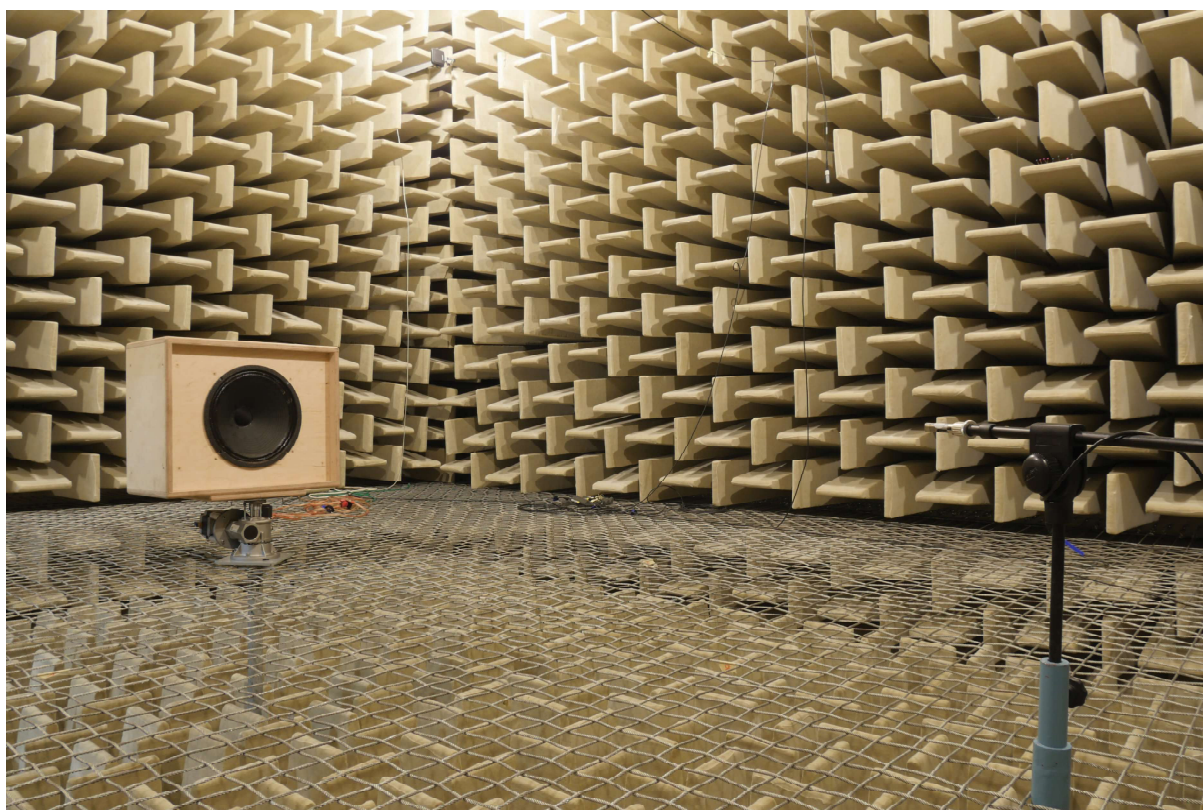
**Obr. 5.7:** Konfigurace mikrofonu při měření citlivosti - Pohled v ose reproduktoru

### **Konfigurace měření amplitudové kmitočtové charakteristiky v uzavřené ozvučnici**

Ampl. kmitočtová charakteristika byla měřena příkonem 2 W. Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 2 m od reproduktoru v akustické ose. Reproduktor byl umístěn v uzavřené ozvučnici typu Orange s objemem 43 l, rozměry ozvučnice jsou znázorněny v příloze D. Tato konfigurace byla využita také při měření směrových charakteristik. Ozvučnice je umístěna na točně. Definovaná konfigurace je zachycena na obrázcích 5.8 a) a 5.8 b).



(a) Pohled 1



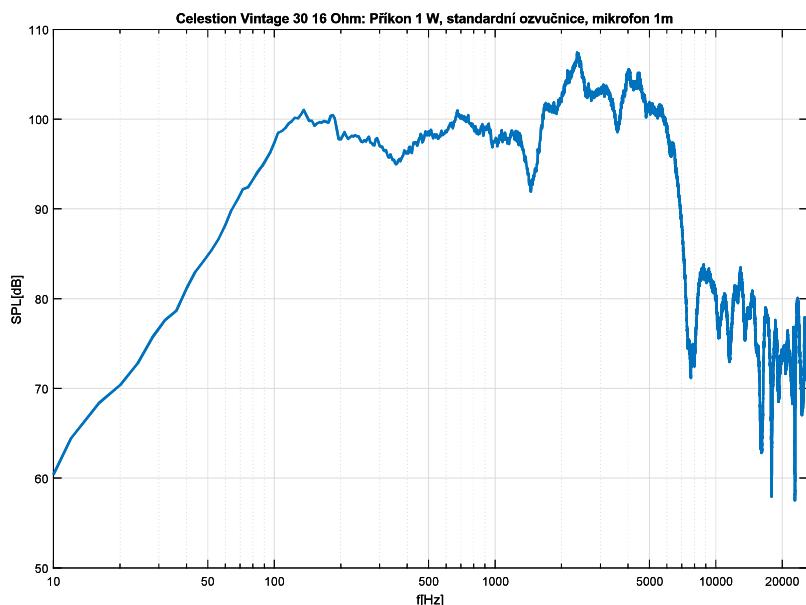
(b) Pohled 2

**Obr. 5.8:** Konfigurace mikrofonu při měření v uzavřené ozvučnici

## Výsledky měření

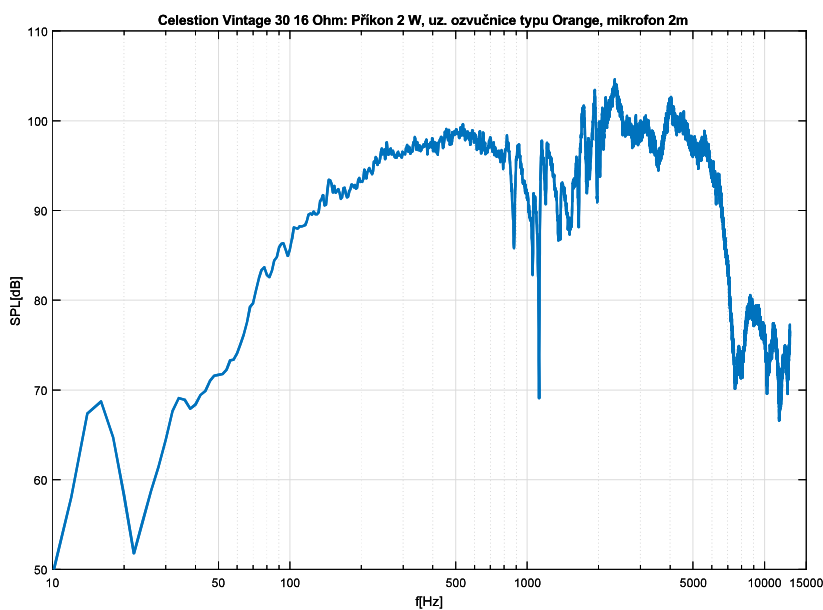
Všechny výsledky měření jsou k dispozici v příloze A. V této kapitole jsou uvedeny pouze výsledky pro reproduktor Celestion Classic Vintage 30 16  $\Omega$ .

Na obrázku 5.9 je vykreslen graf citlivosti reproduktoru Celestion Classic Vintage 30.



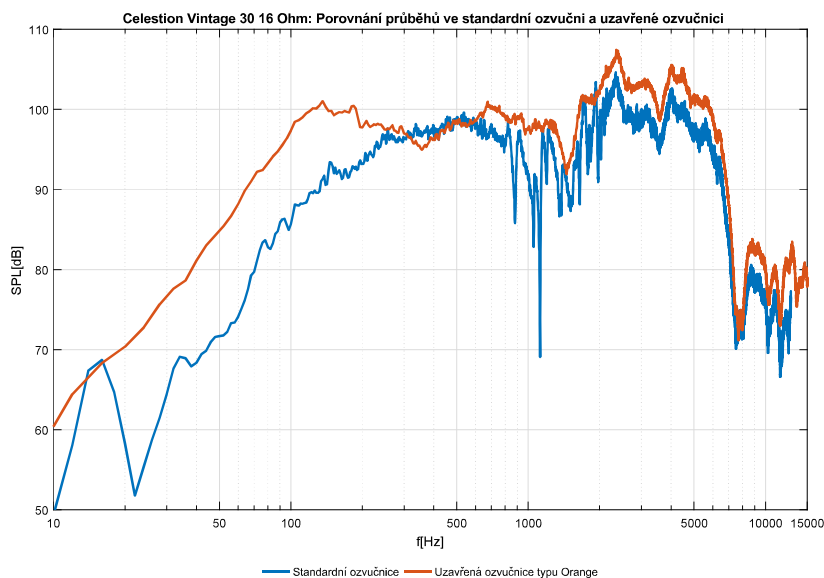
**Obr. 5.9:** Citlivost kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30

Na obrázku 5.10 je vykreslen graf amplitudové frekvenční charakteristiky Celestion Classic Vintage 30 v uz. ozvučnici typu Orange. Výrazný pokles úrovně ak. tlaku na kmitočtu 1,1 kHz je způsoben netěsností kolem konektorové misky ozvučnice.



**Obr. 5.10:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 ve vzdálenosti 2m

Porovnáním grafů 5.9 a 5.10 je vidět, že ozvučnice má dle očekávání velký vliv na nízké kmitočty. Výrazně tlumená je špička v rozmezí 100 - 200 Hz, kde je rozdíl průměrně 10 dB. Rezonanční kmitočet  $f_s$  byl posunut z původních 70 Hz na přibližně 120 Hz. Vyšší kmitočty nejsou již natolik ovlivněny a špičky na kmitočtech 2,5 kHz a 4 kHz zůstaly zachovány s přibližně stejným tvarem a úrovní ak. tlaku.



**Obr. 5.11:** Porovnání ampl. kmitočtové charakteristiky reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 v ozvučnici uzavřené a standardní

V tabulce 5.2 jsou parametry odvozené z amplitudových kmitočtových charakteristik. Toleranční pásmo bylo zvoleno na  $\pm 6$  dB. Charakteristické špičky byly vyhodnoceny jako vlastnost reproduktorů a nebyli započítány do výsledku.

(a) Celestion Classic Vintage 30			(b) Celestion Classic Lead 80		
Kmitočtový rozsah	[Hz]	71-6800	Kmitočtový rozsah	[Hz]	84-5900
$L_s$	[dB]	97,6	$L_s$	[dB]	98,3
(c) Eminence LEGEND 1218			(d) Jensen p12R		
Kmitočtový rozsah	[Hz]	80-5300	Kmitočtový rozsah	[Hz]	58-5800
$L_s$	[dB]	97,3	$L_s$	[dB]	94,4
(e) HH Invader					
Kmitočtový rozsah	[Hz]	68-6540			
$L_s$	[dB]	96,0			

**Tab. 5.2:** Parametry odvozené z ampl. kmitočtových charakteristik

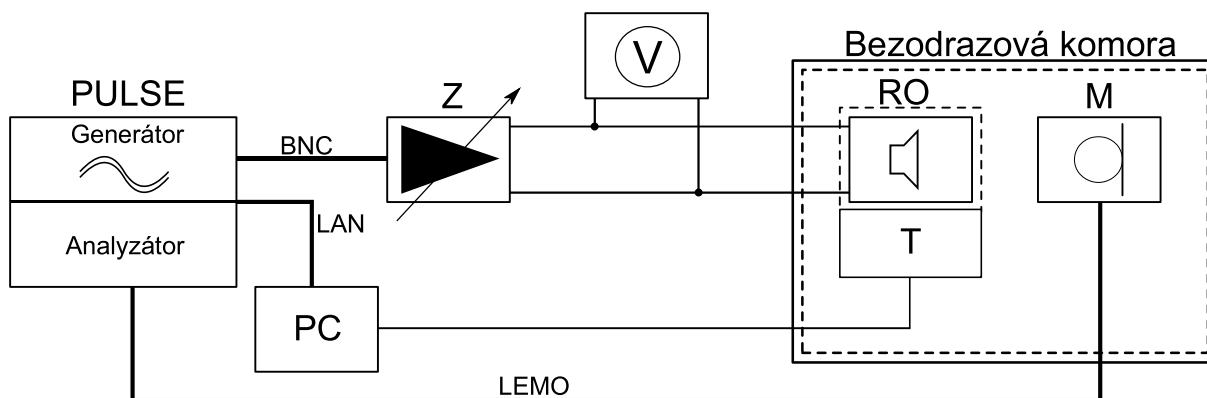
## 5.5 Směrové charakteristiky

### Přípravy měření

K měření směrových charakteristik je nutné podobně jako u ampl. kmitočtových charakteristik vyjádřit napětí odpovídající stanoveným příkonům reproduktorů. Reproduktoř byl buzen příkonem 3 W, hodnota napětí je uvedena v tabulce 5.1. Umístění mikrofonu pro měření směrových charakteristik bylo ve vzdálenosti 2 m od referenčního bodu v ose reproduktoru.

Měřicí technika a reproduktory byly zapojeny dle schématu na obrázku 5.12. Zapojení pro měření směrových charakteristik je obohaceno oproti měření ampl. kmitočtových charakteristik o točnu.

Točna byla využita k rotaci reproduktoru v ose měřicího mikrofonu a regulaci otáčení zajišťoval externí software v PC.



Obr. 5.12: Schéma měření směrové charakteristiky kytarových reproduktorů

Legenda:

PC	Počítač s uživatelským rozhraním PULSE LabShop v10.3
Generátor	Výstupní karta analyzátoru PULSE
Analyzátor	Vstupní karta analyzátoru PULSE
Z	Zesilovač YAMAHA CP2000
V	Multimetr HP 34401A
RO	Měřený kytarový reproduktor v uzavřené ozvučnici
M	Měřicí mikrofón 4190
T	Točna
LAN	Ethernetový kabel s UTP konektory
BNC	Koaxiální kabel s BNC konektory
LEMO	Kabel s LEMO konektory

Generátor byl nastaven tak, aby produkoval multitónový signál. Kmitočty jednotlivých harmonických signálů byly nastaveny dle středních kmitočtů 1/3 oktávových pásem. Amplituda výstupního signálu byla nastavena na  $1 V_{RMS}$ . Pro nastavení potřebného na-

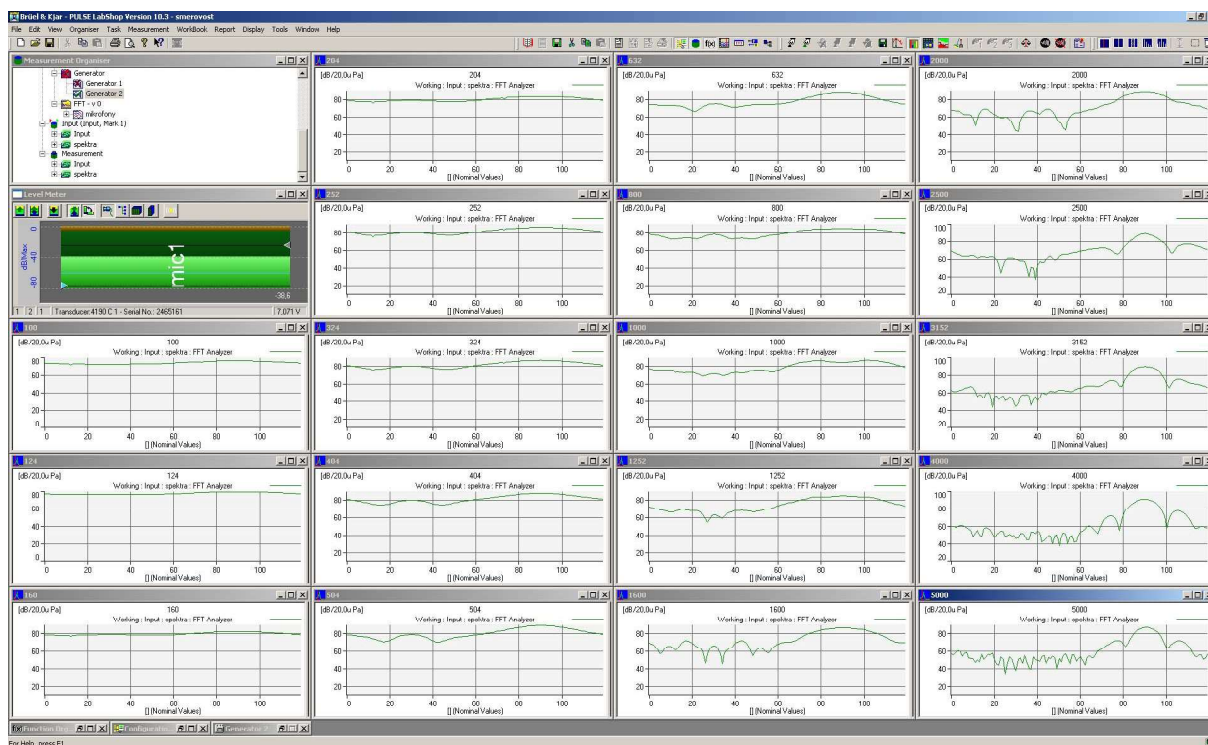


pětí na svorkách reproduktoru byl využit zesilovač. V průběhu měření zůstaly nastavené tyto hodnoty konstantní.

Analyzátor byl synchronizován s točnou, kdy byl snímán úhel otočení s krokem  $3^\circ$ . Na každé pootočení točny s definovaným krokem byla provedena analýza všech tónů, které produkoval generátor. Hodnoty úrovně ak. tlaku pro střední kmitočty  $1/3$  oktávových pásem v závislosti na úhlu ( $0-360^\circ$ ) byly zapsány v podobě datového souboru.

## Postup měření

Po zapojení a nastavení analyzátoru bylo spuštěné měření a prováděl se zápis hodnot do datového souboru. Následně po skončení měření byl vyměněn reproduktor. Na obrázku 5.13 je zachyceno prostředí PULSE LabShop v10.3 nakonfigurované k měření směrových charakteristik. Každé okno zobrazené na obrázku provádí analýzu jednoho samostatného tónu.



**Obr. 5.13:** Prostředí programu PULSE LabShop v10.3 nakonfigurované na měření směrových charakteristik

## Konfigurace měření směrových charakteristik

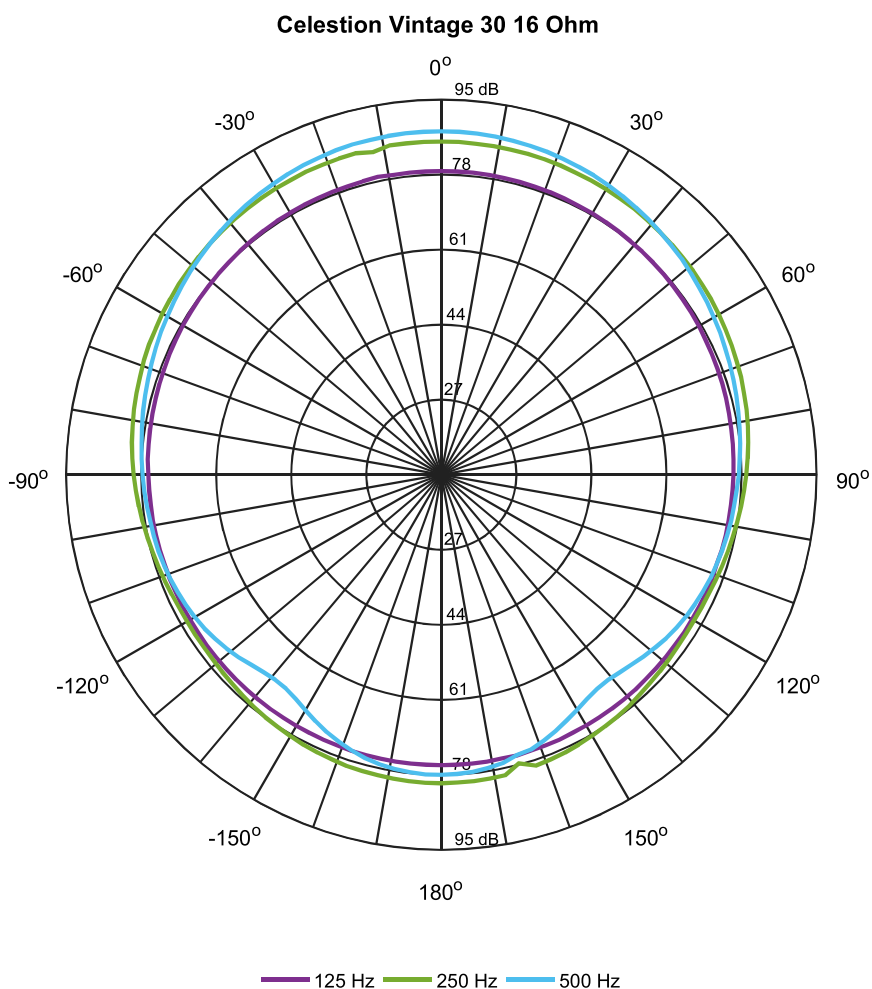
Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 2 m od reproduktoru v akustické ose. Reproduktor byl umístěn v uzavřené ozvučnici typu Orange, její rozměry jsou uvedeny v příloze D. Ozvučnice je umístěna na točně. Definovaná konfigurace je zachycena na obrázcích 5.8 a) a 5.8 b).

## Výsledky měření

Všechny výsledky měření jsou k dispozici v příloze B. V této kapitole jsou uvedeny pouze výsledky pro reproduktor Celestion Classic Vintage 30 16  $\Omega$ .

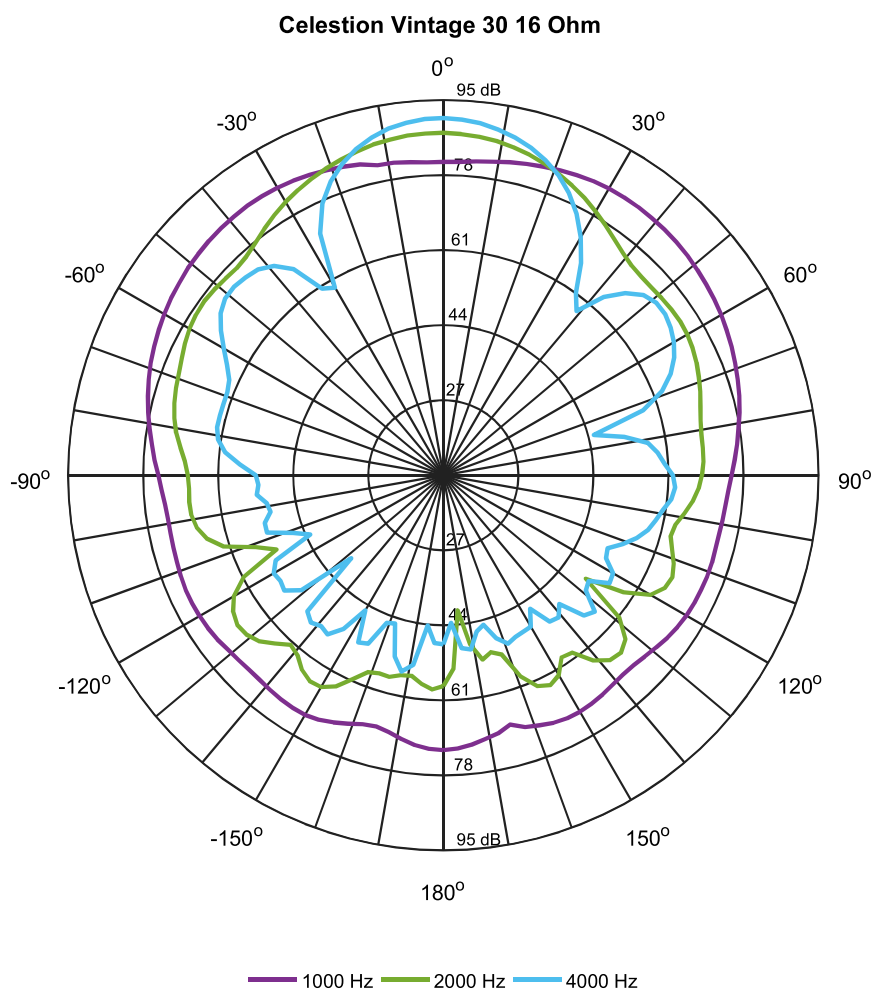
Na obrázku 5.14 je uveden polární graf, ve kterém jsou vykresleny směrové charakteristiky reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 pro kmitočty 125, 250, 500 Hz. Směrové charakteristiky pro kmitočty 1000, 2000, 4000 Hz jsou vykresleny na obrázku 5.15. Referenčním bodem mikrofonu v ose reproduktoru je úhel  $0^\circ$ .

Prozkoumáním směrových charakteristik z obrázku 5.15 je možné usoudit poslechový úhel reproduktoru, který je dle křivky pro 4 kHz roven  $\pm 15^\circ$ . Jak bylo možné předpokládat, největší směrovost reproduktoru je na vyšších kmitočtech.



**Obr. 5.14:** První 3 střední kmitočty oktávových pásem

Úrovně ak. tlaku v ose reproduktoru odpovídají úrovním naměřeným ampl. kmitočtové charakteristiky reproduktoru v uzavřené ozvučnici. Avšak na směrové charakteristice je možné pozorovat celkový výkon vyzářený do prostoru. Příkladem je křivka pro 1 kHz na obrázku 5.15, která vykazuje pokles výkonu v akustické ose reproduktoru. Při vychýlení od akustické osy o  $\pm 30^\circ$  se ovšem úroveň ak. tlaku mírně navýší.



**Obr. 5.15:** Čtvrtý, pátý a šestý střední kmitočet oktávových pásem

Reproduktor Celestion Classic Vintage 30 začíná vykazovat větší směrovost v ak. ose počínaje kmitočtem přibližně 1,6 kHz. Mírné deformace a poklesy ak. tlaku začínají být pozorovatelné za ozvučnicí již od kmitočtu 400 Hz.

## 5.6 Impedanční charakteristiky

### Přípravy měření

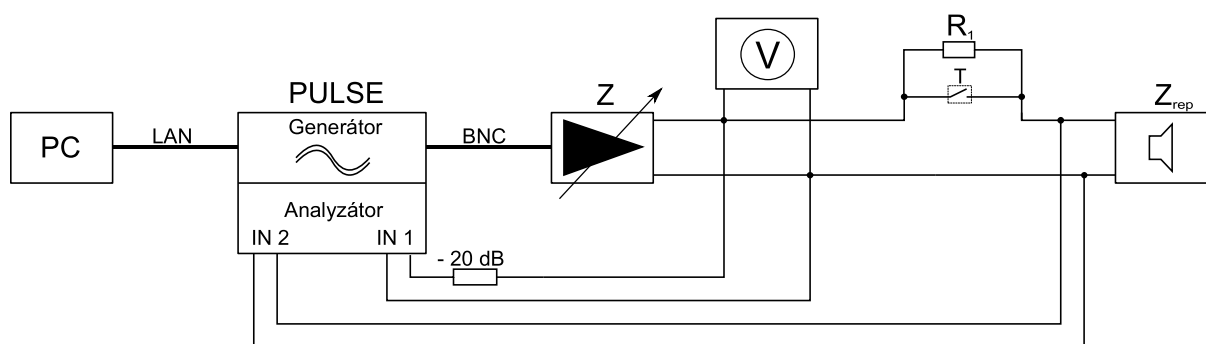
Při měření impedančních charakteristik byl reproduktor příkonem 10 W zahříván a příkonem 1 W byl měřen. Hodnoty napětí pro dané příkony jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Zapojení měřicí techniky a reproduktorů bylo dle schématu na obrázku 5.16.

Výstup zesilovače byl připojen sériově s přepínačem, který měl za úkol zkratovat rezistor  $R_1$ . Paralelně k výstupním svorkám zesilovače byl připojen multimetr v režimu voltmetr, který měl za úkol sledovat výstupní napětí zesilovače. Podle tohoto voltmetru se ladilo napětí na sériovém spojení rezistoru  $R_1$  a reproduktoru.

Vstup do analyzátoru PULSE s označením IN 1 byl připojen na výstupní svorky zesilovače. Z bezpečnostních důvodů byl před vstup IN 1 zařazen 20 dB útlumový člunek.

Vstup IN 2 byl připojen na vstupní svorky reproduktoru.



**Obr. 5.16:** Schéma měření impedanční charakteristiky kytarových reproduktorů

Legenda:

PC	Počítač s uživatelským rozhraním PULSE LabShop v10.3
Generátor	Výstupní karta analyzátoru PULSE
Analyzátor	Vstupní karta analyzátoru PULSE s aktivními vstupy IN 1 a IN 2
Z	Zesilovač YAMAHA CP2000
V	Multimetr HP 34401A
$R_1$	Rezistor s odporem $1k\Omega$
$Z_{rep}$	Reproduktor
T	Zkratovací přepínač
LAN	Ethernetový kabel s UTP konektory
BNC	Koaxiální kabel s BNC konektory
-20 dB	Útlumový článek

Generátor signálu byl nastaven tak, aby produkoval bílý šum v rozsahu 0 - 10000 Hz. Amplituda výstupního signálu byla nastavena na  $1 V_{RMS}$ . Pro nastavení potřebného napětí na sériovém spojení odporu  $R_1$  a reproduktoru byl využit zesilovač. V průběhu měření bylo nastavené napětí vždy konstantní.

Analyzátor byl nastaven na měření impedančních charakteristik pomocí presetu, který je využíván v laboratoři. Princip tohoto presetu spočívá ve snímání napětí na výstupu zesilovače a na vstupních svorkách reproduktoru. Výsledná impedance je dána vztahem 5.4.

$$Z_{rep} = \frac{U_{rep}}{I_{rep}} = \frac{U_{rep}}{\frac{U_R}{R_1}} \quad [\Omega; V, A, \Omega] \quad (5.3)$$

$$Z_{rep} = \frac{U_{rep}R}{U_{zes} - U_{rep}} \quad [\Omega; V, \Omega] \quad (5.4)$$

K zápisu hodnot byl připraven graf, který na ose X obsahoval frekvenci v hertzech a na ose Y modul impedance v ohmech.

## Konfigurace měření impedance

Reproduktor byl umístěn na tlumící podložku. Celá sestava byla umístěna na stůl v laboratoři EK009.

## Postup měření

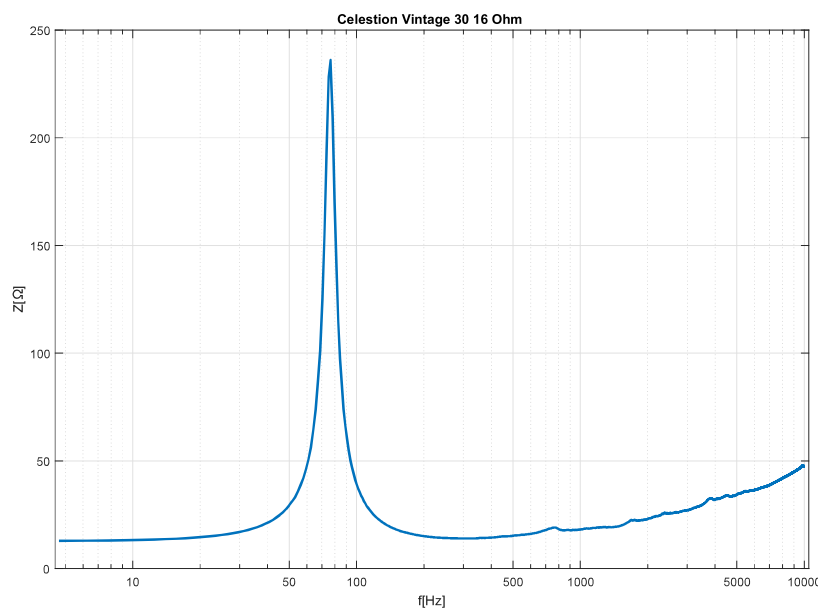
Zahřívání reproduktoru je při měření impedančních charakteristik důležité, a proto se zde dbalo na stejné časové intervaly zahřívání a měření reproduktoru. Zahřívání reproduktoru bylo provedeno pomocí bílého šumu s příkonem 10 W po dobu 1 min. V průběhu zahřívání je vstup IN 2 odpojen a rezistor  $R_1$  zkratován pomocí přepínače. Ihned po skončení zahřívacího cyklu reproduktoru byl přepínač rozpojen a vstup analyzátoru IN 2 zapojen. V této fázi začíná samotné měření, nastaven byl příkon do sériového spojení rezistoru  $R_1$  a reproduktoru na 1 W, následně byl spuštěn měřící preset.

Doba měřícího cyklu byla stanovena na 1 min. V průběhu měření se hodnoty zapisovaly do grafu. Následně po skončení měření byl vyměněn reproduktor a výsledné hodnoty byly vyexportovány do datového souboru.

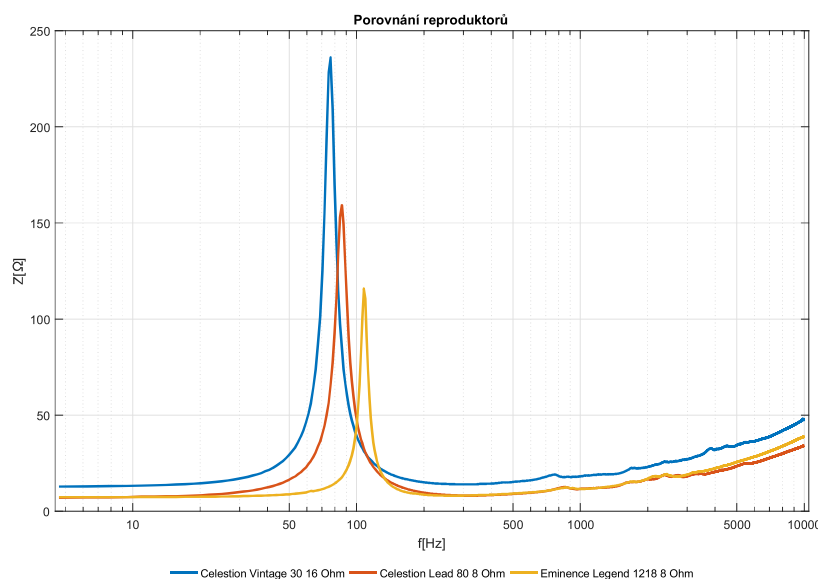
## Výsledky měření

Všechny výsledky měření jsou k dispozici v příloze C. V této kapitole jsou uvedeny pouze výsledky pro reproduktor Celestion Classic Vintage 30 16  $\Omega$ .

Na obrázku 5.17 je vykreslen graf impedanční charakteristiky reproduktoru Celestion Classic V30. Z tohoto grafu je možné zjistit rezonanční kmitočet, nominální impedanci  $X_{nom}$  a porovnáním impedančních špiček získat informaci o magnetickém obvodu reproduktoru. Porovnání tří impedančních charakteristik kytarových reproduktorů je znázorněno na obrázků 5.18. Čím vyšší a užší je rezonanční špička, tím větší bude činitel jakosti.



**Obr. 5.17:** Impedanční charakteristika reproduktoru Celestion Classic Vintage 30



Obr. 5.18: Porovnání impedančních charakteristik kytarových reproduktorů

## 5.7 TS parametry

TS parametry jsou počítány z impedančních charakteristik, a proto bylo měření impedanční charakteristiky pro výpočet TS parametrů shodné s měřením v kapitole 5.6. K vyhodnocení TS parametrů byla vybrána metoda přidání hmotnosti, která je popsána v kapitole 4.5.

K měření byl použit předpřipravený excelový soubor, který je využíván v laboratoři. Tento soubor vyhodnotí TS parametry na základě dat z metody přidání hmotnosti.

### Postup a výsledky měření

Před samotným měřením impedančních charakteristik bylo provedeno měření činného odporu kmitací cívky. Kvůli přesnosti měření malého odporu kmitací cívky byla využita metoda 4 bodového měření. K tomuto měření byl použit multimetr HP 34401A v režimu ohmmetr.

Zvolená metoda přidání hmotnosti vyžaduje zatížení membrány externím závažím o známé hmotnosti. K tomuto účelu bylo využito materiálu semtex o hmotnosti 5,614 g, který na membráně dobře drží.

Měřeny byly dvě impedanční charakteristiky. První impedanční charakteristika byla měřena bez závaží a druhá s umístěným závažím okolo prachovky. Jelikož je semtex plastická dobře tvarovatelná hmota, tak jej bylo možné rychle umístit na membránu.

Cyklus měření byl rozdělen do tří kroků, kdy prvním krokem bylo zahřát reproduktor. V zahřívací fázi je zkratován rezistor  $R_1$  a vstup analyzátoru IN 2 odpojen. Zahřívací perioda, po kterou byl reproduktor buzen příkonem 10 W byla 2 minuty.

Druhým krokem bylo přepnutí zkratovacího přepínače, zapojení vstupu analyzátoru IN 2 a příprava výstupního napětí na zesilovači. Výstupní napětí zesilovače bylo zvoleno tak, aby odpovídalo 1 W na reproduktoru bez rezistoru  $R_1$ .

Třetím krokem bylo měření impedanční charakteristiky a vyhodnocení potřebných parametrů z naměřených dat. Měřen byl pouze úsek potřebný k získání parametrů  $Z_{max}$  a  $Z_x$ . Tyto parametry jsou vyznačeny na obrázku 4.6. Následně byli parametry  $Z_{max}$ ,  $Z_x$ ,  $f_s$ ,  $f_1$  a  $f_2$  z naměřených dat nalezeny a zapsány do excelového souboru.

Ve druhé části měření se měřící cyklus opakuje s přidáním závaží na membráně. Hodnoty  $Z'_{max}$ ,  $Z'_x$ ,  $f'_s$ ,  $f'_1$  a  $f'_2$  jsou následně zapsány do excelového souboru. Tímto měření končí a výsledkem jsou tyto TS parametry: faktor  $Bl$ , celková hmotnost kmitacího systému  $m_{ms}$ , hmotnost kmitacího systému bez vzduchu  $m_{md}$ , celková poddajnost kmitacího systému  $c_{ms}$ , ekvivalentní objem  $V_{as}$  a činnitelé jakosti  $Q_{es}$ ,  $Q_{ms}$ ,  $Q_{ts}$ . Parametry odpor kmitacího systému  $r_{ms}$ , akustická poddajnost kmitacího systému  $c_a$ , účinnost  $\eta_0$  a charakteristická citlivost  $L_s$  byli dopočítány mimo připravený excelový soubor.

TS parametry jednotlivých reproduktorů jsou uvedeny ve vytvořených katalogových listech, které jsou umístěny v příloze F. V tabulce 5.3 jsou uvedeny TS parametry reproduktoru Celestion Classic Vintage 30, ke které je uveden příklad výpočtu. Při měření TS parametrů reproduktoru Celestion Classic Lead 80 již nebyl k dispozici.

Celestion Classic Vintage 30		
$R_e$	$[\Omega]$	12,64
$f_s$	$[Hz]$	72,00
$S_d$	$[cm^2]$	490,00
$Bl$	$[Tm]$	17,30
$m_{ms}$	$[g]$	29,53
$m_{md}$	$[g]$	23,25
$c_{ms}$	$[mm/N]$	0,17
$c_a$	$[m^5/N]$	$4 \cdot 10^{-7}$
$V_{as}$	$[l]$	55,61
$Q_{es}$	$[-]$	0,56
$Q_{ms}$	$[-]$	10,74
$Q_{ts}$	$[-]$	0,54
$L_s$	$[dB]$	97,78
$\eta$	$[\%]$	3,60
$r_{ms}$	$[Ns/m]$	1,24

**Tab. 5.3:** TS parametry reproduktoru Celestion Classic Vintage 30

Příklad výpočtu TS parametrů reproduktoru Celestion Classic Vintage 30:

V tabulce 5.4 jsou uvedeny hodnoty získané měřením impedančních charakteristik metodou přidání hmotnosti.

Hodnoty bez závaží		Hodnoty s přidaným závažím			
$R_e$	$\Omega$	12,64			
$f_s$	$Hz$	72,00	$f'_s$	$Hz$	66,00
$f_1$	$Hz$	58,50	$f'_1$	$Hz$	54,50
$f_2$	$Hz$	88,50	$f'_2$	$Hz$	79,50
$Z_{max}$	$\Omega$	235,26	$Z'_{max}$	$\Omega$	240,33

**Tab. 5.4:** Hodnoty získané měřením impedančních charakteristik metodou přidání hmotnosti pro reproduktor Celestion Classic Vintage 30

Rezonanční kmitočet  $f_s$  a  $f'_s$ :

$$R_0 = \frac{Z_{max}}{R_e} = \frac{235,26}{12,64} = 18,61 \quad [-] \quad (5.5)$$

$$R'_0 = \frac{Z'_{max}}{R_e} = \frac{240,33}{12,64} = 19,01 \quad [-] \quad (5.6)$$

$$Z_x = R_e \sqrt{R_0} = 12,64 \sqrt{18,61} = 54,53 \Omega \Rightarrow f_1, f_2 \quad (5.7)$$

$$Z_x = R_e \sqrt{R'_0} = 12,64 \sqrt{19,01} = 55,11 \Omega \Rightarrow f'_1, f'_2 \quad (5.8)$$

$$f_s = \sqrt{f_1 f_2} = \sqrt{58,50 \cdot 88,50} = 72 \quad [Hz] \quad (5.9)$$

$$f'_s = \sqrt{f'_1 f'_2} = \sqrt{54,50 \cdot 79,50} = 66 \quad [Hz] \quad (5.10)$$

Mechanický činitel jakosti  $Q_{ms}$ :

$$Q_{ms} = f_s \frac{\sqrt{R_0}}{f_2 - f_1} = 72 \cdot \frac{\sqrt{18,61}}{88,50 - 58,50} = 10,74 \quad [-] \quad (5.11)$$

Elektrický činitel jakosti  $Q_{es}$ :

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{R_0 - 1} = \frac{10,74}{18,61 - 1} = 0,56 \quad [-] \quad (5.12)$$

Celkový činitel jakosti  $Q_{ts}$ :

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} = \frac{10,74 \cdot 0,56}{10,74 + 0,56} = 0,54 \quad [-] \quad (5.13)$$

Poddajnost  $c_{ms}$ :

$$\begin{aligned} c_{ms} &= \frac{1}{4\pi^2 m} \frac{(f_s + f'_s) \cdot (f_s - f'_s)}{(f_s f'_s)^2} \\ &= \frac{1}{4\pi^2 \cdot 5,614 \cdot 10^{-3}} \frac{(72 + 66) \cdot (72 - 66)}{(72 \cdot 66)^2} \\ &= 0,1654 \quad \left[ \frac{mm}{N} \right] \end{aligned} \quad (5.14)$$



Aktivní plocha membrány  $S_d$ :

$$S_d = \pi r_d^2 \pi \cdot 12,5^2 = 490 \quad [cm^2] \quad (5.15)$$

Ekvivalentní objem  $V_{as}$ :

$$V_{as} = c_{ms} c_0 \rho_v S_d^2 = 1,4 \cdot 10^5 \cdot 0,1654 \cdot 10^{-3} \cdot (490 \cdot 10^{-4})^2 = 55,61l \quad [l] \quad (5.16)$$

Hmotnost kmitacího systému vč. spolukmitajícího vzduchu  $m_{ms}$ :

$$m_{ms} = \frac{1}{c_{ms} 4\pi^2 f_s^2} = \frac{1}{0,1654 \cdot 10^{-34} \cdot \pi^2 72^2} = 29,5345 \quad [g] \quad (5.17)$$

Hmotnost kmitacího systému bez spolukmitajícího vzduchu  $m_{md}$ :

$$m_{md} = m_{ms} - 3,227r_d^2 = 0,0295345 - 4,023 \cdot 12,5^2 = 23,2486 \quad [g] \quad (5.18)$$

Odpor kmitacího systému bez spolukmitajícího vzduchu  $r_{ms}$ :

$$r_{ms} = 2\pi f_s \frac{m_{ms}}{Q_{ms}} = 2\pi \cdot 72 \cdot \frac{0,0295345}{10,74} = 1,2437 \quad \left[\frac{Ns}{m}\right] \quad (5.19)$$

Bl faktor :

$$Bl = \sqrt{2\pi f_s \frac{m_{ms} R_e}{Q_{es}}} = \sqrt{2\pi \cdot 72 \cdot \frac{0,0295345 \cdot 12,64}{0,56}} = 17,3 \quad \left[\frac{T}{m}\right] \quad (5.20)$$

Ak. poddajnost kmitacího systému  $c_a$ :

$$c_a = \frac{V_{as}}{c_0^2 \rho_v} = \frac{0,05561}{139876} = 3,9757 \cdot 10^{-7} \quad \left[\frac{m^5}{N}\right] \quad (5.21)$$

Účinnost  $\eta_0$ :

$$\eta_0 = 9,87 \cdot 10^{-7} V_{as} \cdot \frac{f_s^3}{Q_{es}} = 9,87 \cdot 10^{-7} \cdot 0,05561 \cdot \frac{72^3}{0,56} \cdot 100 = 3,5972 \quad [\%] \quad (5.22)$$

Charakteristická citlivost  $L_s$ :

$$L_s = 112,2 + 10 \log \eta_0 = 112,2 + 10 \log(0,035972) = 97,7597 \quad [dB] \quad (5.23)$$

## 5.8 THD

### Přípravy měření

THD bylo měřeno buzením reproduktoru výkonem 1 W a 10 W. Hodnoty napětí pro dané příkony jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Schéma zapojení a rozmístění přístrojů je identické se schématem uvedeným na obrázku 5.4.

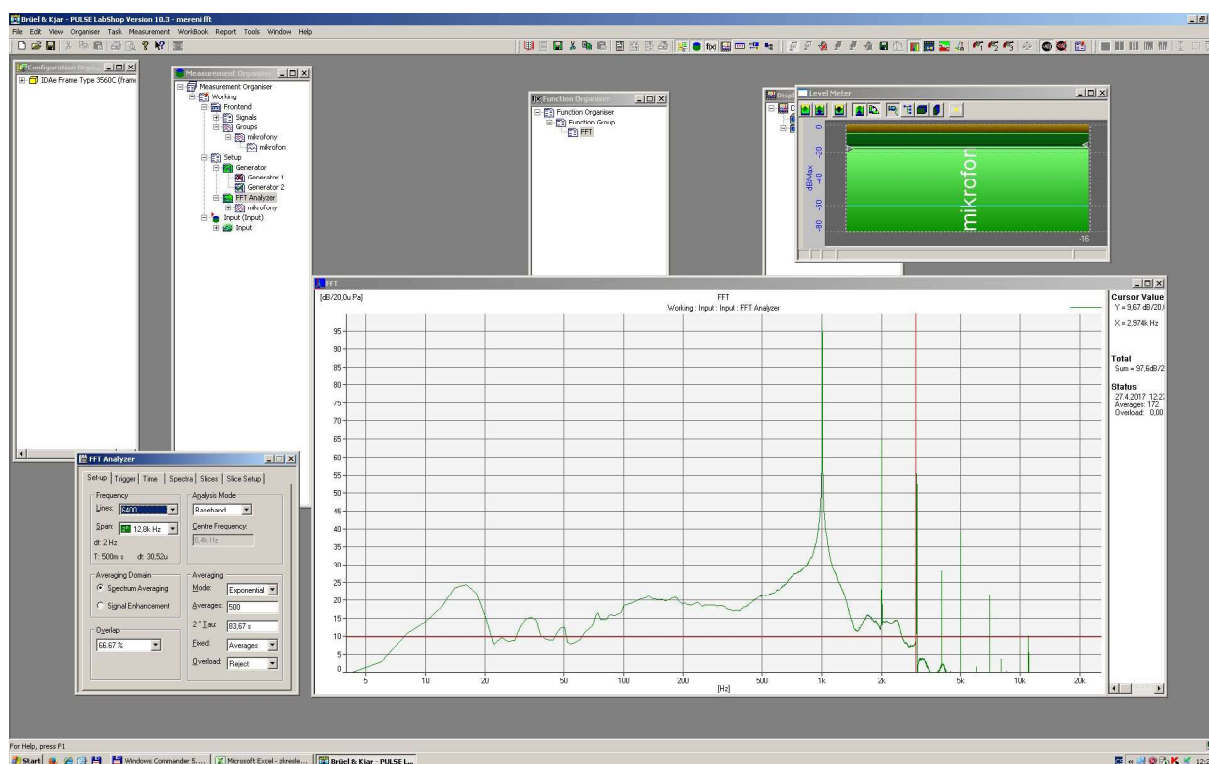
Generátor signálu byl nastaven na sinusový signál o kmitočtu 1 kHz. Amplituda výstupního signálu byla nastavena na 1  $V_{RMS}$ .

Analyzátor byl nastaven na FFT analýzu výstupního signálu z mikrofonu v kmitočtovém pásmu 0 - 12800 Hz. Počet vzorků za jednu měřicí periodu byl nastaven na 6400. Měřicí perioda byla zvolena dostatečně veliká, tak aby bylo získáno potřebné množství hodnot k průměrování. Zvolena byla exponenciální metoda průměrování s počtem průměrů nastavených na 200.

## Postup měření

Po následné konfiguraci analyzátoru byl proveden test měřicí smyčky a zároveň zahrátí reproduktoru. Po dobu měření byla sledována citlivost mikrofonu kvůli možnému přebuzení.

Po spuštění měření, se provádělo průměrování hodnot přibližně z 200 měřících cyklů a naměřené hodnoty se zapisovaly do zvoleného grafu. Následně po skončení měření byl vyměněn reproduktor a výsledné hodnoty byly vyexportovány do datového souboru. Na obrázku 5.19 je zachyceno prostředí PULSE LabShop v10.3 nakonfigurované k měření THD.



Obr. 5.19: Prostředí programu PULSE LabShop v10.3 nakonfigurované na měření THD

## Konfigurace měření THD

Mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 1 m od reproduktoru v jeho akustické ose. Reprodukční reproduktor byl umístěn v standardní ozvučnici. Definovaná konfigurace je zachycena na obrázcích 5.7 a) a 5.7 b).

## Výsledky měření

Tabulka 5.5 obsahuje výsledky THD pro všechny měřené kytarové reproduktory.

Reproduktor	$THD_{1W}$ [%]	$THD_{10W}$ [%]
Celestion Classic Vintage 30	2,46	4,46
Celestion Classic Lead 80	1,13	2,57
Eminence Legend 1218	0,95	1,73
Jensen p12R	0,97	3,65
HH Invader	2,27	8,13

**Tab. 5.5:** THD kytarových reproduktorů

Následující příklad výpočtu THD je proveden na reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 buzený 1 W.

Z naměřených hodnot bylo potřeba nejdříve získat ak. tlak  $p_n$  pro každou  $n$ -tou harmonickou složku. Výpočet první harmonické složky je znázorněn vztahem 5.24.

$$p_1 = p_0 10^{\frac{L_n}{20}} = 2 \cdot 10^{-5} 10^{\frac{97,6444}{20}} = 1,5249 \quad [Pa] \quad (5.24)$$

Tímto způsobem je dopočítána tabulka 5.6, ve které jsou hodnoty ak. tlaku vyšších harmonických. Obsahem tabulky jsou pouze hodnoty prvních 7 harmonických složek, jelikož zbylé jsou pro výpočet nevýznamné kvůli své velikosti.

Index harmonické $n$	1	2	3	4	5	6	7
$L_n$ [dB]	97,6444	65,0068	55,4372	27,9545	38,6911	1,6984	21,4327
$p_n$ [Pa]	1,5249	0,0356	0,0118	0,0005	0,0017	0,0000	0,0002

**Tab. 5.6:** Ak. tlak jednotlivých  $n$  harmonických složek

Pomocí hodnot z tabulky 5.6 bylo vyjádřeno THD.

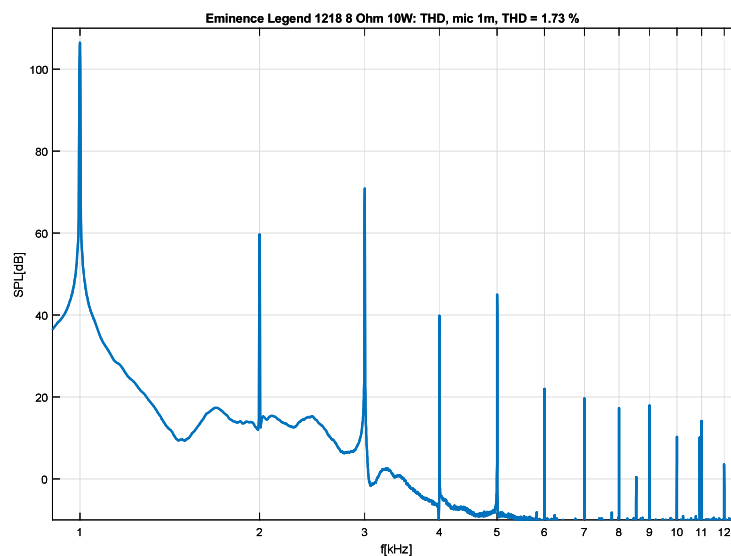
$$\begin{aligned} THD &= \frac{(\sum_{i=2}^n p_i^2)^{1/2}}{p_1} \cdot 100 = \frac{(p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + p_5^2 + p_6^2 + p_7^2)^{1/2}}{p_1} \cdot 100 \\ &= \frac{(0,0356^2 + 0,0118^2 + 0,0005^2 + 0,0017^2 + 0,0002^2)^{1/2}}{1,5249} \cdot 100 = 2,46 \quad [\%] \end{aligned} \quad (5.25)$$

Hodnoty THD pro většinu reproduktorů nepřesahují 5%, avšak předpokladem je větší nárůst zkreslení při zvýšení příkonu reproduktorů. Vybuzením měřených reproduktorů příkonem 1 W jsou hodnoty THD velice příznivé, kdy hodnoty zkreslení reproduktorů Eminence a Jensen nepřesahují 1%. Reproduktory Celestion jsou na tom o něco hůře. Konkrétně reproduktor Celestion Classic Vintage 30 má harmonické zkreslení 2,46%. Měření

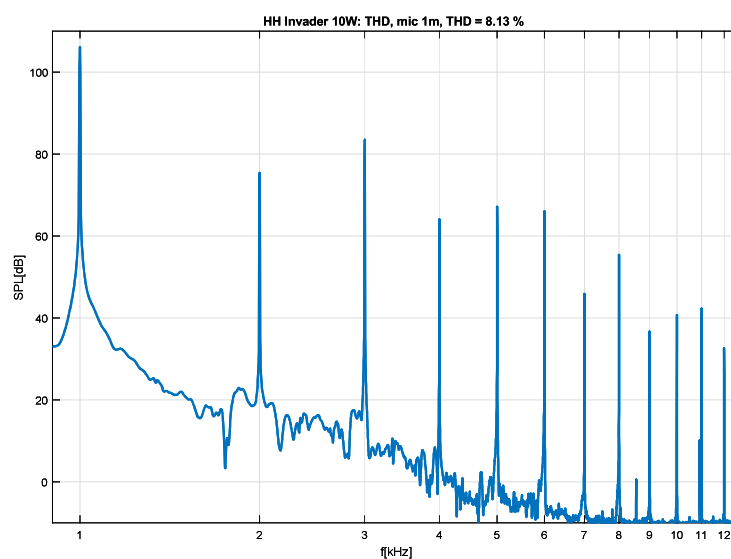
příkonem 10 W přináší dle očekávání vyšší hodnoty zkreslení. Reprodukory Jensen p12R a HH Invader vykazují značný nárůst zkreslení v porovnání s ostatními reproduktory.

Vysoké harmonické zkreslení reproduktoru HH Invader je způsobeno poškozenou membránou. Při malém vybuzení se harmonické zkreslení projevuje méně. Vzhledem k průměru membrány jsou výchylky dostatečně malé a zkreslení způsobené poškozenou membránou není tak výrazné. V případě většího vybuzení jsou výchylky membrány již dostatečně velké a nerovnoměrnost způsobená poškozenou membránou vykazuje nárůst zkreslení.

Grafy FFT analýzy reproduktorů Eminence Legend 1218 a HH Invader vybuzené příkonem 10 W jsou zobrazené na obrázcích 5.20 a 5.21. Na těchto grafech je možné pozorovat vyšší harmonické jednotlivých reproduktorů.



Obr. 5.20: Eminence Legend 1218 při 10 W



Obr. 5.21: HH Invader při 10 W

# 6

## Závěr

Cílem práce bylo prostudovat parametry reproduktorů, vybrat vhodné parametry pro kytarové reproduktory a následně je změřit. Přehled všech základních parametrů byl předmětem třetí kapitoly. Popsán byl význam parametrů a jejich odvození.

Vybrány byly parametry: amplitudová kmitočtová charakteristika, impedanční charakteristika, směrové charakteristiky, TS parametry a harmonické zkreslení THD. Principy měření těchto parametrů byly popsány ve čtvrté kapitole, kde bylo vždy udáno několik možností měření.

V poslední kapitole bylo popsáno měření vybraných parametrů pro kytarové reproduktory v prostorách bezodrazové komory Západočeské univerzity. Ke každému měření byl uveden postup a případně výpočet parametrů z naměřených hodnot.

Prozkoumáním výsledků měření bylo možné pozorovat jisté podobnosti, které byli viditelné zejména na amplitudových kmitočtových charakteristikách. Špičky, které se zde vyskytují nejsou náhodné a jejich velikost určuje výsledný zvukový vjem. Příkladem může být reproduktor Eminence Legend 1218, který měl oproti reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 výraznější nižší kmitočty, tzn. že bude hrát „hlouběji“.

Elektrická kytara pracuje v pásmu 75 Hz - 5 kHz a kytarové reproduktory toto pásmo do jisté míry kopírují. V tolerančním pásmu  $\pm 6$  dB dosahovaly reproduktory horních mezních kmitočtů v rozmezí 5300 Hz - 6800 Hz. Reproduktor Celestion Classic Vintage 30 dosahoval nejvyššího horního mezního kmitočtu a měl tudíž „ostřejší“ zvuk nežli ostatní testované vzorky. Spodní mezní kmitočty se pohybovaly v rozmezí 58 Hz - 84 Hz. V daném tolerančním pásmu dokázal nejnižší pracovat reproduktor Jensen p12R.

Směrové charakteristiky ukazují dominanci reproduktoru Jensen p12R na nízkých kmitočtech, kde ve srovnání s ostatními reproduktory dokáže produkovat vyšší hladinu akustického tlaku. Zvyšováním kmitočtu však dominanci ztrácel a na středních kmitočtech vyzařovaly všechny testované reproduktory velice podobně. Větší směrovost bylo možné pozorovat počínaje kmitočty v okolí 2000 Hz, kde nejvyšší hladiny tlaku v referenčním bodě vykazoval reproduktor Celestion Classic Vintage 30. Obecně směrovost testovaných reproduktorů na vyšších kmitočtech nebyla symetrická.

Citlivost testovaných reproduktorů se pohybovala v rozmezí 94 - 98 dB. Nejméně citlivý reproduktor byl Jensen p12R z důvodu osazení jiného druhu magnetu. Nejcitlivějšími a zároveň i nejhlasitějšími byly oba reproduktory Celestion, které měly i velice podobný průběh amplitudových kmitočtových charakteristik.

Výpočtem citlivosti pomocí TS parametrů vycházely hodnoty menší nežli hodnoty získané z amplitudových kmitočtových charakteristik. Takový rozdíl je předpokládán, avšak reproduktor HH Invader tento předpoklad nespĺňoval. Snížená citlivost byla dána stářím reproduktoru.

Při výběru reproduktoru je zajímavým parametrem ekvivalentní objem, zejména při výměně reproduktoru ve stávajícím aparátu. Hodnota ekvivalentního objemu u většiny reproduktorů přesahovala 50 l. Výjimkou byl reproduktor Eminence Legend 1218 s podstatně nižší hodnotou ekvivalentního objemu 22 l. Tento reproduktor je možné umístit do aparátů menších rozměrů.

Dalším zajímavým parametrem bylo harmonické zkreslení THD, které vzrůstalo s dodaným příkonem. Největších hodnot THD dosahoval reproduktor HH Invader. Tento reproduktor měl poškozenou membránu, tudíž bylo zajímavé pozorovat vliv membrány právě na zkreslení. Se zvýšením příkonu vzrostlo zkreslení tohoto reproduktoru čtyřnásobně. Ostatní testované vzorky vykazovaly průměrně dvojnásobný nárůst zkreslení se zvýšením příkonu.

Při pohledu na výsledky parametrů klasickým způsobem, tzn. že reproduktor nesmí ovlivnit výsledný akustický vjem, by žádný testovaný kytarový reproduktor nevyhověl. Avšak úvodem bylo řečeno, že kytarové reproduktory nejsou určeny k věrné reprodukci, ale k tvorbě hudby. Tudíž se dají tyto „špatné“ parametry brát jako vlastnosti, které jsou pro každý kytarový reproduktor specifické.

Veškeré výsledky měření včetně katalogových listů, které jsou výstupem této práce, jsou obsaženy v přílohách.

# Literatura

- [1] Svoboda, L., Štefan, M. *Reproduktory a reproduktorové soustavy*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976. ISBN 04-503-83.
- [2] Smetana, C. *Praktická elektroakustika*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [3] Škvor, Z. *Akustika a elektroakustika*. Praha: Academia, 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [4] Toman, K. *Reproduktory a reprosoustavy*. Karviná: DEXON, 2001.
- [5] Metzler B. *Audio measurement handbook*. Beaverton, Oregon U.S.A.: Audio Precision, 2005.
- [6] Sýkora B. *Stavíme reproduktorové soustavy I-XLVIII*. Praha: Seriál časopisu Amaterské rádio, 1997-2001.
- [7] Vlachý V. *Praxe zvukové techniky 3.*, aktualiz. a dopl. vyd. Praha: Muzikus, 2008. ISBN 978-80-86253-46-6.
- [8] ČSN EN 60268-5. *Elektroakustická zařízení - Část 5: Reproduktory* Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [9] Amatérské rádio: *časopis pro elektroniku č.5* Ř. B, Pro konstruktéry. Praha: Magnet, 1993. ISSN 0139-7087.
- [10] *Flemingovo pravidlo levé ruky*. Wikiskripta [online]. 2014. [Cit. 18. 5. 2017]. Dostupné z: [http://www.wikiskripta.eu/index.php/Flemingovo\\_pravidlo\\_levé\\_ruky](http://www.wikiskripta.eu/index.php/Flemingovo_pravidlo_levé_ruky).
- [11] *Thiele/Small parameters*. Wikipedia [online], 2017. [Cit. 18. 5. 2017]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small\\_parameters](https://en.wikipedia.org/wiki/Thiele/Small_parameters).
- [12] *Reproduktor*. Wikipedia [online], 2017. [Cit. 18. 5. 2017]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Reproduktor>.
- [13] *Směrová charakteristika reproduktoru*. Fyzika :: MEF [online], 2017. [Cit. 18. 5. 2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/393-smerova-charakteristika-reproduktoru>.

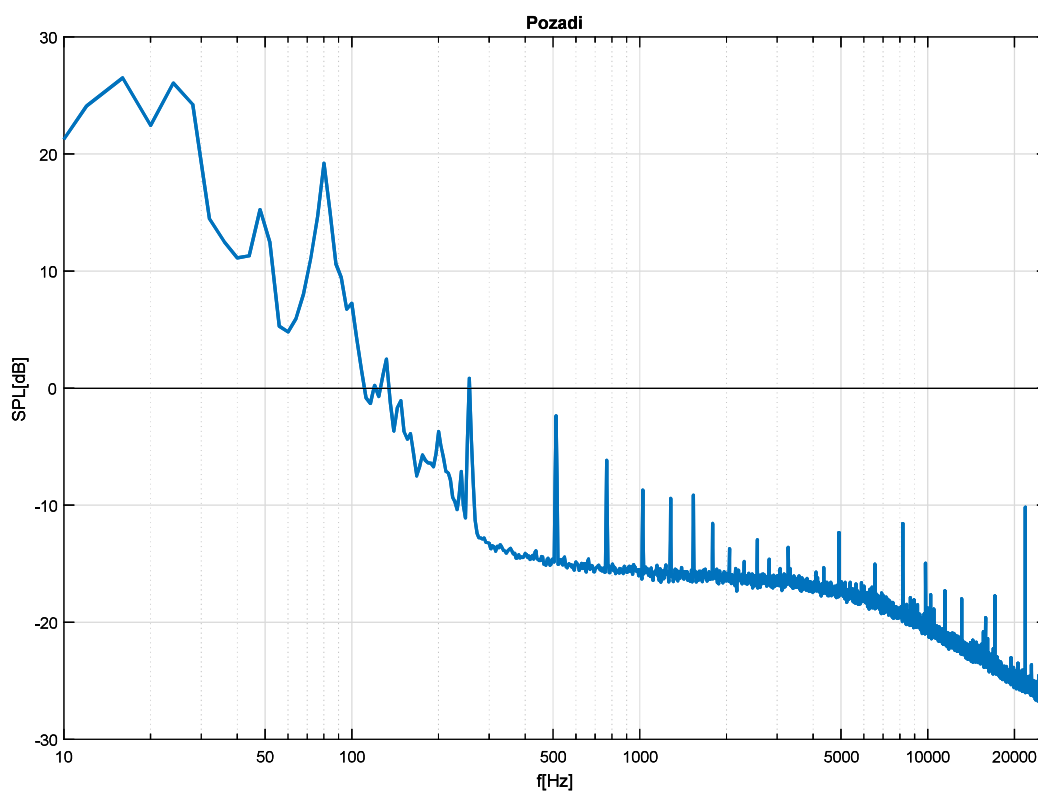
- [14] *Specifikace materiálu : Nomex*. Odetka a.s [online], 2016. [Cit. 18. 5. 2017]. Dostupné z: [http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat\\_nomex.aspx](http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_nomex.aspx).
- [15] *Poloprostor*. Wikipedia [online], 2013. [Cit. 20. 5. 2017]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Poloprostor>.
- [16] *Voice coil*. Wikipedia [online], 2016. [Cit. 20. 5. 2017]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Voice\\_coil](https://en.wikipedia.org/wiki/Voice_coil).
- [17] *Classic - Vintage 30*. Celestion [online], 2017. [Cit. 02.06.2017]. Dostupné z: [http://celestion.com/product/1/vintage\\_30/](http://celestion.com/product/1/vintage_30/).
- [18] *Classic Lead 80*. Celestion [online], 2017. [Cit. 02.06.2017]. Dostupné z: [http://celestion.com/product/18/classic\\_lead/](http://celestion.com/product/18/classic_lead/).
- [19] *LEGEND 1218*. Eminence Speaker [online], 2017. [Cit. 02.06.2017]. Dostupné z: [http://www.eminence.com/speakers/speaker-detail/?model=Legend\\_1218](http://www.eminence.com/speakers/speaker-detail/?model=Legend_1218).
- [20] *P12R — Jensen Loudspeakers*. Jensen Loudspeakers [online], 2016. [Cit. 18. 5. 2017]. Dostupné z: [https://www.jensentone.com/vintage\\_alnico/p12r](https://www.jensentone.com/vintage_alnico/p12r).



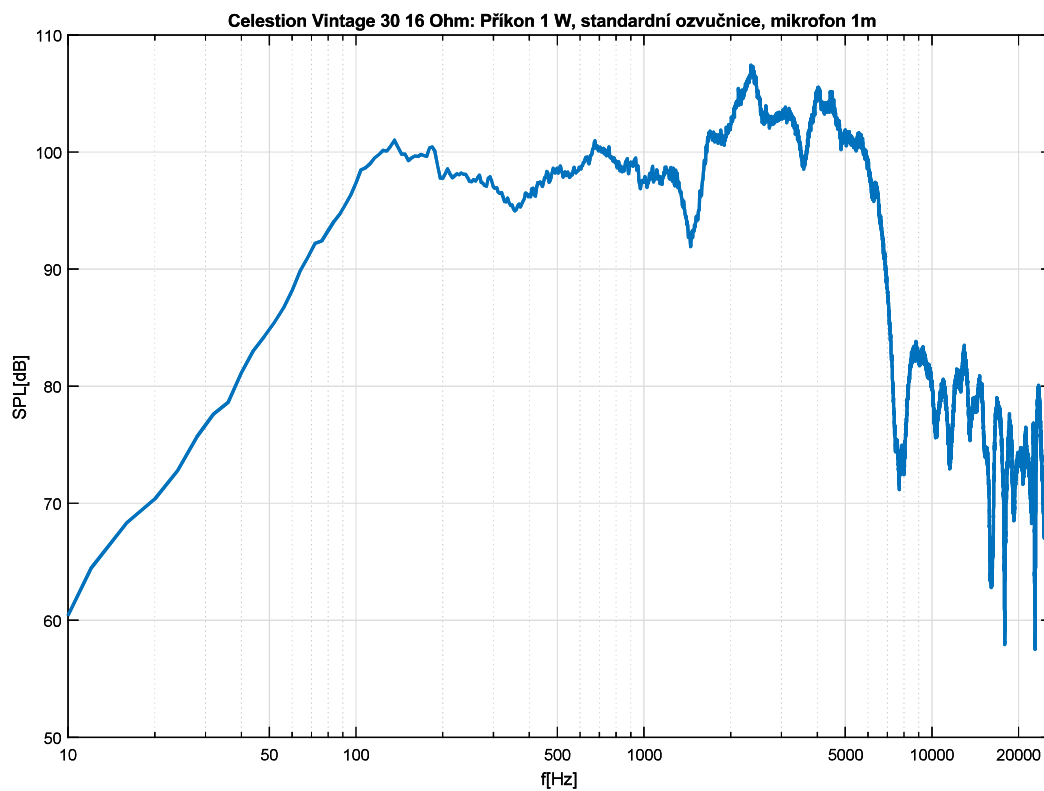
# Příloha A

## Amplitudové kmitočtové charakteristiky

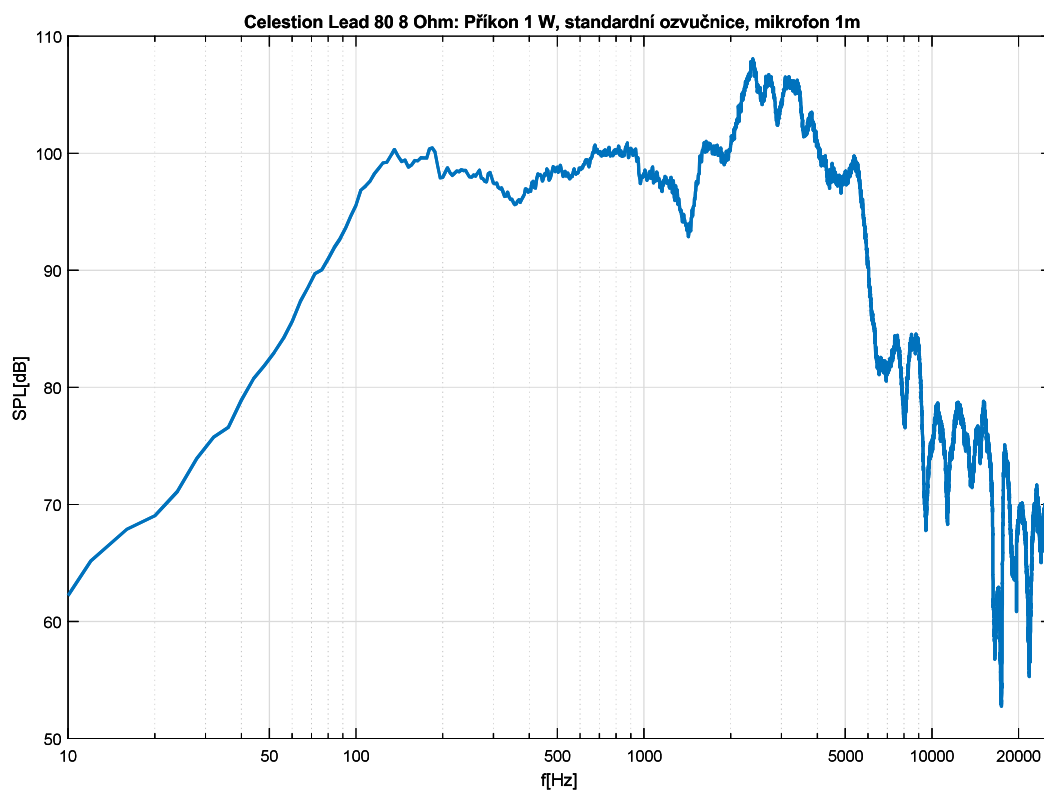
### A.1 Měření citlivosti



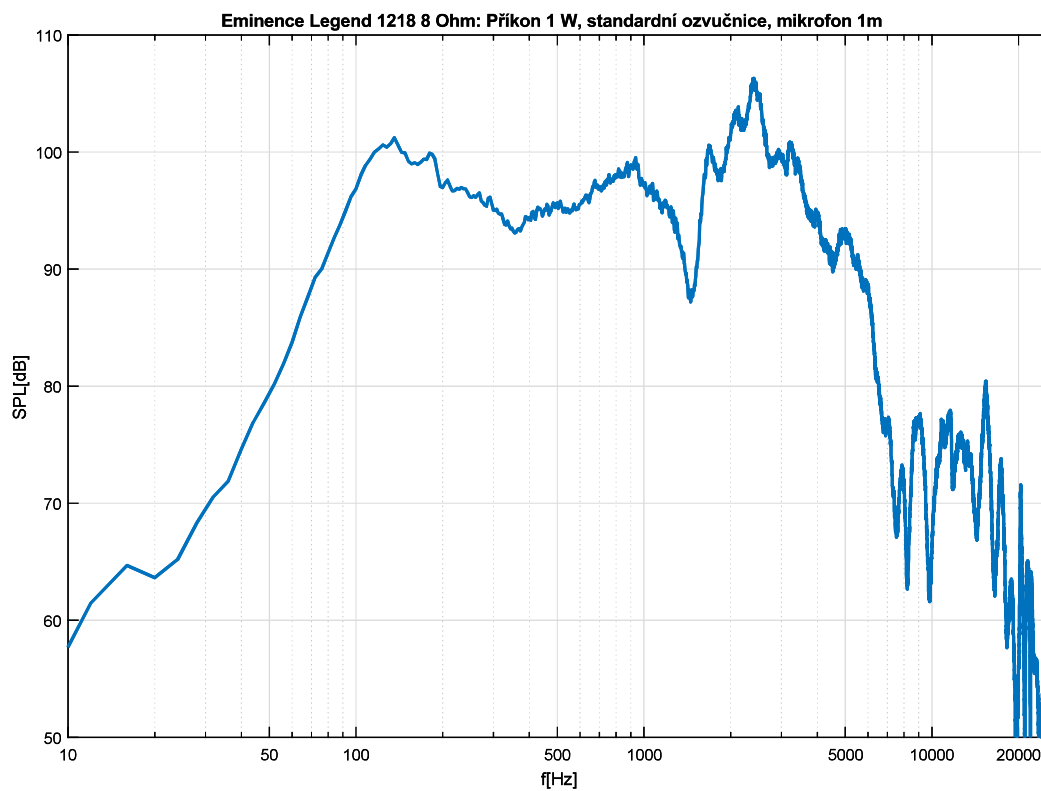
Obr. A.1: Ampl. kmitočtová charakteristika pozadí bezodrazové komory



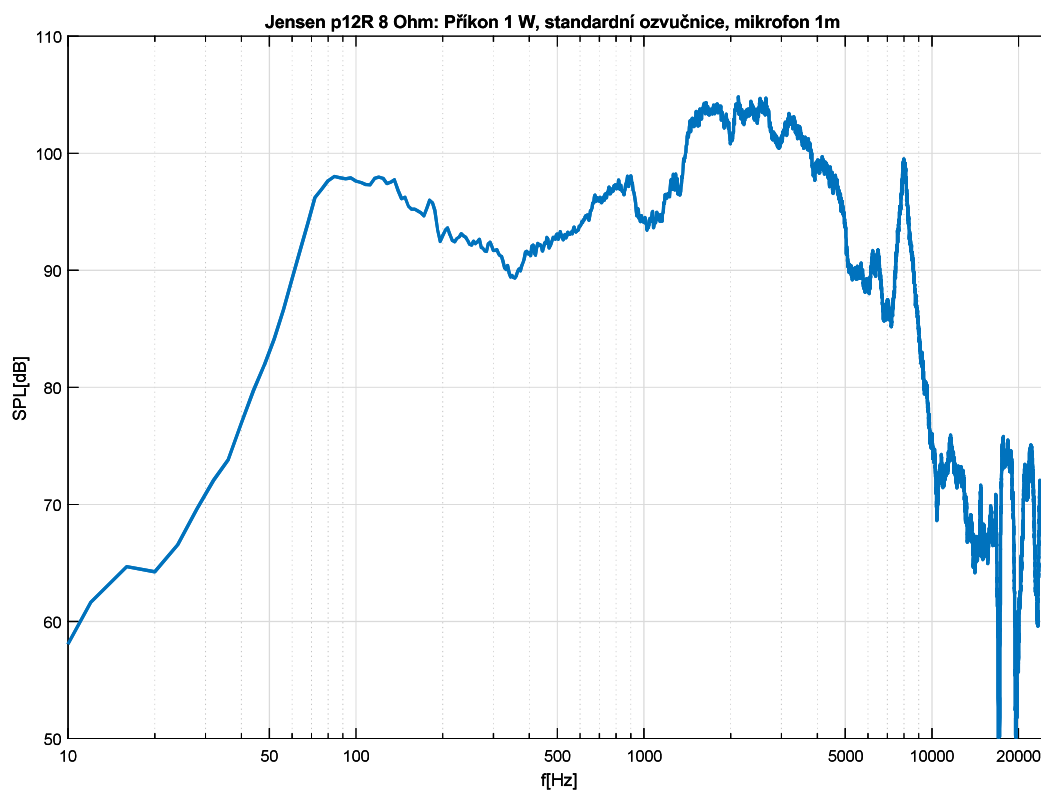
**Obr. A.2:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30



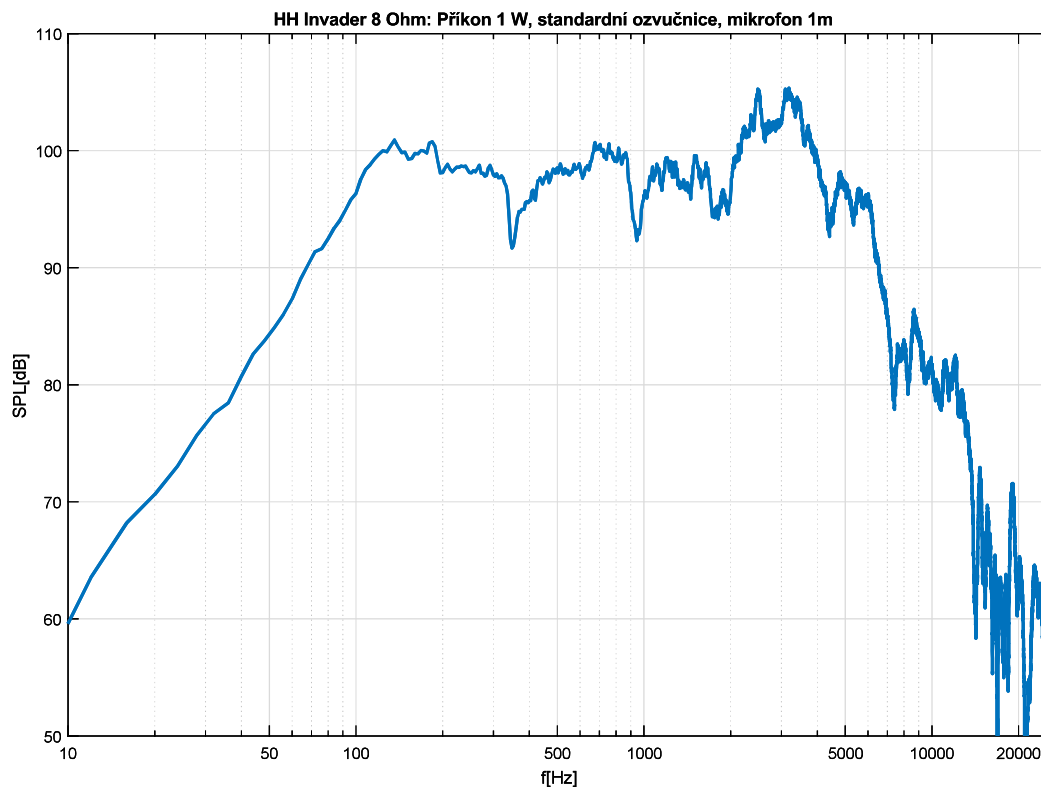
**Obr. A.3:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 měřená v 1m příkonem 1W



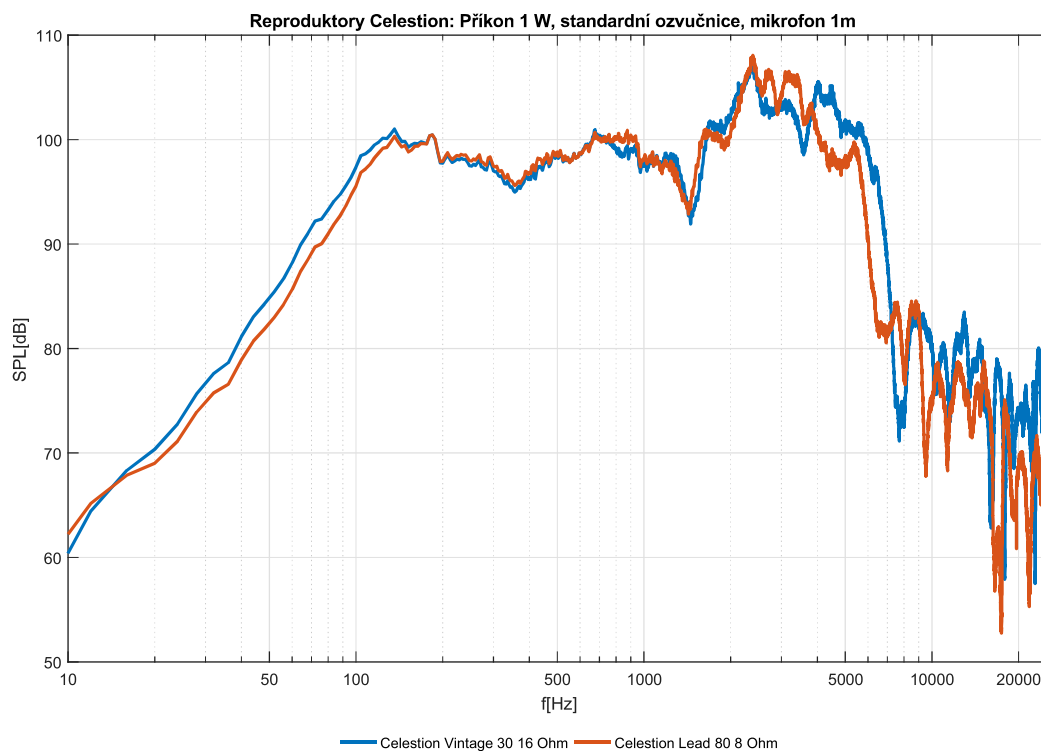
**Obr. A.4:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Eminence Legend 1280 měřená v 1m příkonem 1W



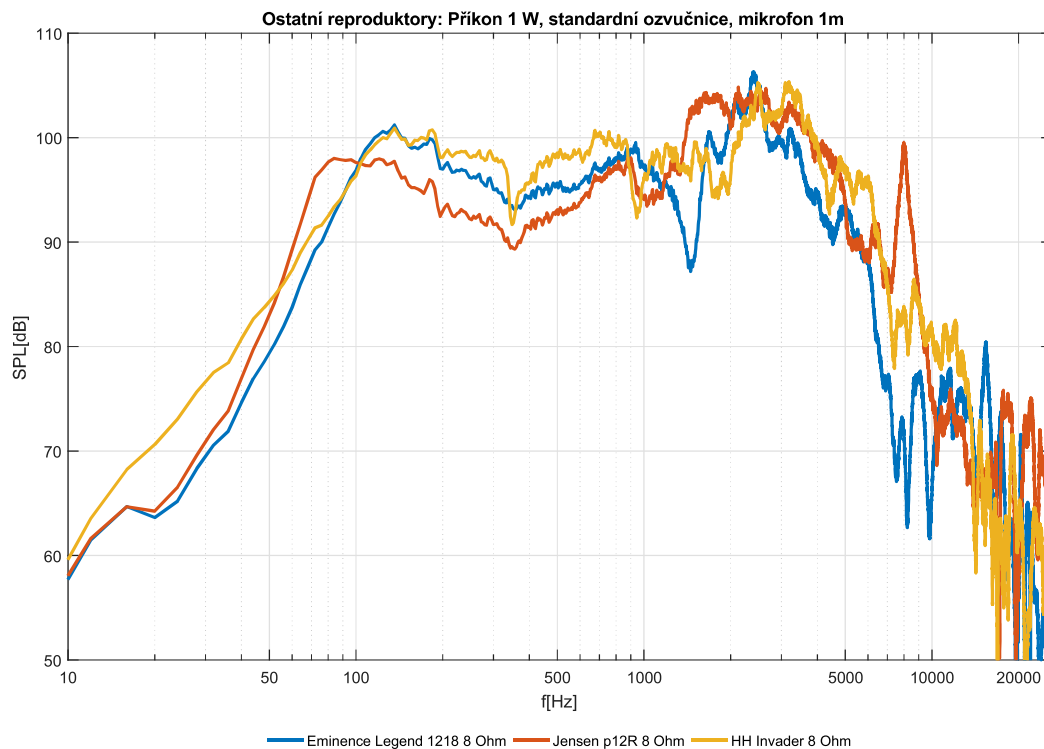
**Obr. A.5:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Jensen p12R měřená v 1m příkonem 1W



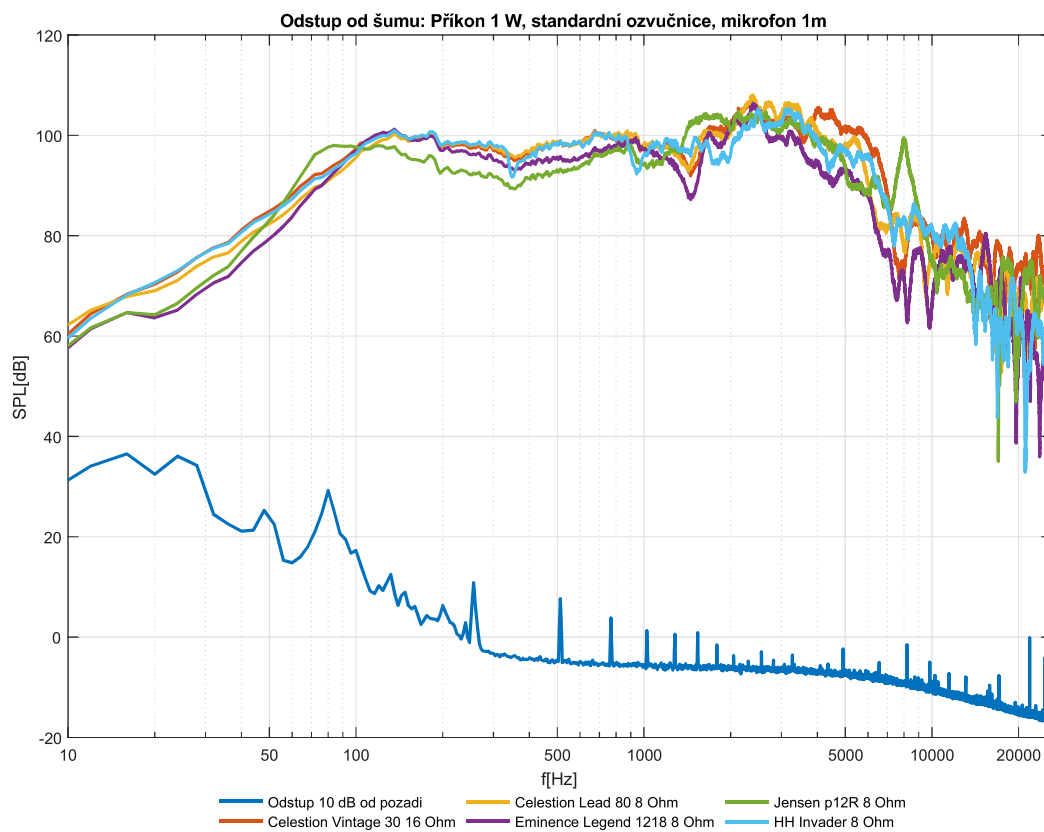
Obr. A.6: Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru HH Invader měřená v 1m příkonem 1W



Obr. A.7: Porovnání ampl. kmitočtových charakteristik kytarových reproduktorů Celestion měřených v 1m příkonem 1 W

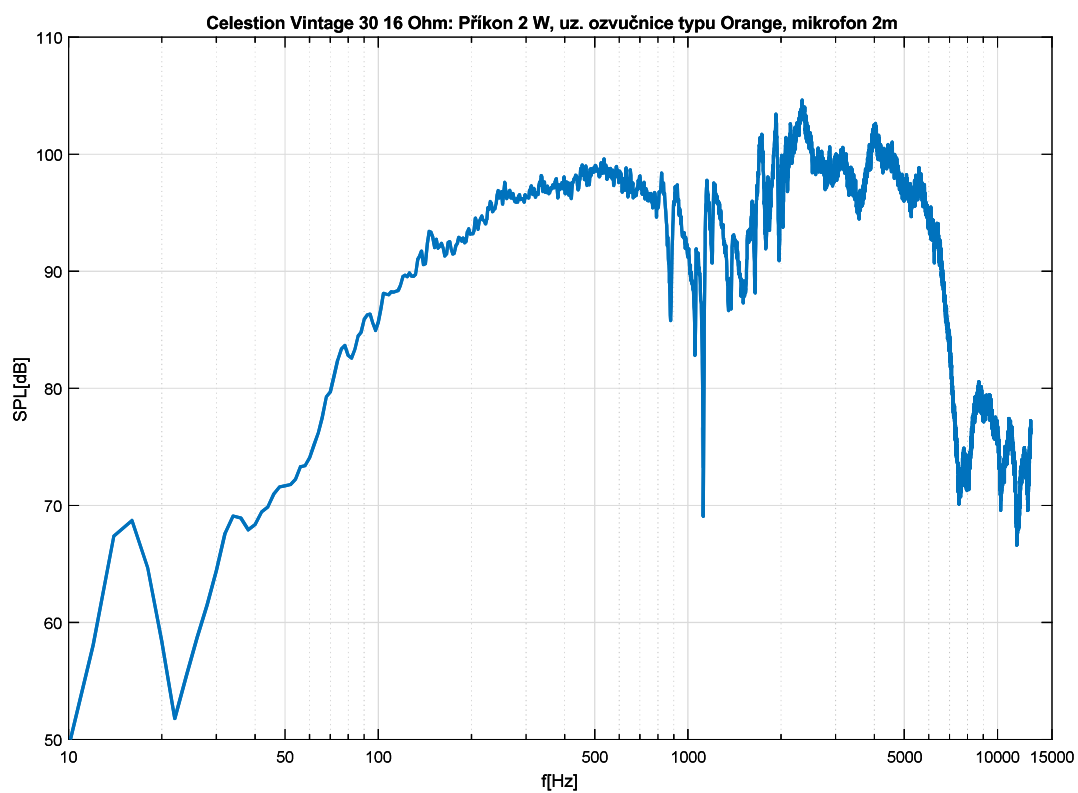


**Obr. A.8:** Porovnání ampl. kmitočtových charakteristik kytarových reproduktorů minence Legend 1280, Jensen p12R a HH Invader měřených v 1m příkonem 1 W

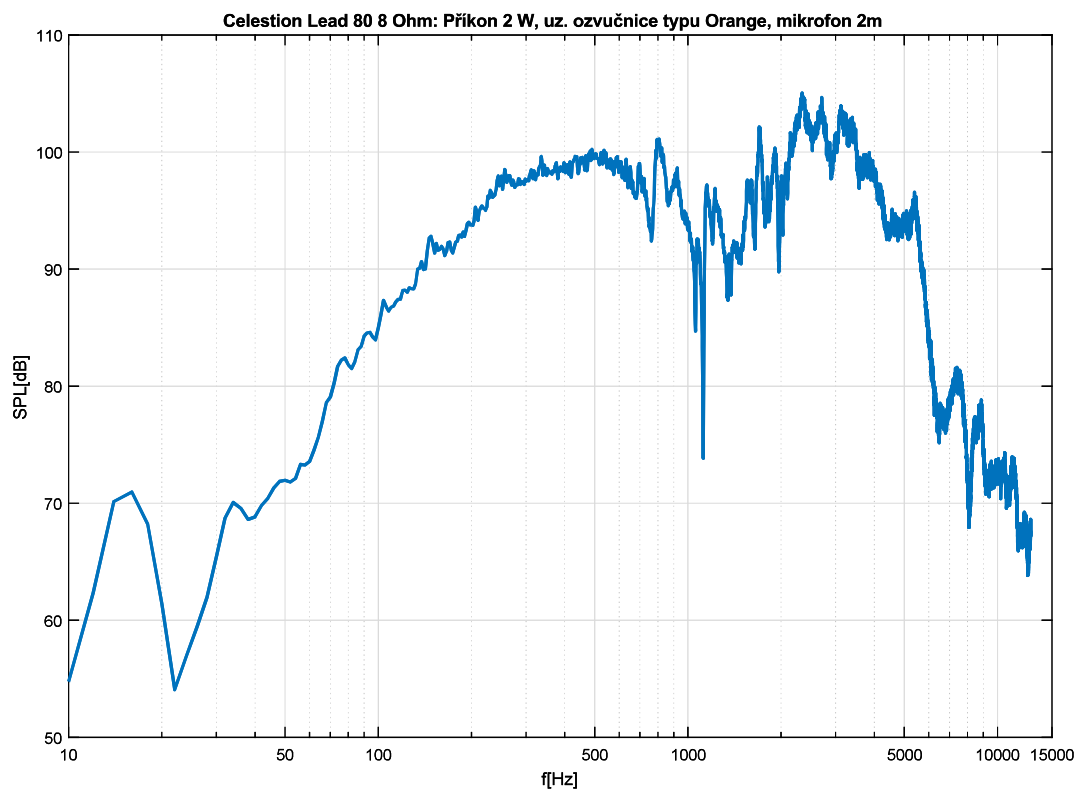


**Obr. A.9:** Odstup od šumu při měření v bezdrazové komoře

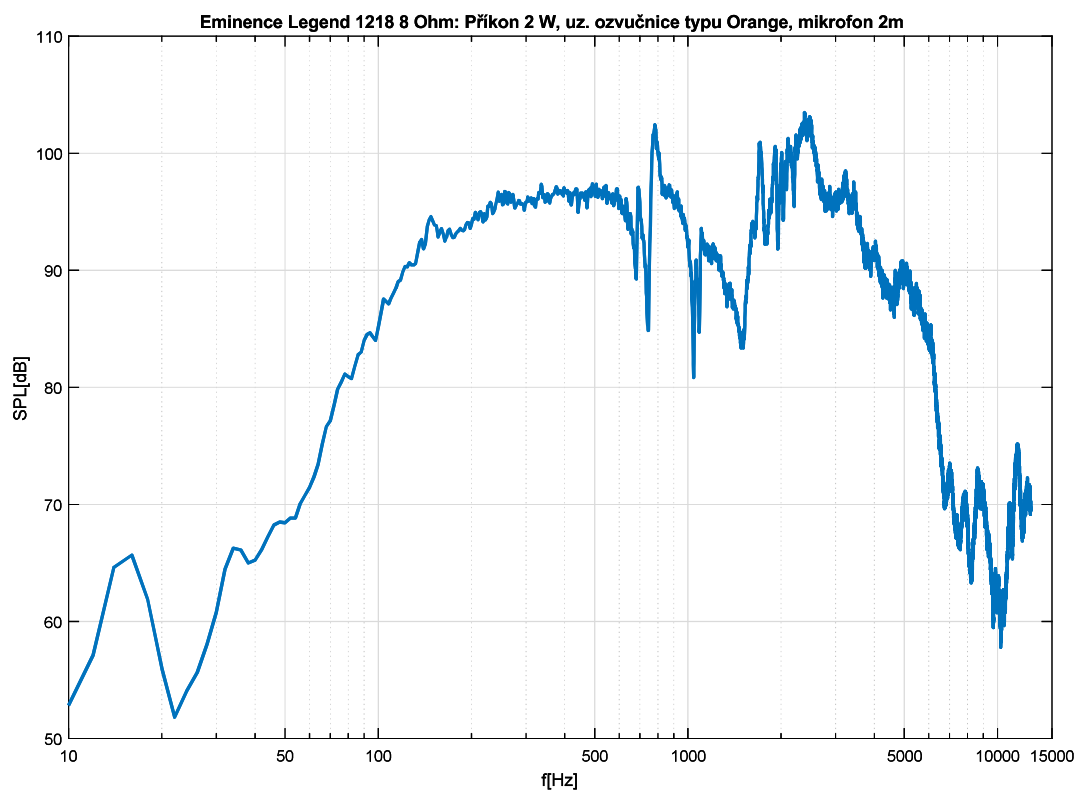
## A.2 Amplitudové kmitočtové charakteristiky v uzavřené ozvučnici



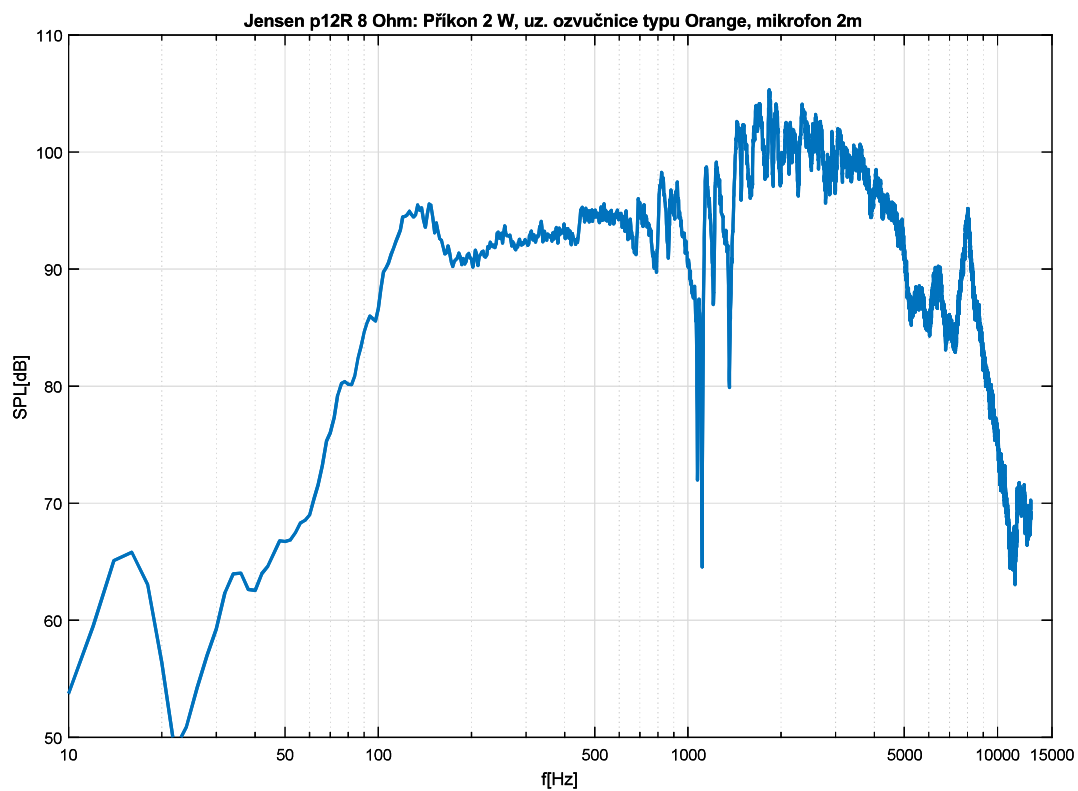
**Obr. A.10:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W



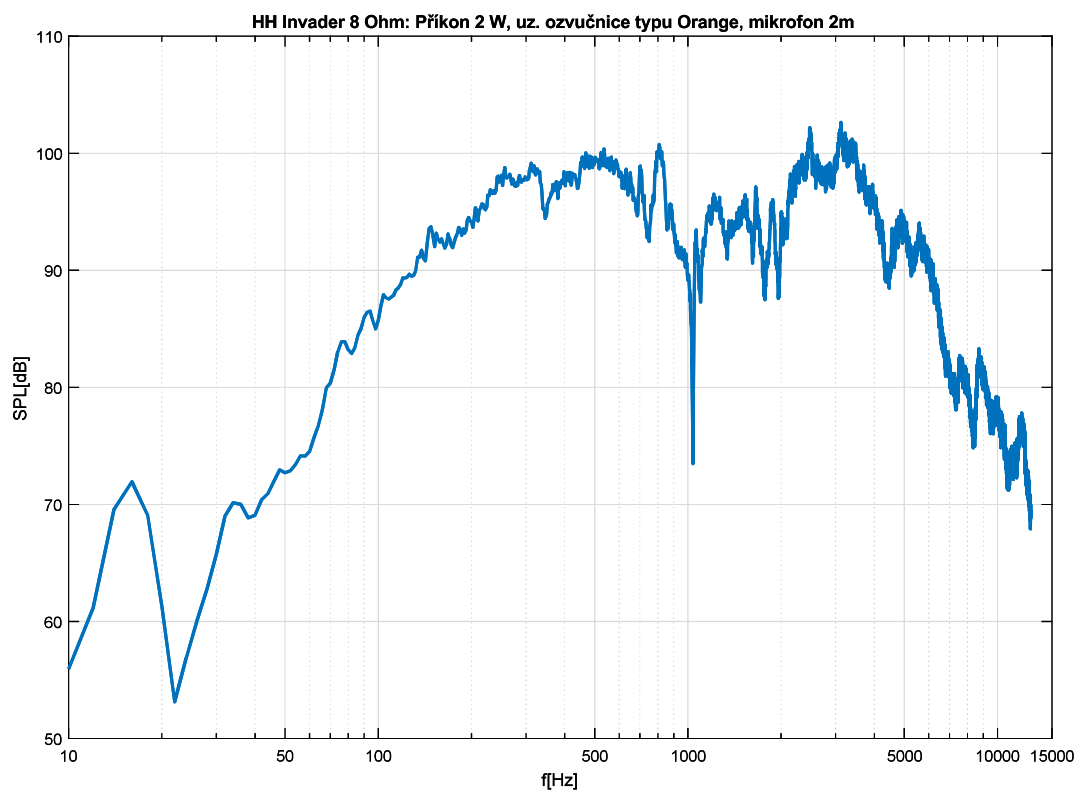
**Obr. A.11:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W



**Obr. A.12:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Eminence Legend 1280 v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W

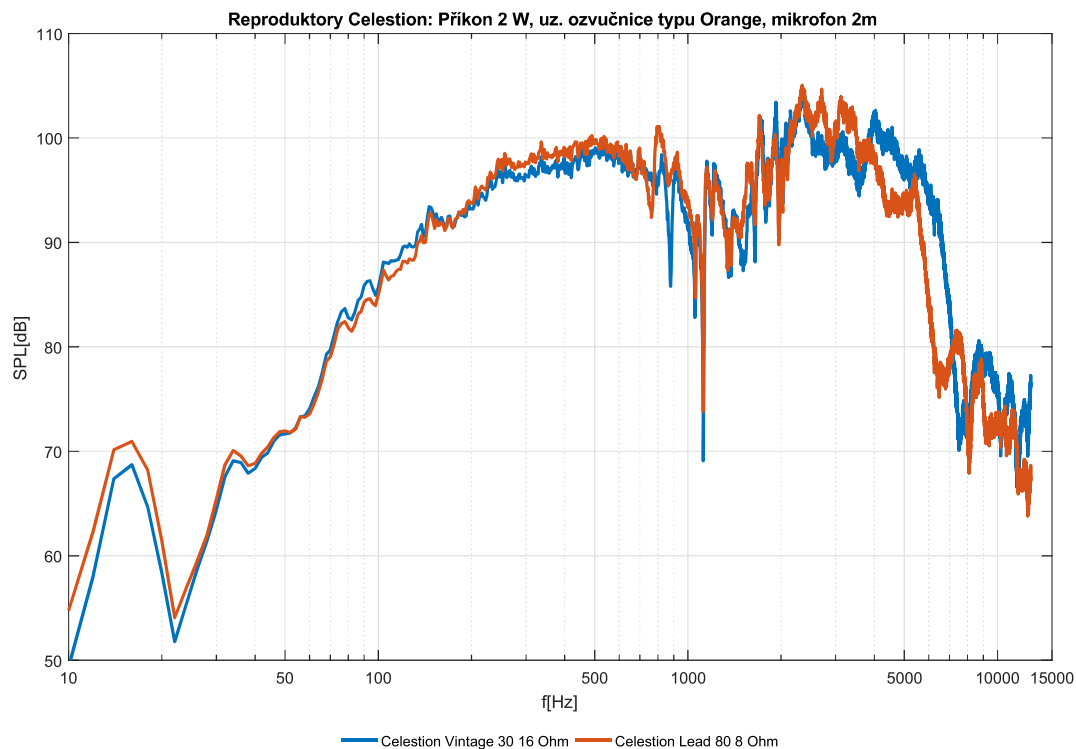


**Obr. A.13:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Jensen p12R v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W

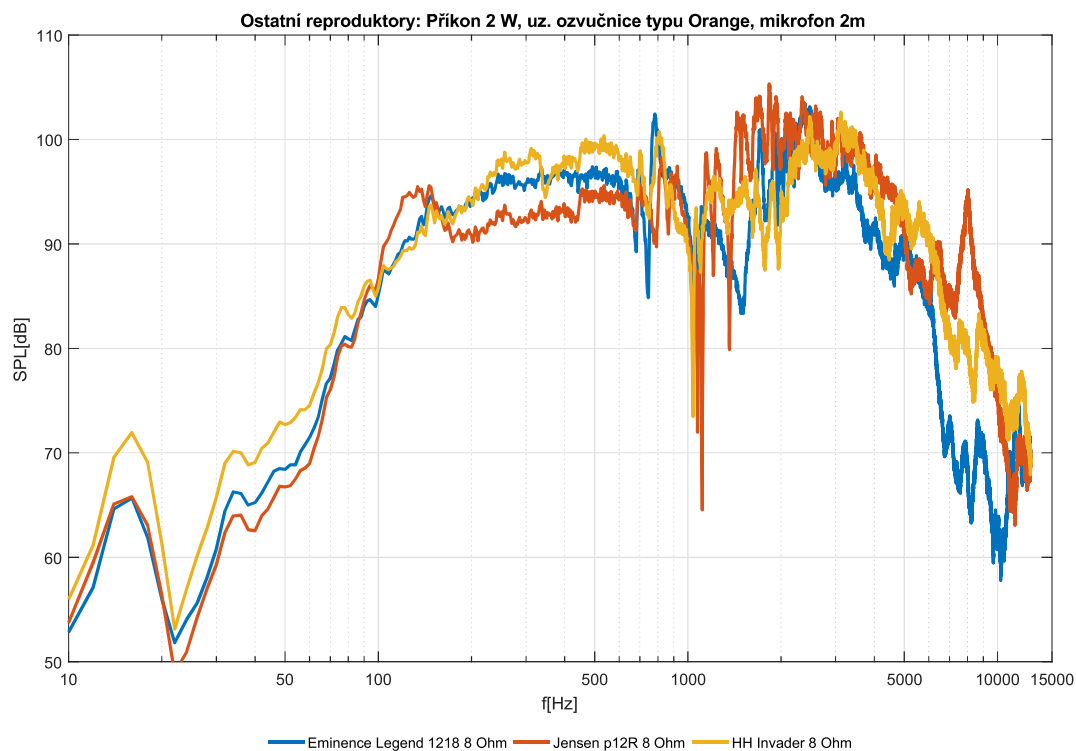


**Obr. A.14:** Ampl. kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru HH Invader v uzavřené ozvučnici měřená ve 2m příkonem 2W





**Obr. A.15:** Porovnání ampl. kmitočtových charakteristik kytarových reproduktorů Celestion v uzavřené ozvučnici měřených ve 2m příkonem 2 W

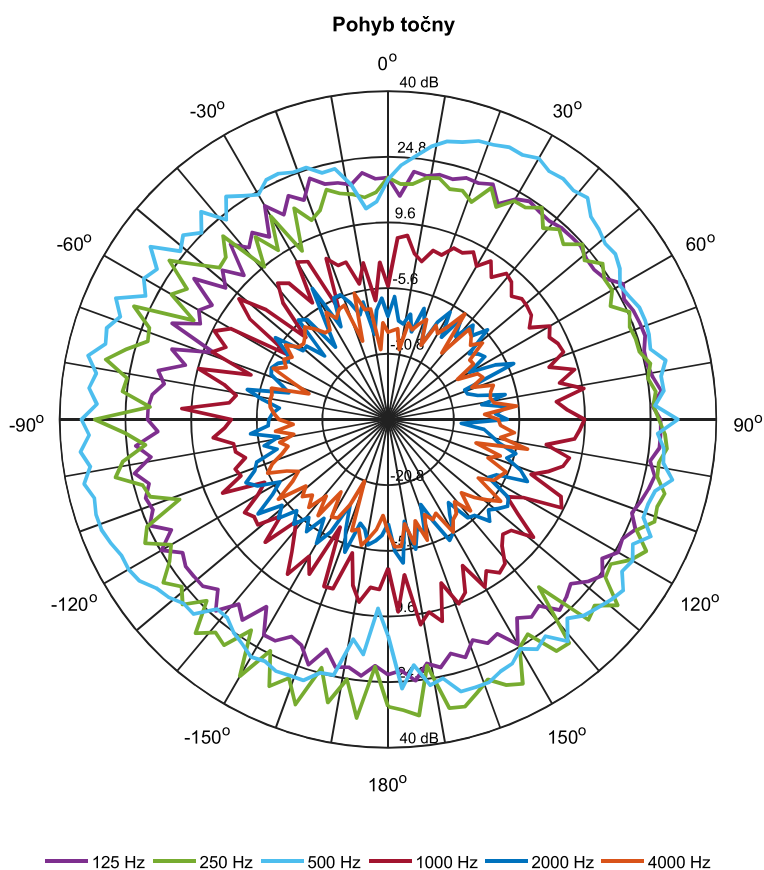


**Obr. A.16:** Porovnání ampl. kmitočtových charakteristik kytarových reproduktorů minence Legend 1280, Jensen p12R a HH Invader v uzavřené ozvučnici měřených ve 2m příkonem 2 W

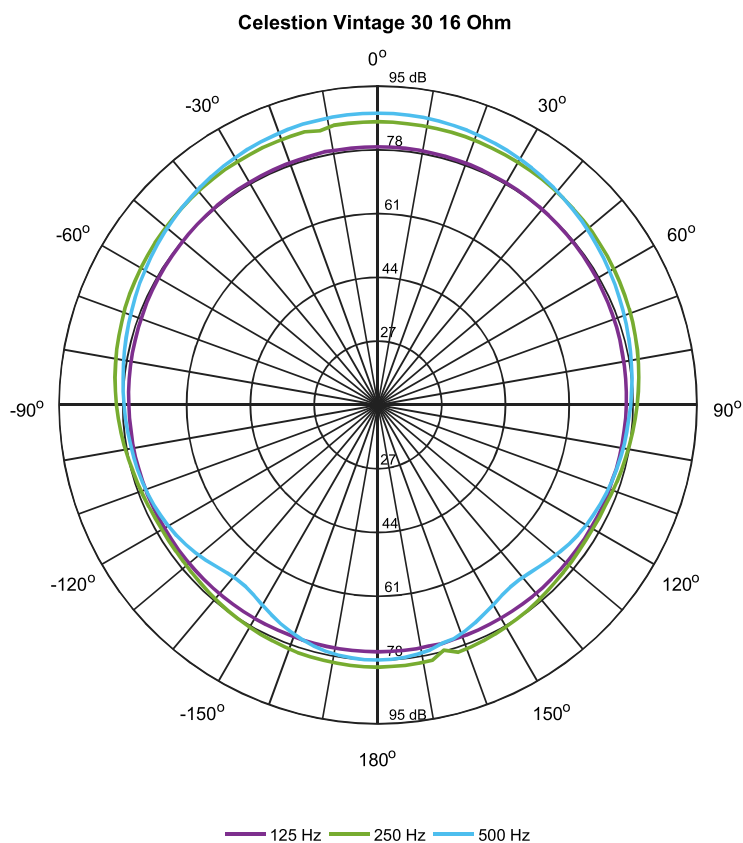
# Příloha B

## Směrové charakteristiky

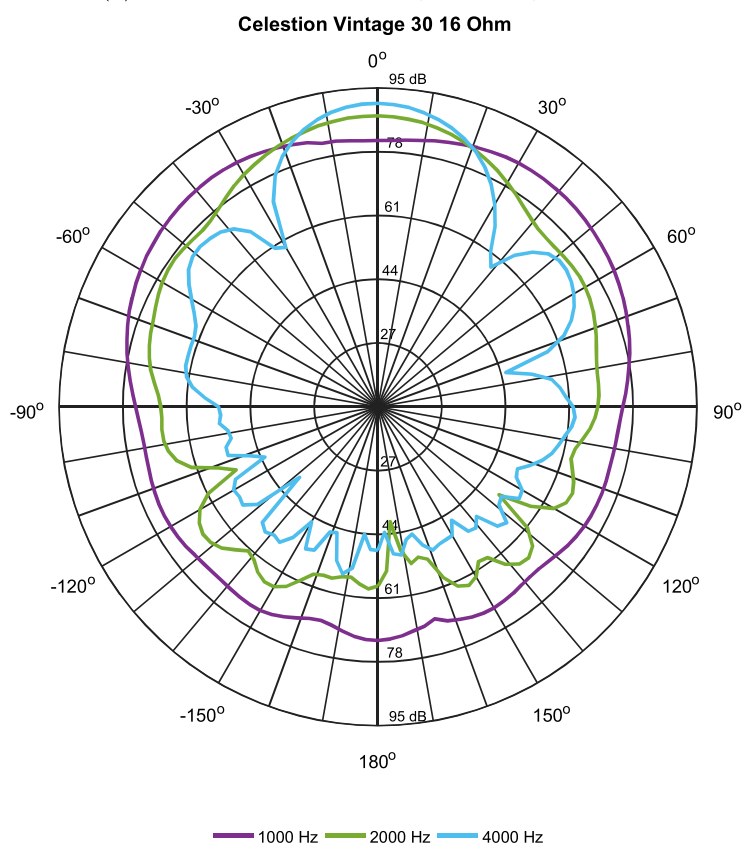
### B.1 Směrové charakteristiky pro střední kmitočty ok-távových pásem



Obr. B.1: Směrové vyzařování točny

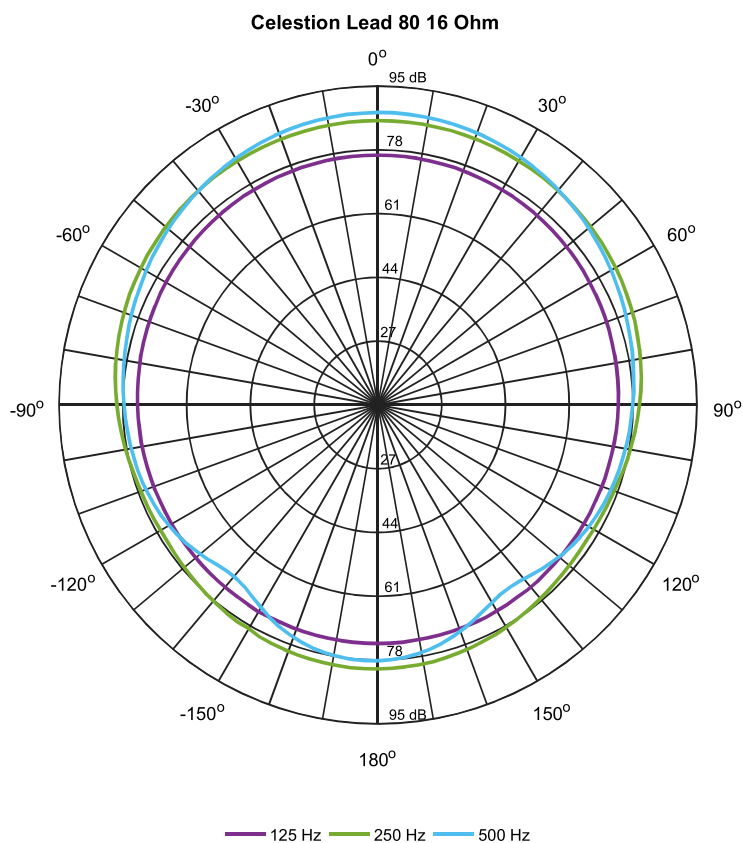


(a) První 3 střední kmitočty oktávových pásem

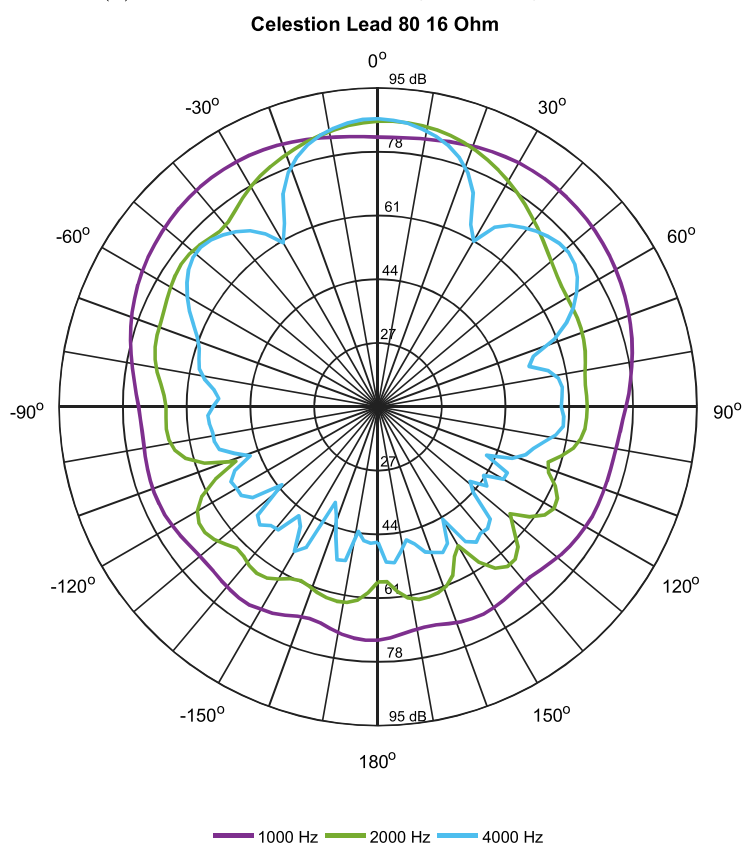


(b) Čtvrtý, pátý a šestý střední kmitočty oktávových pásem

**Obr. B.2:** Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30

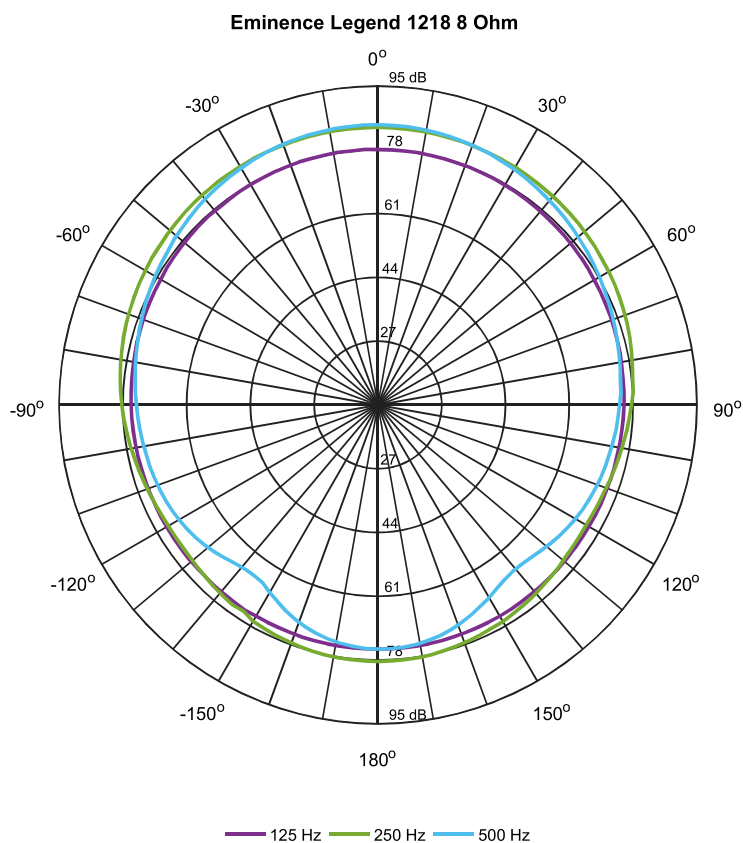


(a) První 3 střední kmitočty oktávových pásem

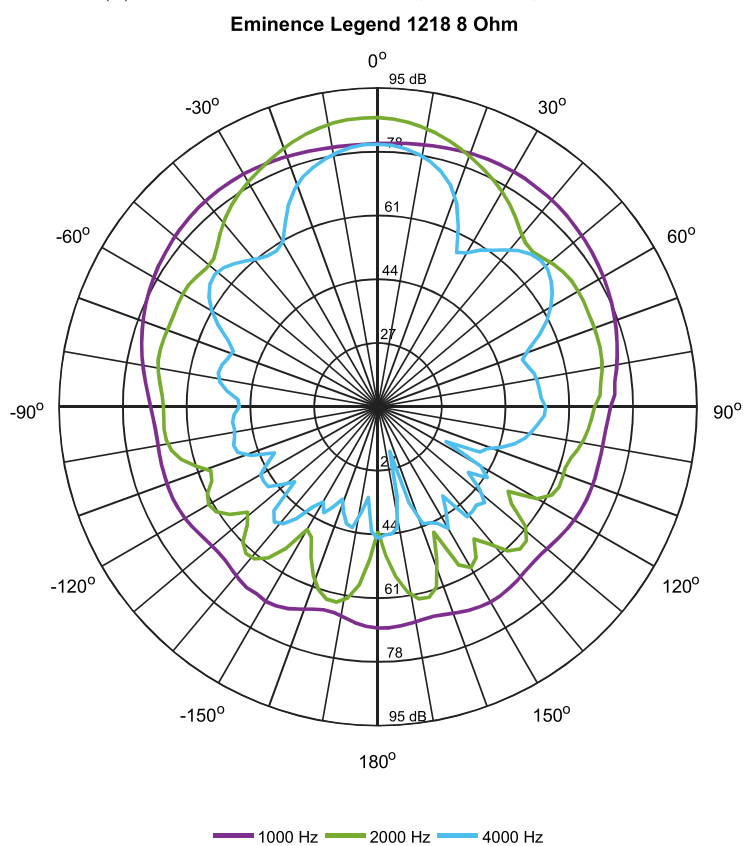


(b) Čtvrtý, pátý a šestý střední kmitočet oktávových pásem

**Obr. B.3:** Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80

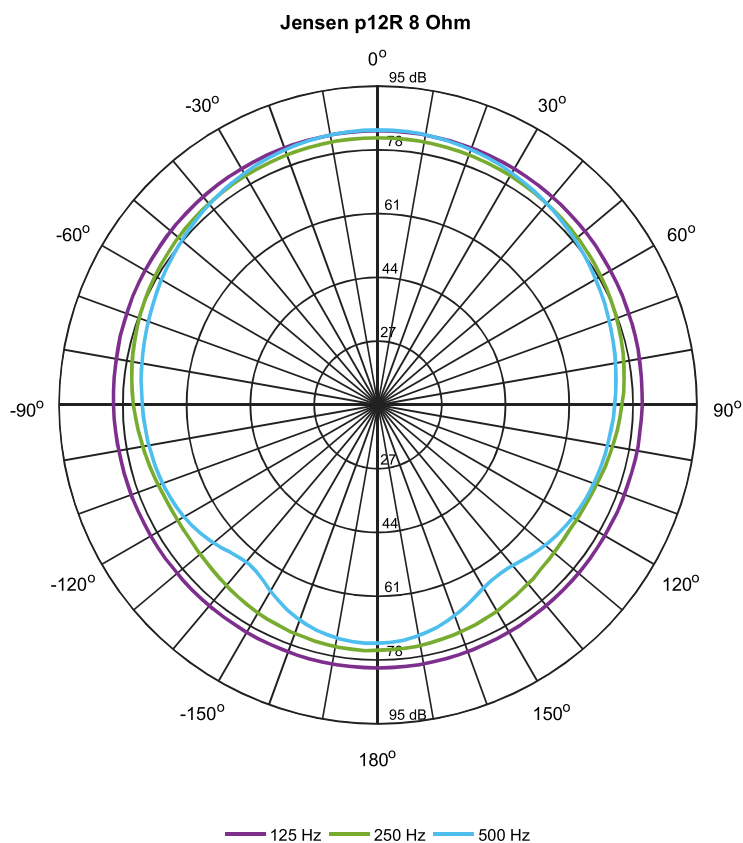


(a) První 3 střední kmitočty oktávových pásem

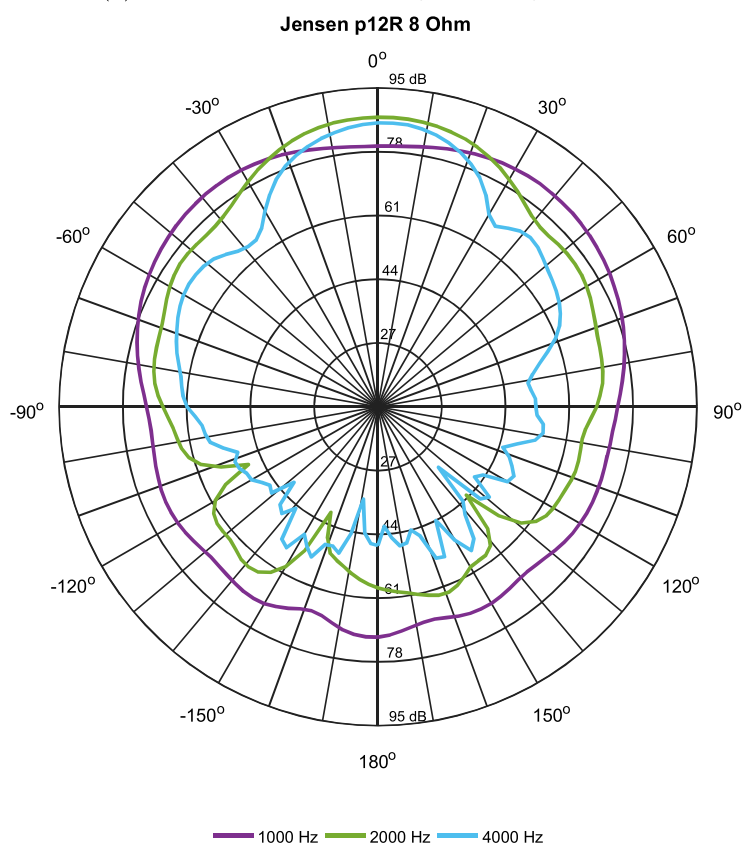


(b) Čtvrtý, pátý a šestý střední kmitočet oktávových pásem

**Obr. B.4:** Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru Eminence Legend 1280

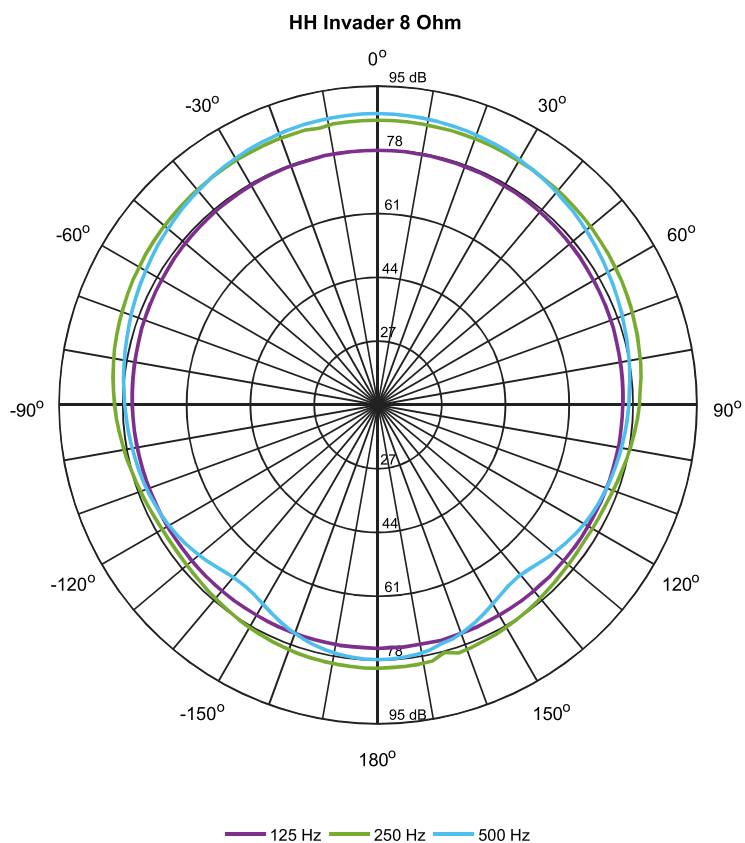


(a) První 3 střední kmitočty oktávových pásem

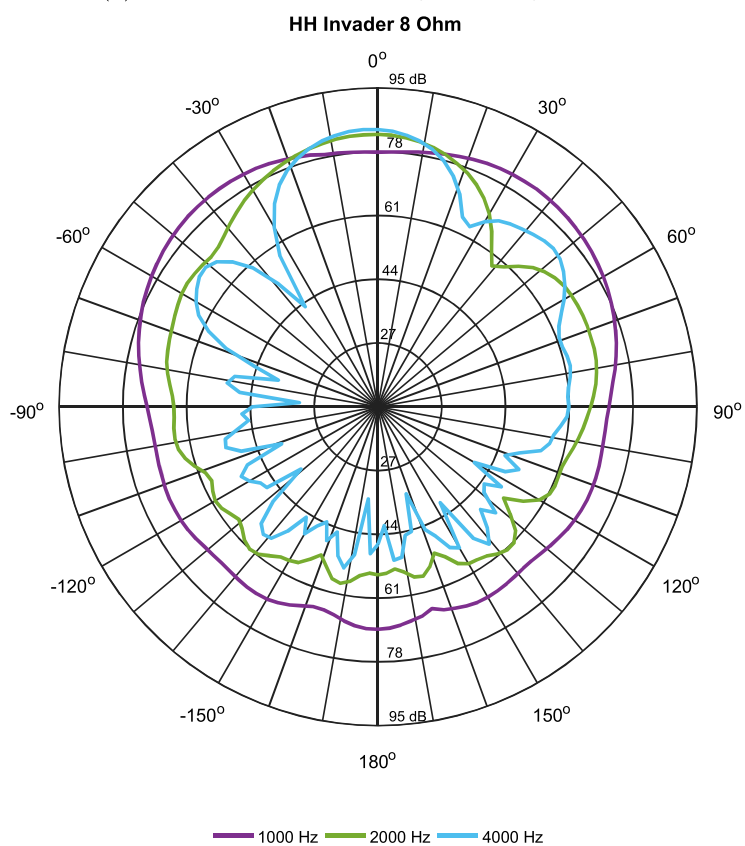


(b) Čtvrtý, pátý a šestý střední kmitočty oktávových pásem

**Obr. B.5:** Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru Jensen p12R



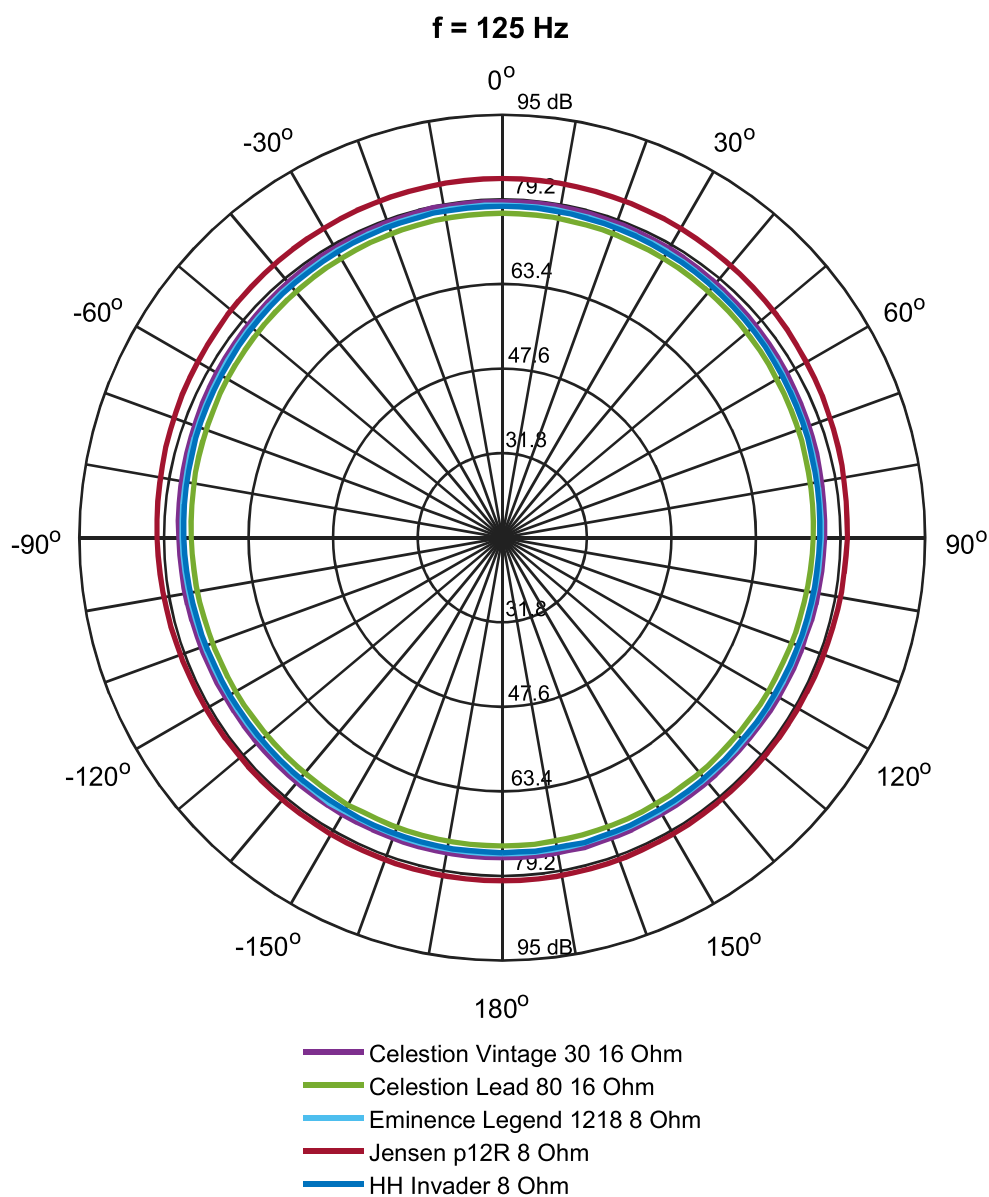
(a) První 3 střední kmitočty oktávových pásem



(b) Čtvrtý, pátý a šestý střední kmitočet oktávových pásem

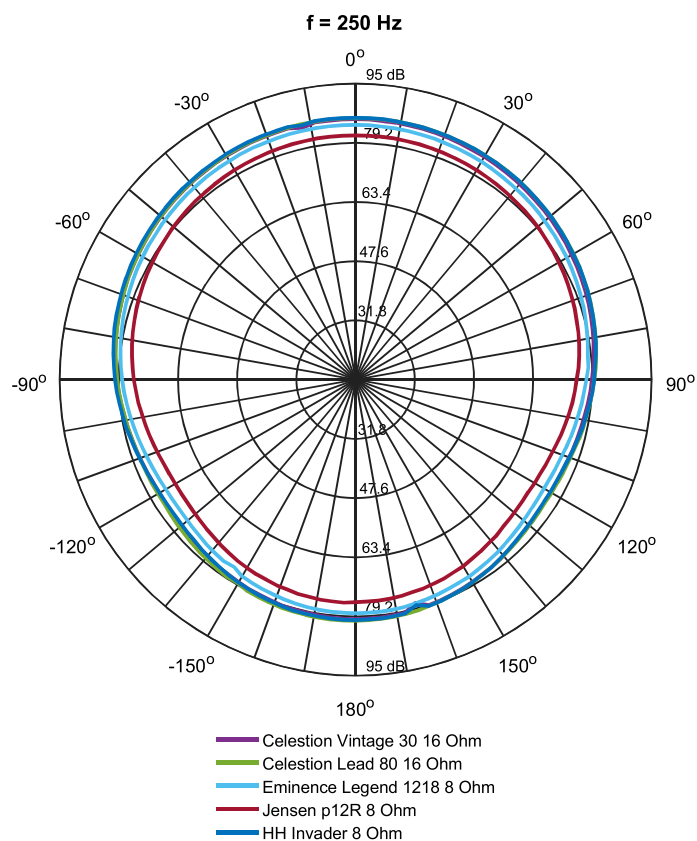
**Obr. B.6:** Směrové charakteristiky kytarového reproduktoru HH Invader

## B.2 Porovnání směrových charakteristik reproduktorů pro střední kmitočty oktávových pásem

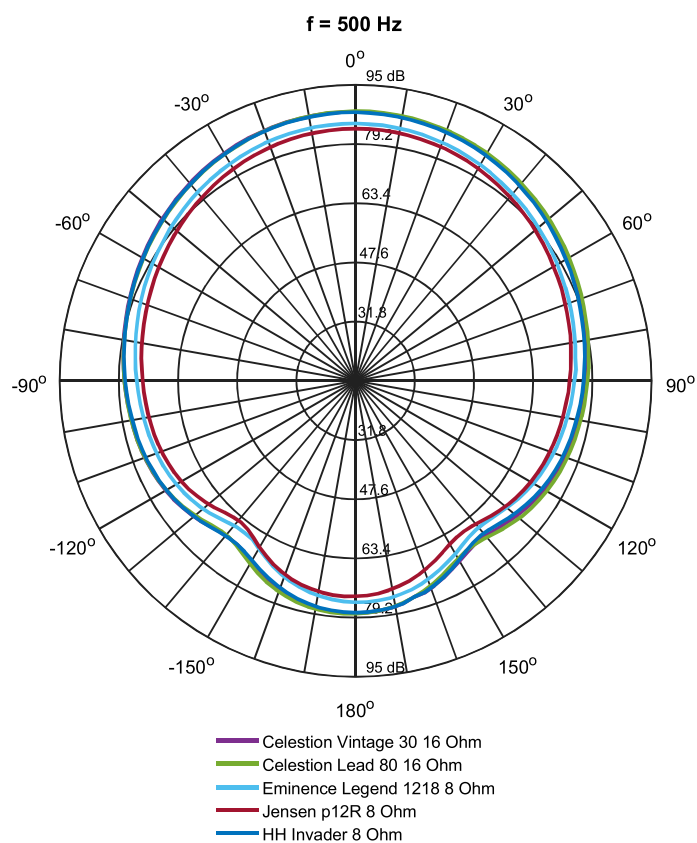


Obr. B.7: Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 125 Hz

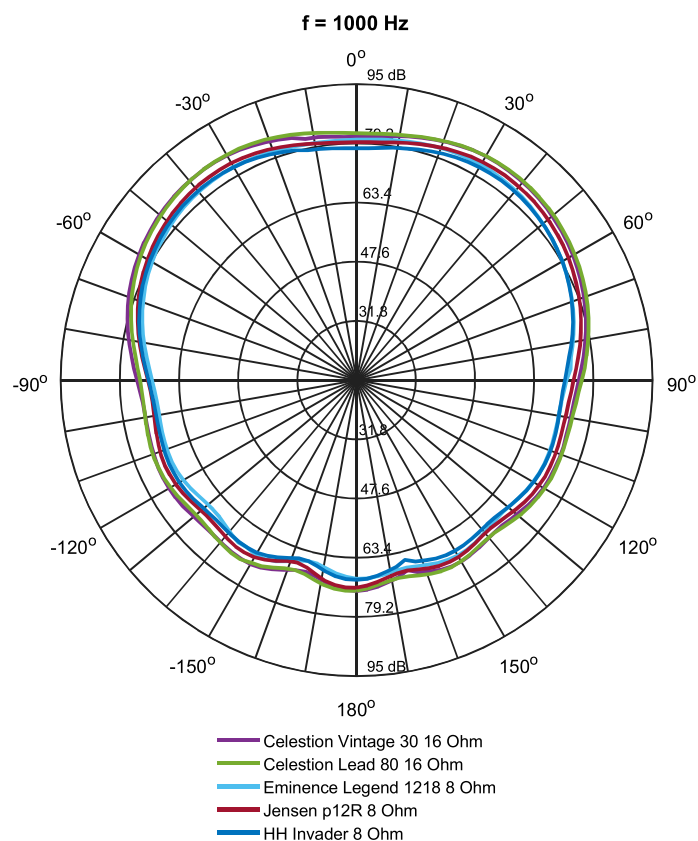




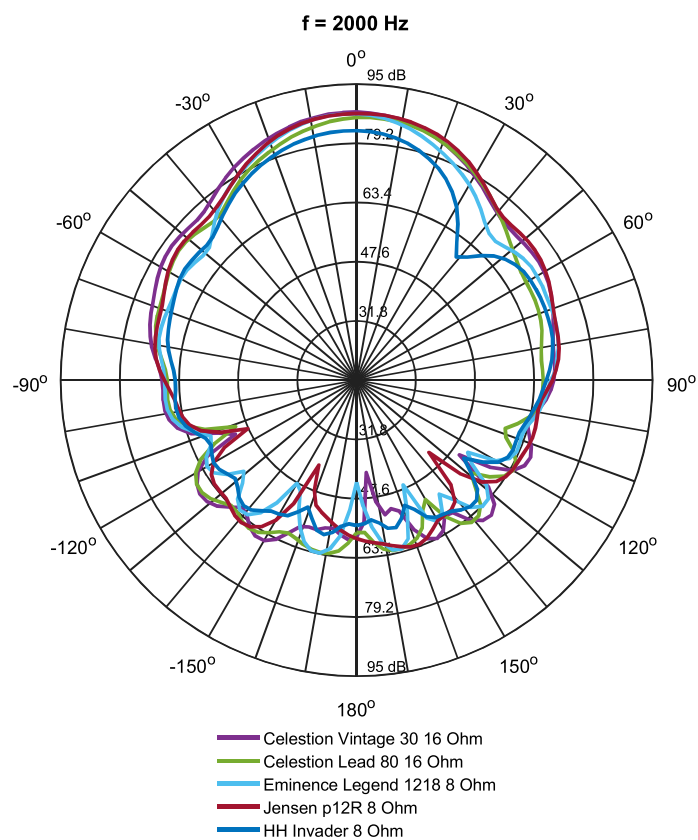
**Obr. B.8:** Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 250 Hz



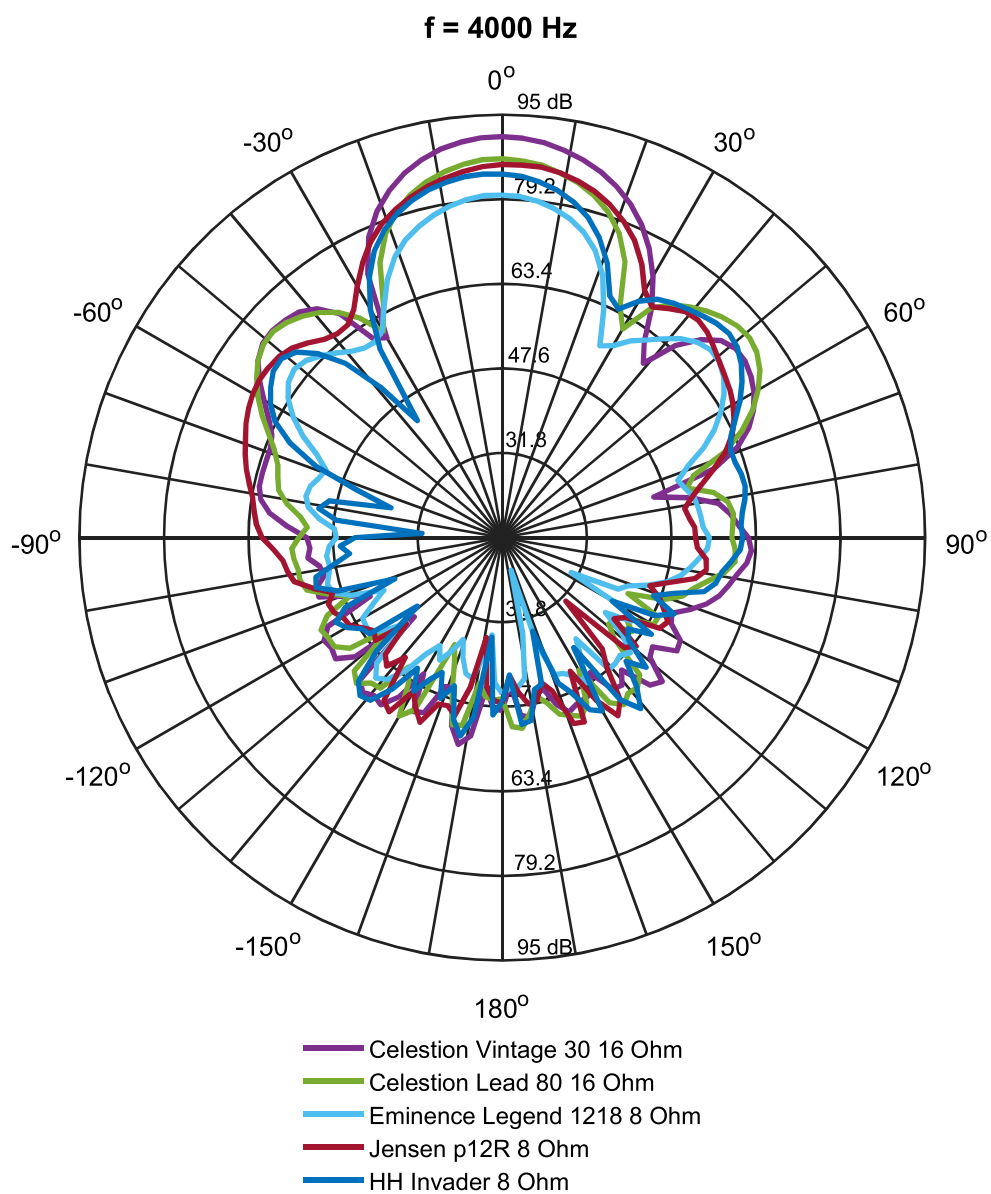
**Obr. B.9:** Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 500 Hz



**Obr. B.10:** Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 1000 Hz



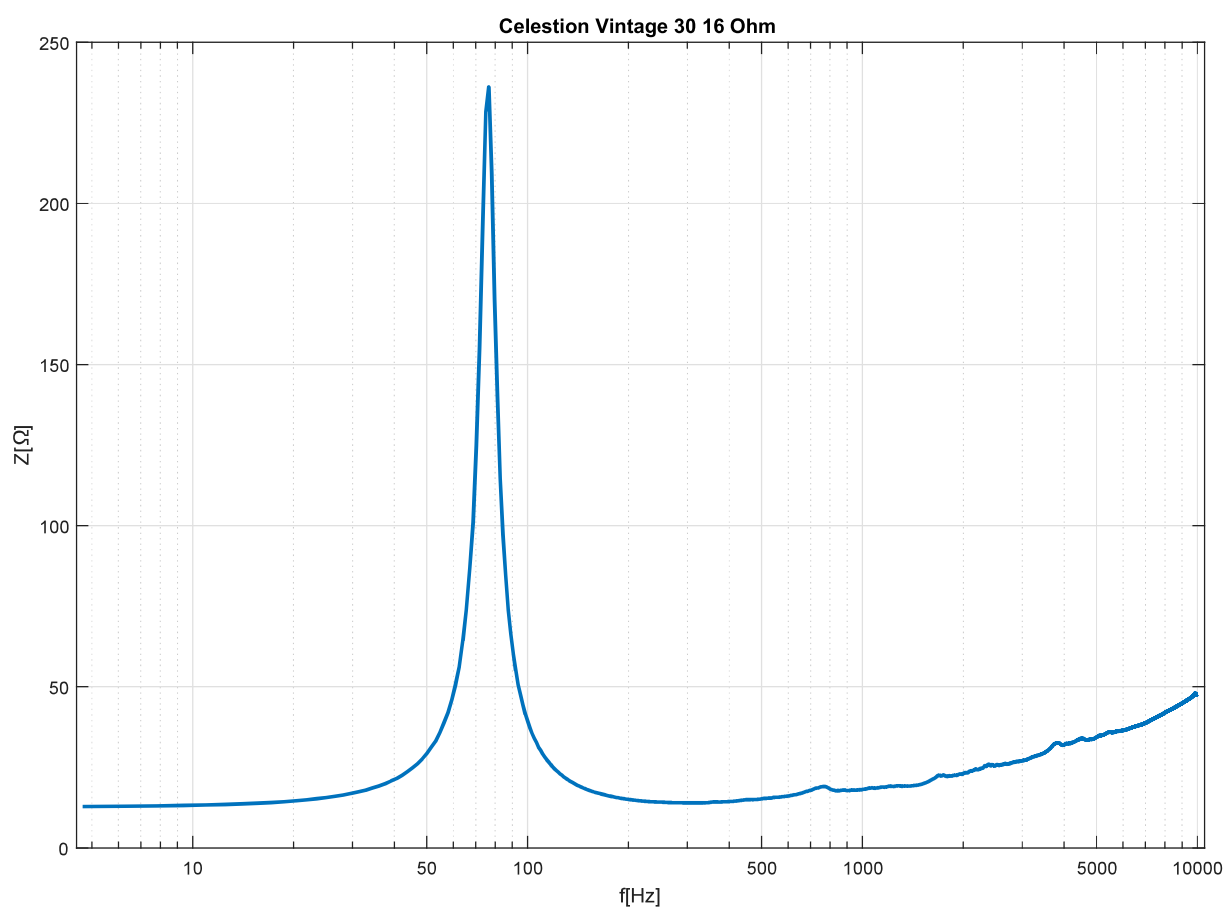
**Obr. B.11:** Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 2000 Hz



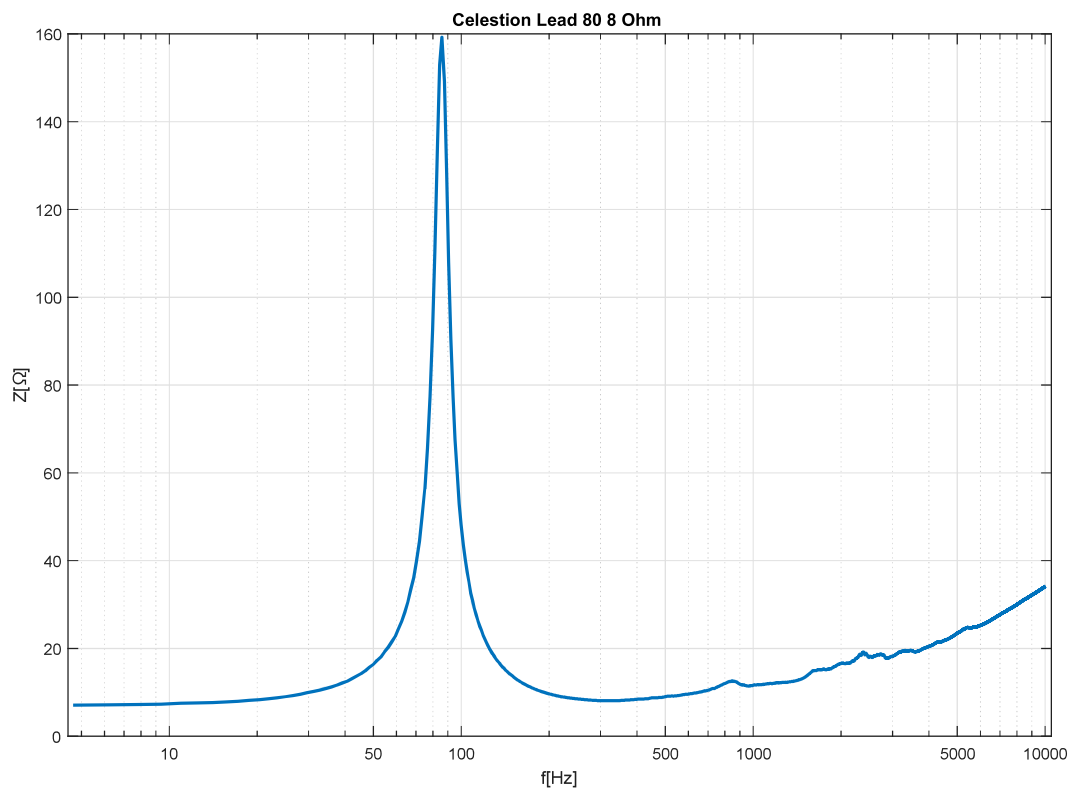
**Obr. B.12:** Směrové charakteristiky pro všechny kytarové reproduktory na kmitočtu 4000 Hz

# Příloha C

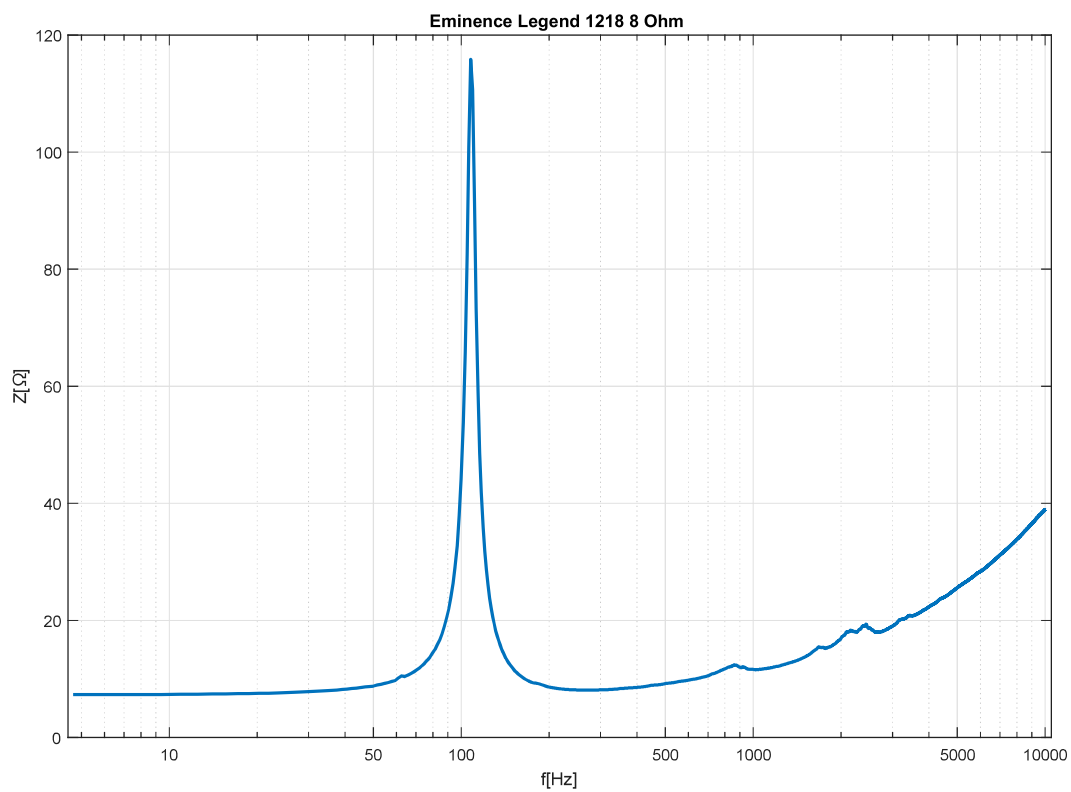
## Impedanční charakteristiky



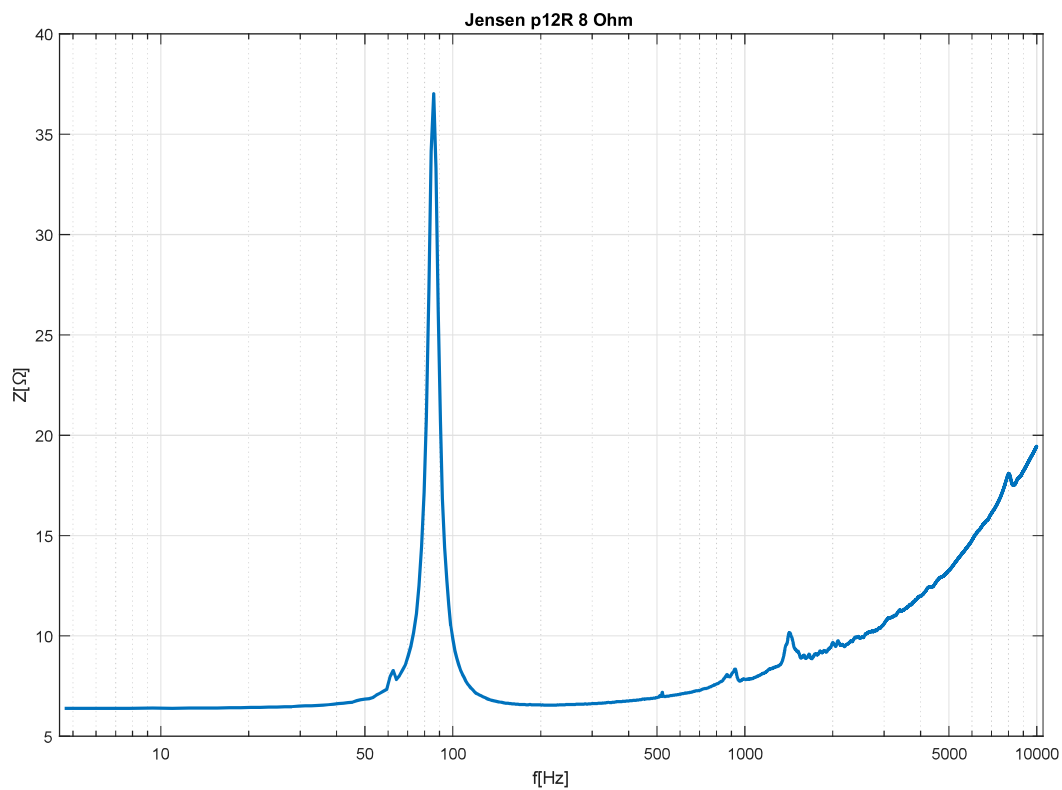
Obr. C.1: Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30



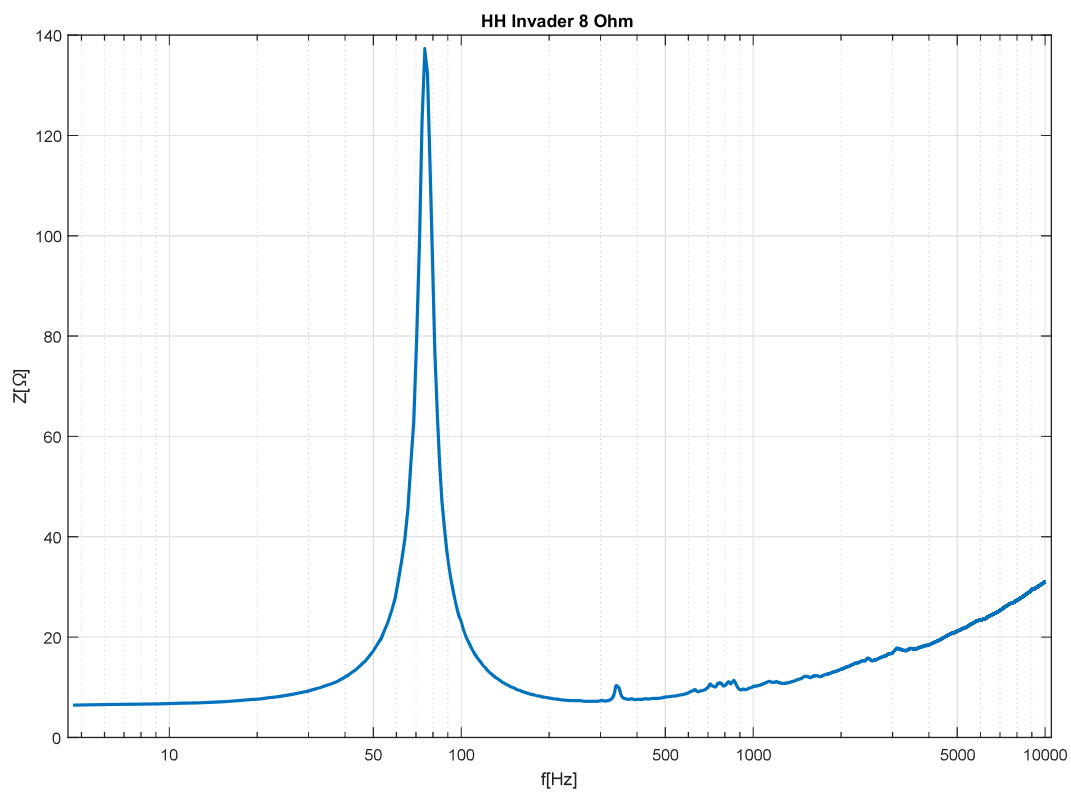
Obr. C.2: Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80



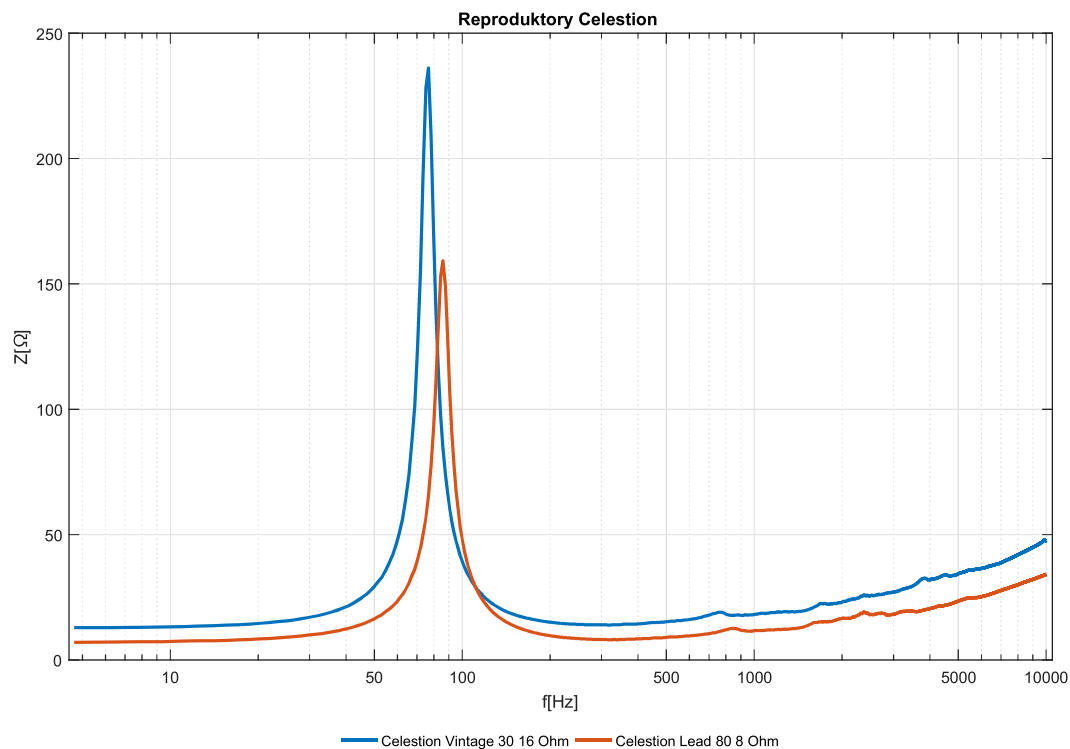
Obr. C.3: Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Eminence Legend 1280



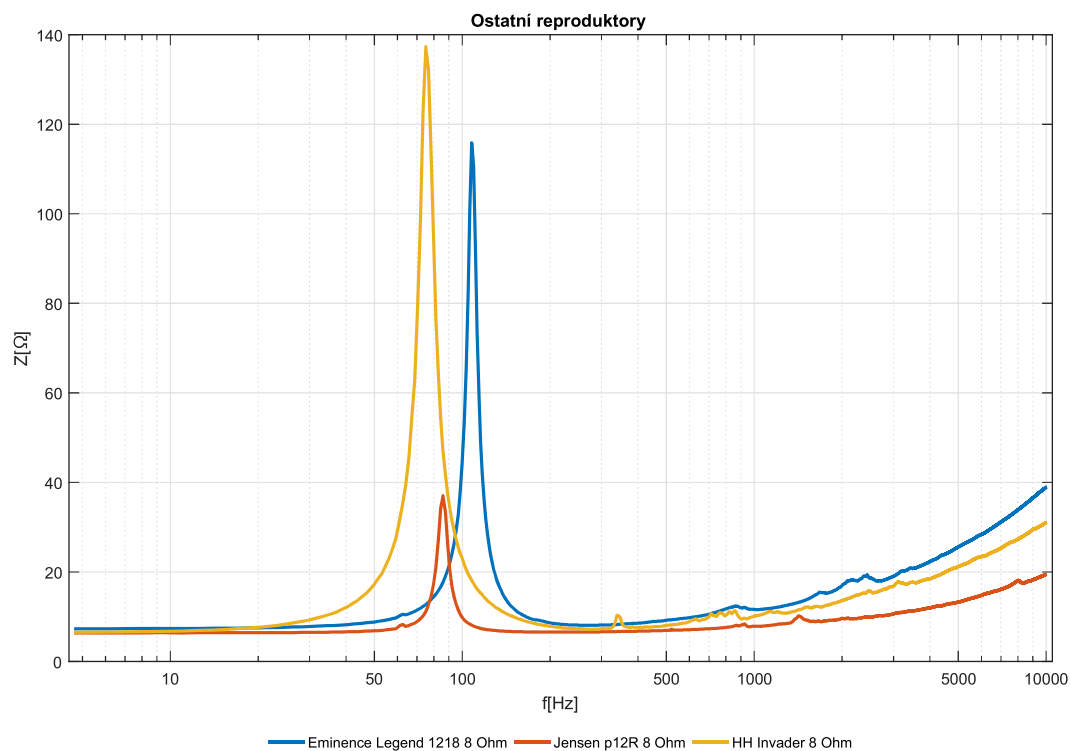
Obr. C.4: Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Jensen p12R



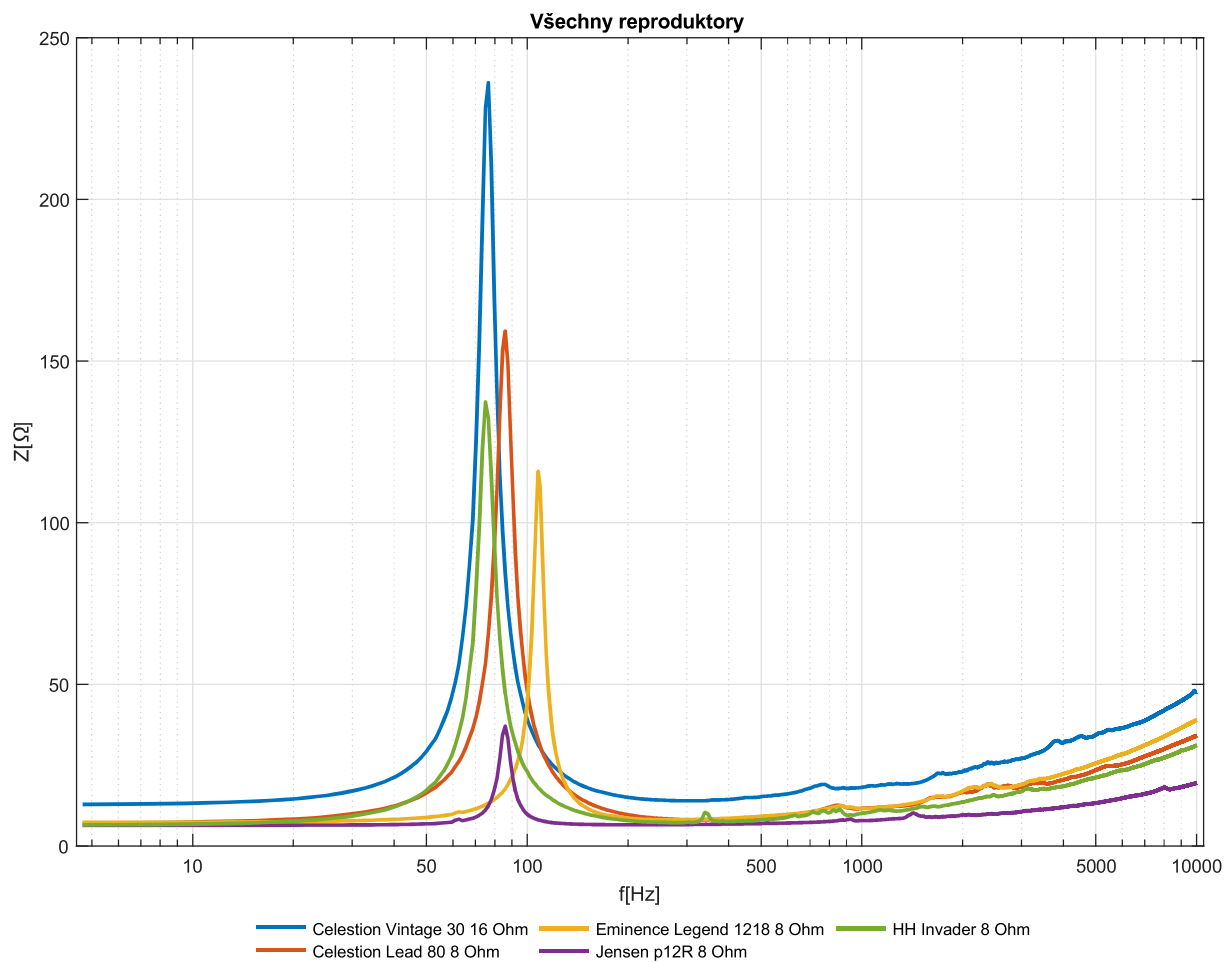
Obr. C.5: Impedanční charakteristika kytarového reproduktoru HH Invader



Obr. C.6: Porovnání impedančních charakteristik kytarových reproduktorů Celestion



Obr. C.7: Porovnání impedančních charakteristik kytarových reproduktorů minence Legend 1280, Jensen p12R a HH Invader

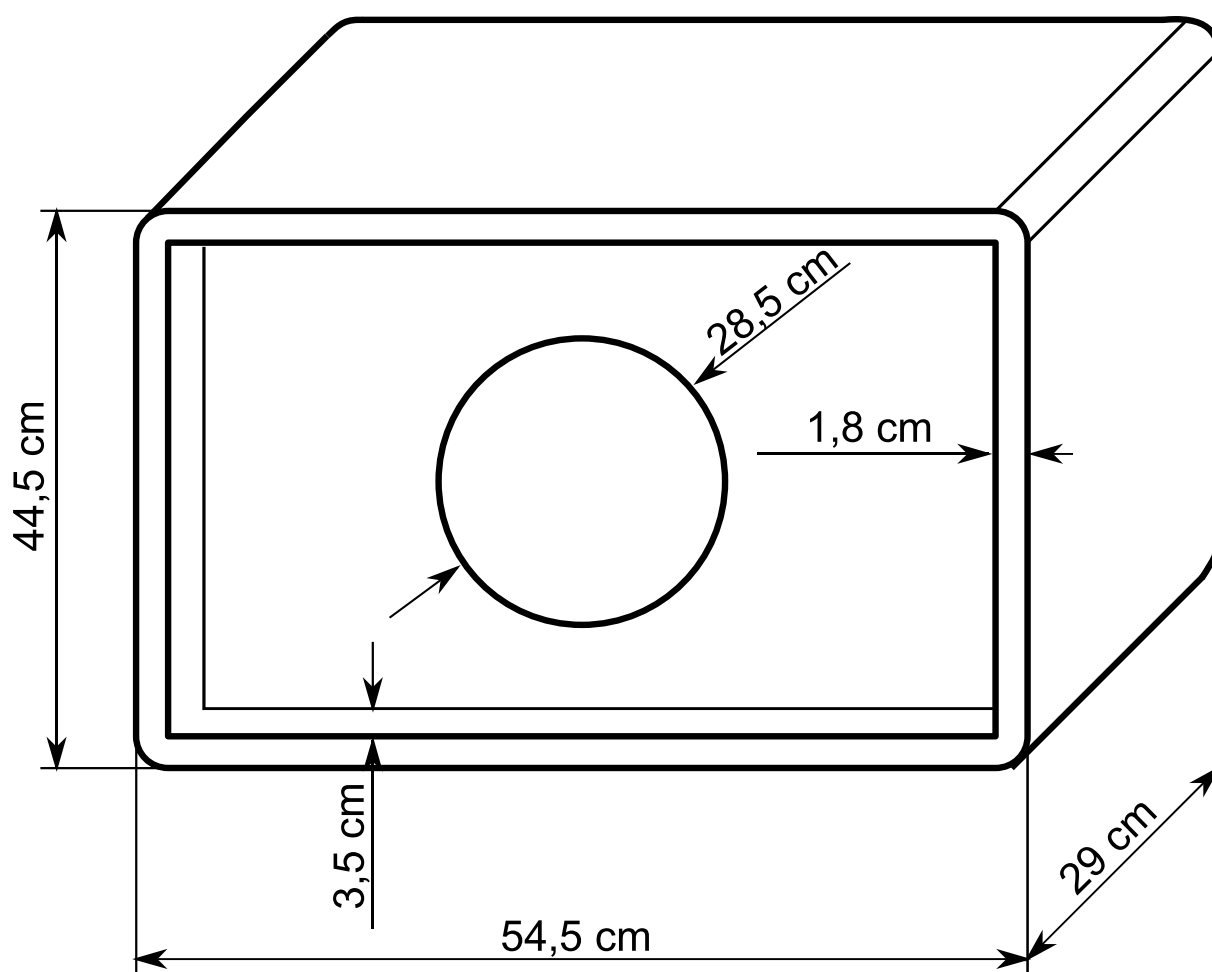


**Obr. C.8:** Porovnání všech impedančních charakteristik kytarových reproduktorů



## Příloha D

### Rozměry ozvučnice typu Orange



Obr. D.1: Rozměry uzavřené ozvučnice typu Orange

# Příloha E

## Parametry dané výrobcí

### E.1 HH Invader

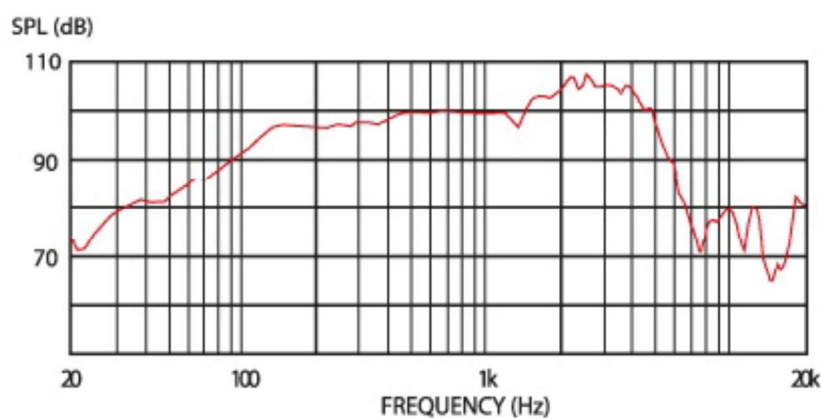
Nominální průměr	$[mm]$	305
$P_{max}$	$[W_{RMS}]$	40
$Z_{nom}$	$[\Omega]$	8
$L_s$	$[dB]$	98
Kmitočtový rozsah	$[Hz]$	85-5000
$f_s$	$[Hz]$	103
$R_e$	$[\Omega]$	5,4

**Tab. E.1:** Základní parametry kytarového reproduktoru HH Invader udané výrobcem

## E.2 Celestion Classic Vintage 30

(a) Základní parametry			(b) TS parametry		
Nominální průměr	[mm]	305,0	$r_d$	[mm]	130,00
$P_{max}$	[ $W_{RMS}$ ]	60,0	$Q_{ms}$	[—]	9,30
$Z_{nom}$	[ $\Omega$ ]	16,0	$Q_{es}$	[—]	0,47
$L_s$	[dB]	100,0	$Q_{ts}$	[—]	0,43
Kmitočtový rozsah	[Hz]	70-5000	$m_{ms}$	[g]	29,00
$f_s$	[Hz]	75,0	$c_{ms}$	[mm/N]	0,18
$R_e$	[ $\Omega$ ]	12,9	$V_{as}$	[l]	72,00
			$Bl$	[Tm]	14,00
			$r_{ms}$	[kg/s]	1,35

**Tab. E.2:** Parametry kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 udané výrobcem



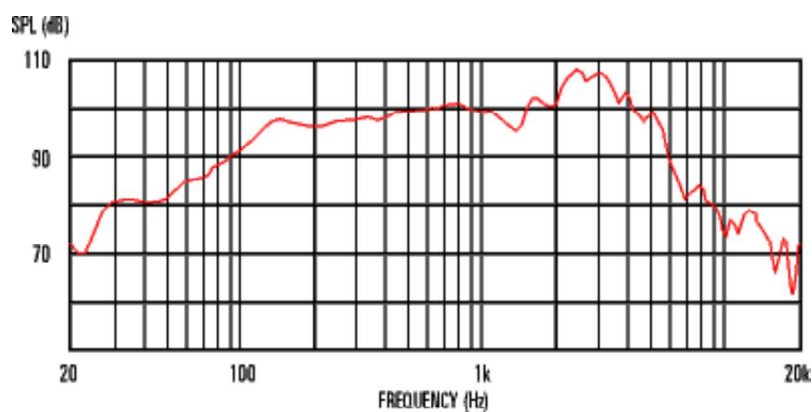
**Obr. E.1:** Amplitudová kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Vintage 30 udané výrobcem

Podrobnosti k měření amplitudové kmitočtové charakteristiky nebyly uvedeny.

### E.3 Celestion Classic Lead 80

Nominální průměr	[ <i>mm</i> ]	305,0
$P_{max}$	[ $W_{RMS}$ ]	80,0
$Z_{nom}$	[ $\Omega$ ]	8,0
$L_s$	[ <i>dB</i> ]	99,0
Kmitočtový rozsah	[ <i>Hz</i> ]	80-5000
$f_s$	[ <i>Hz</i> ]	85,0
$R_e$	[ $\Omega$ ]	6,9

**Tab. E.3:** Základní parametry kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 udané výrobcem



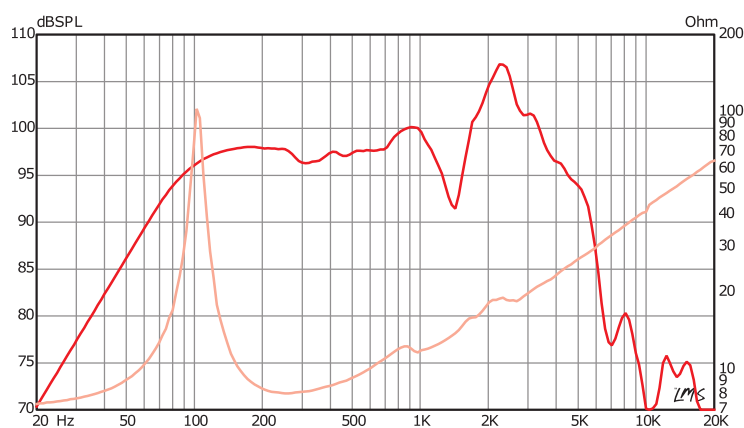
**Obr. E.2:** Amplitudová kmitočtová charakteristika kytarového reproduktoru Celestion Classic Lead 80 udané výrobcem

Podrobnosti k měření amplitudové kmitočtové charakteristiky nebyly uvedeny.

## E.4 Eminence LEGEND 1218

Nominální průměr	[ <i>mm</i> ]	305,00
$P_{max}$	[ $W_{RMS}$ ]	150,00
$Z_{nom}$	[ $\Omega$ ]	8,00
$L_s$	[ <i>dB</i> ]	98,70
Kmitočtový rozsah	[ <i>Hz</i> ]	80-4200
$f_s$	[ <i>Hz</i> ]	100,00
$R_e$	[ $\Omega$ ]	6,95

**Tab. E.4:** Základní parametry kytarového reproduktoru Eminence LEGEND 1218 udané výrobcem



**Obr. E.3:** Amplitudová kmitočtová a impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Eminence LEGEND 1218 udané výrobcem

Amplitudová frekvenční charakteristika byla měřena příkonem 1 W ve vzdálenosti 1 m. Reprodukční byl vložen do standardní ozvučnice.

## E.5 Jensen p12R

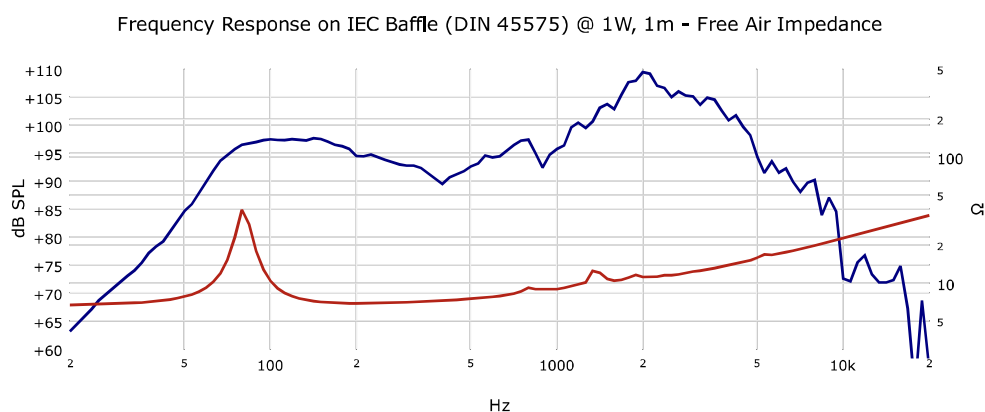
(a) Základní parametry

Nominální průměr	[ <i>mm</i> ]	306
$P_{max}$	[ $W_{RMS}$ ]	25
$Z_{nom}$	[ $\Omega$ ]	8
$L_s$	[ <i>dB</i> ]	95
Kmitočtový rozsah	[ <i>Hz</i> ]	-
$f_s$	[ <i>Hz</i> ]	80
$R_e$	[ $\Omega$ ]	6
$\eta_0$	[%]	1,56

(b) TS parametry

$S_d$	[ $cm^2$ ]	490,80
$Q_{ms}$	[–]	12,73
$Q_{es}$	[–]	2,09
$Q_{ts}$	[–]	1,79
$m_{ms}$	[ <i>g</i> ]	20,30
$c_{ms}$	[ $\mu m/N$ ]	0,17
$V_{as}$	[ <i>l</i> ]	66,40
$Bl$	[ <i>Tm</i> ]	5,55
$L_e$	[ <i>mH</i> ]	0,50
$X_{max}$	[ <i>mm</i> ]	1

**Tab. E.5:** Parametry kytarového reproduktoru Jensen p12R udané výrobcem



**Obr. E.4:** Amplitudová kmitočtová a impedanční charakteristika kytarového reproduktoru Jensen p12R udané výrobcem

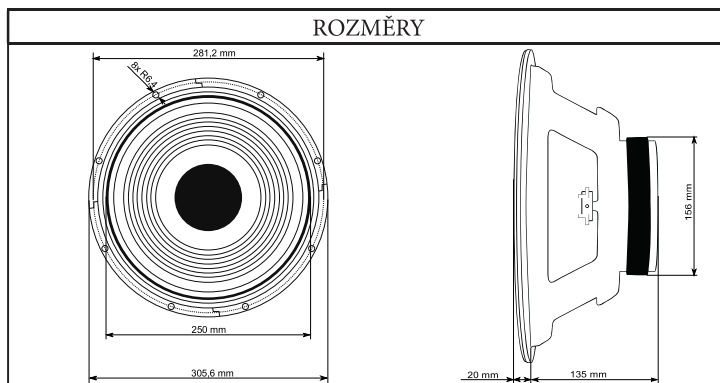
# **Příloha F**

## **Katalogové listy z měření**

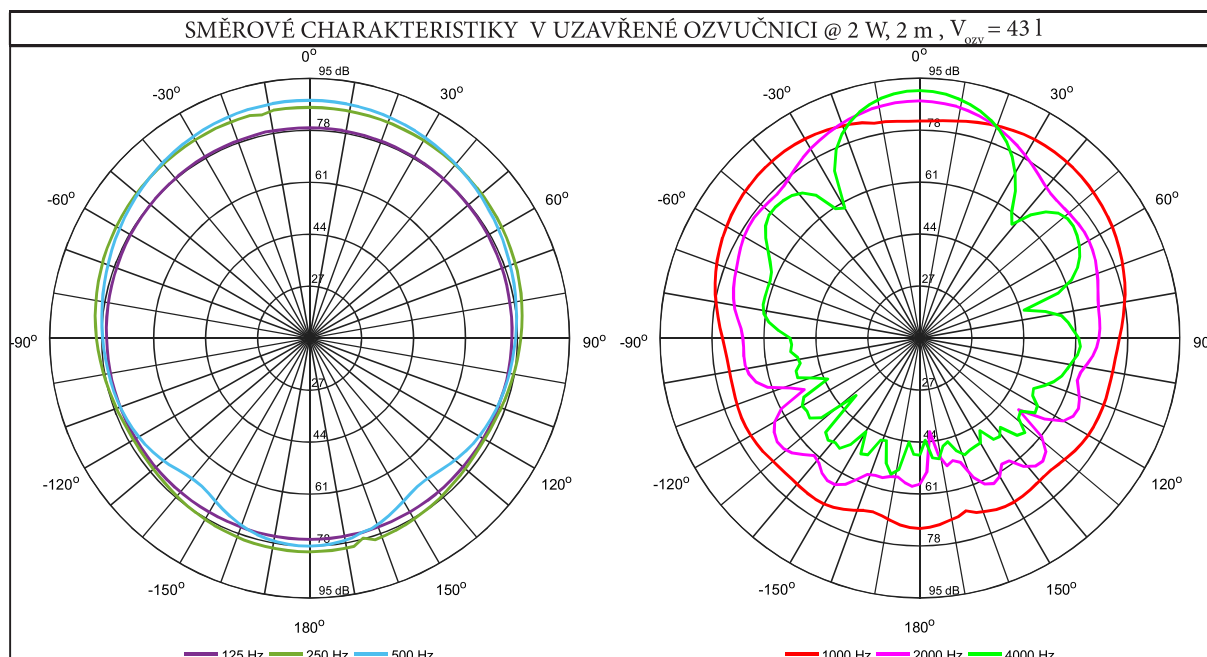
CELESTION V30 - A

# Celestion Classic Vintage 30

ZÁKLADNÍ PARAMETRY	
Celkový průměr	305 mm
Hmotnost	4,7 kg
Nominální impedance $X_{nom}$	16 $\Omega$
Nominální příkon $P_{NOM}$	60 W
Citlivost @1W, 1m $L_s$	97,6 dB
Kmitočtové pásmo	71-6800 Hz
Rezonanční kmitočet $f_s$	72 Hz
THD <sub>1W</sub>	2,46 %
THD <sub>10W</sub>	4,46 %
Magnet	Keramický

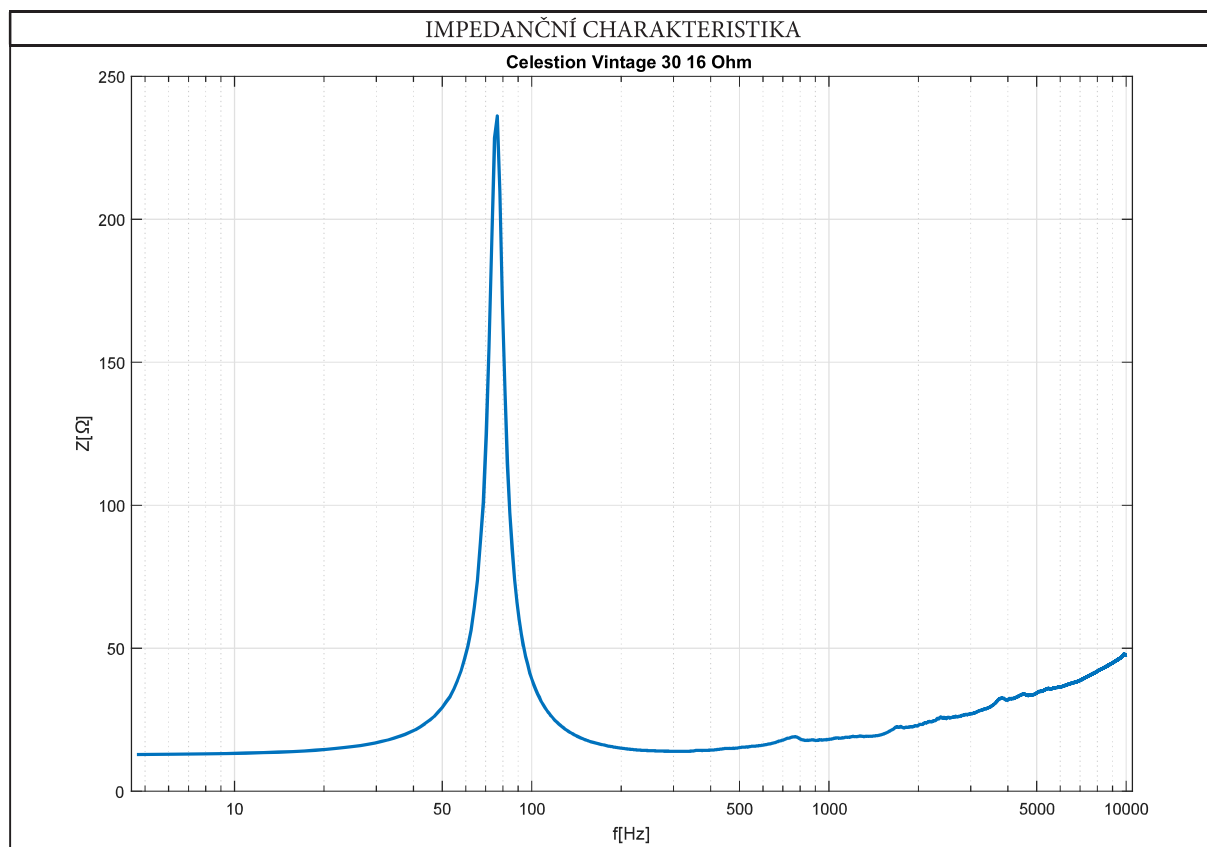
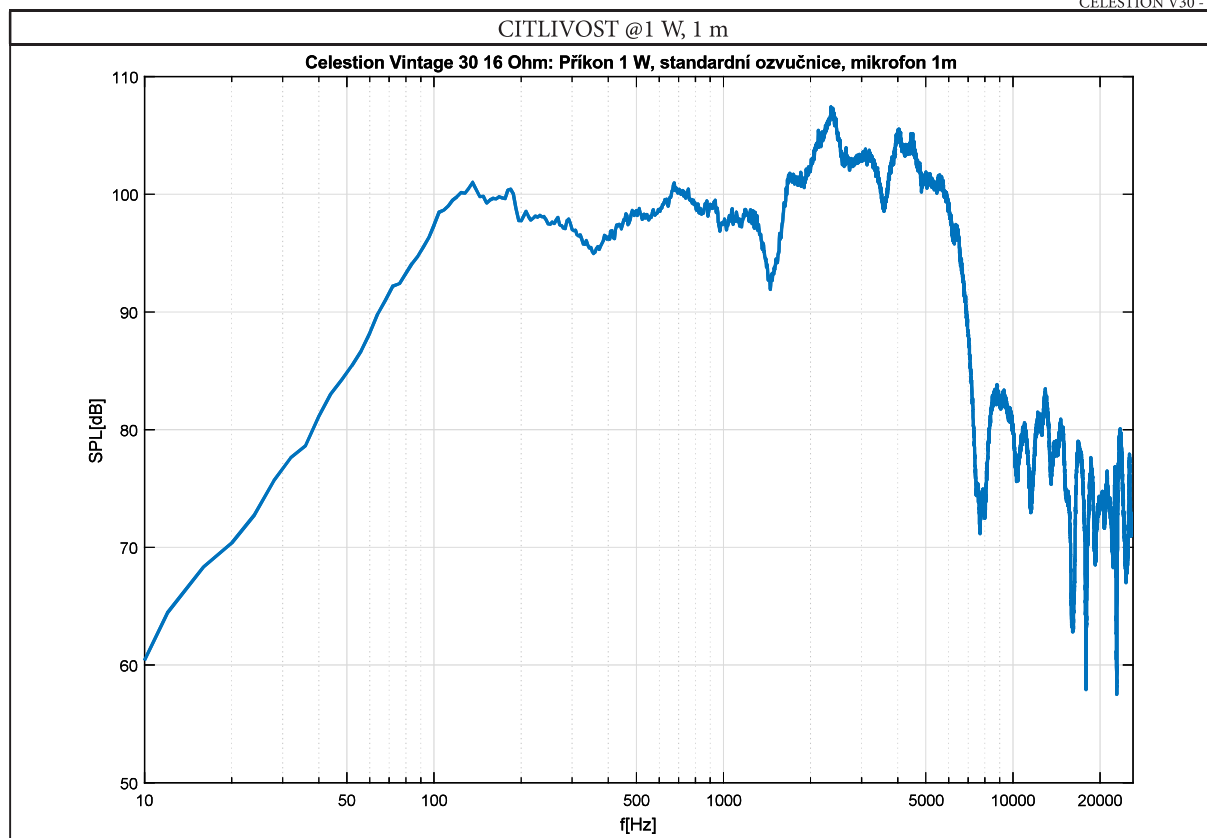


THIELE-SMALL PARAMETRY	
Činný odpor km. cívky $R_e$	12,64 $\Omega$
Aktivní plocha membrány $S_d$	490,00 cm <sup>2</sup>
Bl faktor	17,30 Tm
Celková hm. kmit. systému $m_{ms}$	29,53 g
Hmotnost kmit. systému $m_{md}$	23,25 g
Celková poddajnost membr. $c_{ms}$	0,17 mm/N
Akustická poddajnost $c_a$	4 <sup>^</sup> 10 <sup>7</sup> m <sup>5</sup> /N
Ekvivalentní objem $V_{as}$	56,61 l
Elektrický činitel jakosti $Q_{es}$	0,56
Mechanický činitel jakosti $Q_{ms}$	10,74
Celkový činitel jakosti $Q_{ts}$	0,54
Jmenovitá citlivost $L_s$	97,8 dB
Účinnost $\eta$	3,60 %
Odpor kmitacího systému $r_{ms}$	1,24 Ns/m





CELESTION V30 - B



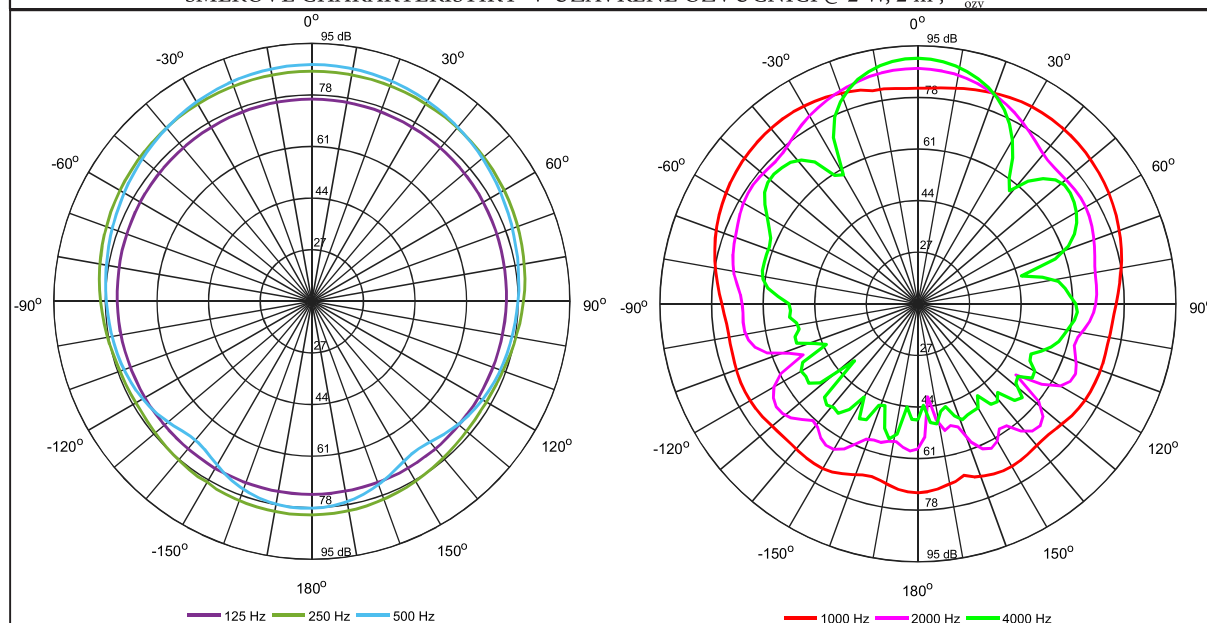
CELESTION L80 - A

# Celestion Classic Lead 80

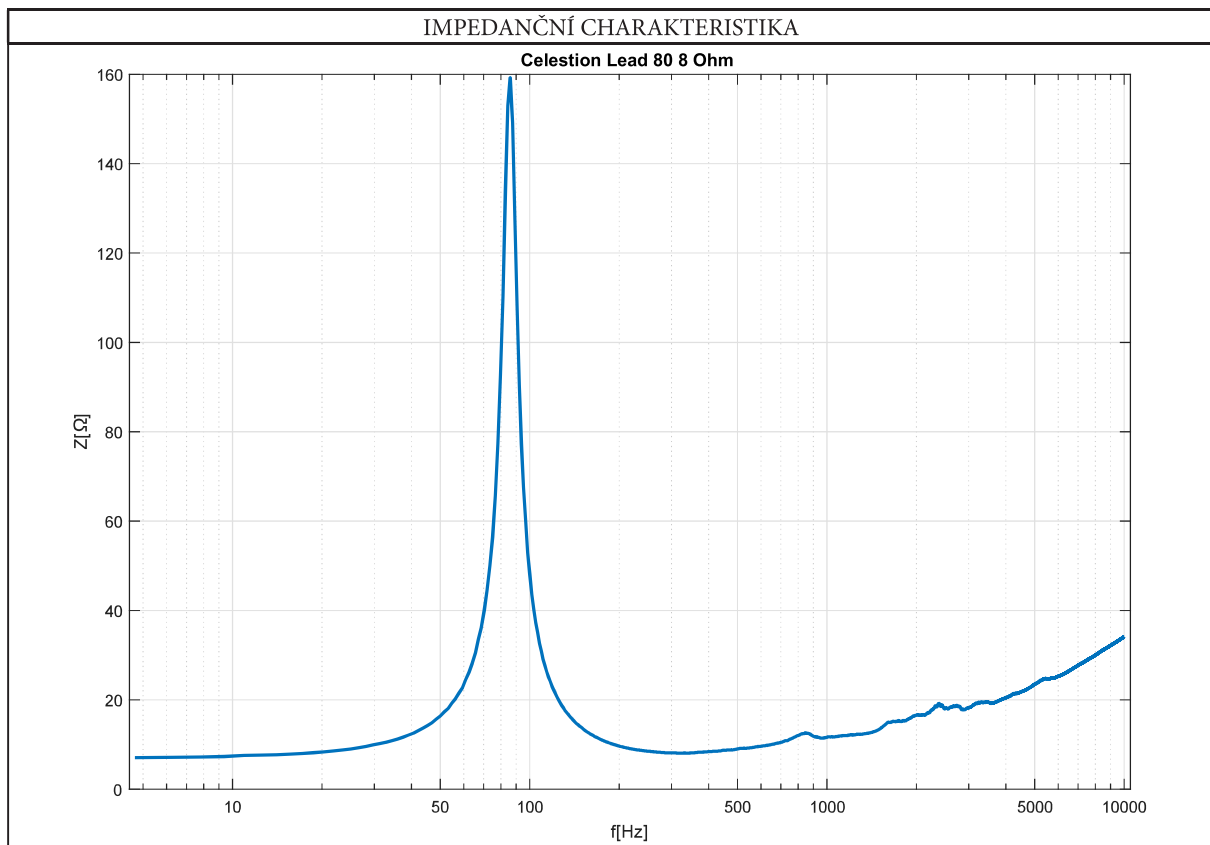
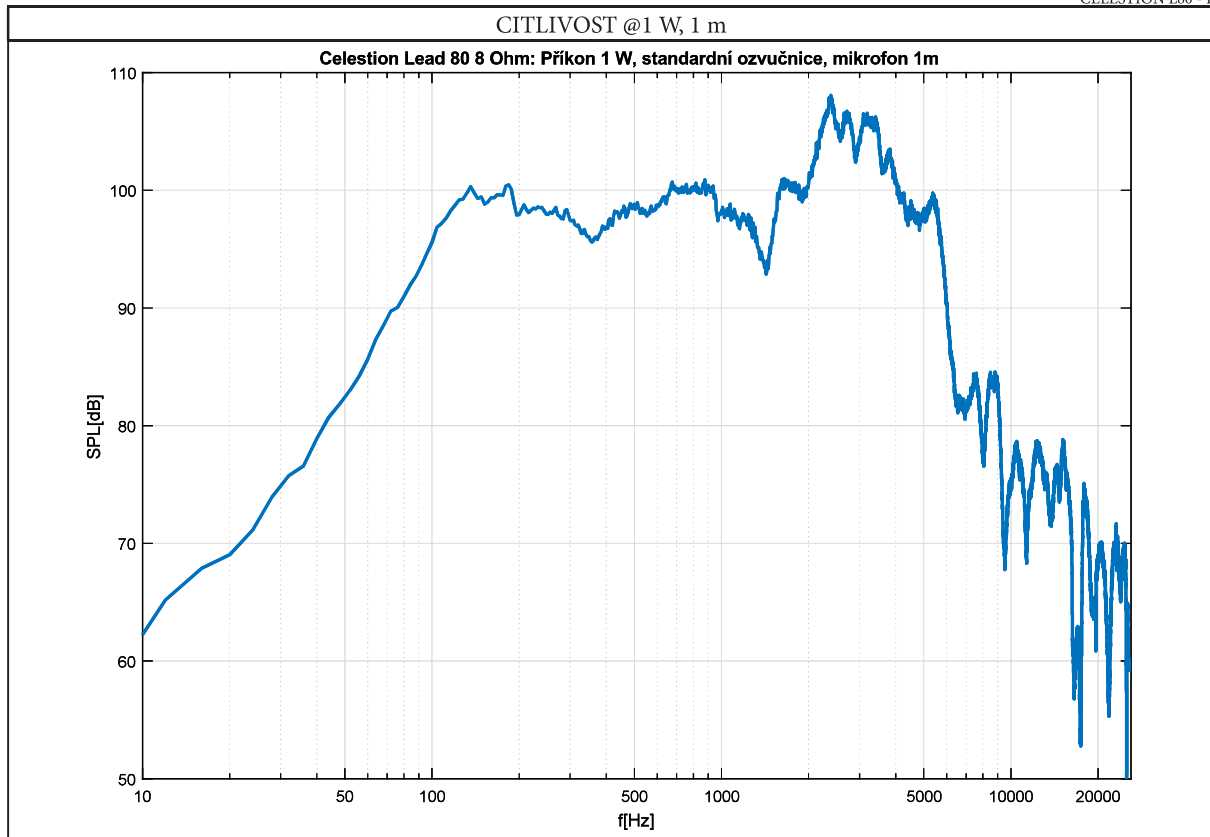
ZÁKLADNÍ PARAMETRY		ROZMĚRY	
Celkový průměr	30 mm		
Hmotnost	4,70 kg		
Nominální impedance $X_{nom}$	8 $\Omega$		
Nominální příkon $P_{NOM}$	80 W		
Citlivost @1W, 1m $L_s$	98,28 dB		
Kmitočtové pásmo	84-5900 Hz		
Rezonanční kmitočet $f_s$	86 Hz		
THD <sub>1W</sub>	1,13 %		
THD <sub>10W</sub>	2,57 %		
Magnet	Keramický		



SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY V UZAVŘENÉ OZVUČNICI @ 2 W, 2 m,  $V_{OZV} = 43$  l

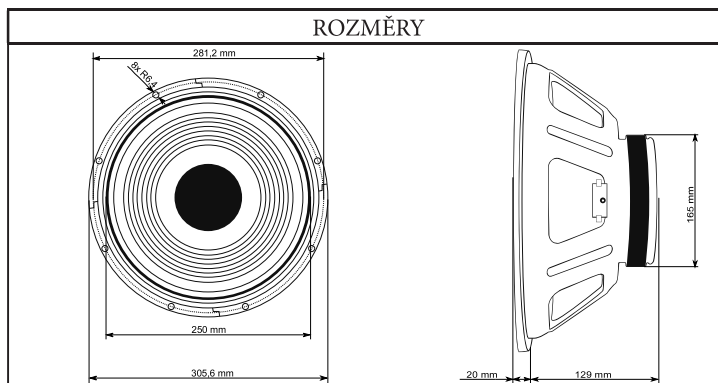


CELESTION L80 - B



# Eminence Legend 1218

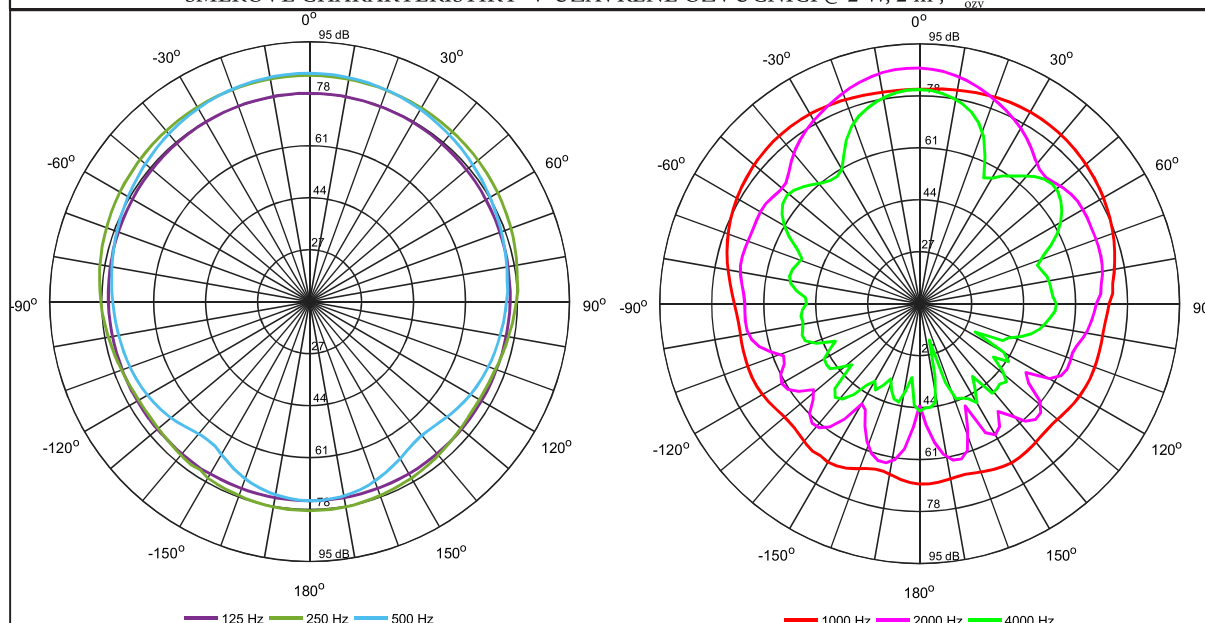
ZÁKLADNÍ PARAMETRY	
Celkový průměr	305 mm
Hmotnost	3,81 kg
Nominální impedance $X_{nom}$	8 $\Omega$
Nominální příkon $P_{NOM}$	150 W
Citlivost @1W, 1m $L_s$	97,28 dB
Kmitočtové pásmo	80-5300 Hz
Rezonanční kmitočet $f_s$	80 Hz
THD <sub>1W</sub>	0,97 %
THD <sub>10W</sub>	1,73 %
Magnet	Ferit



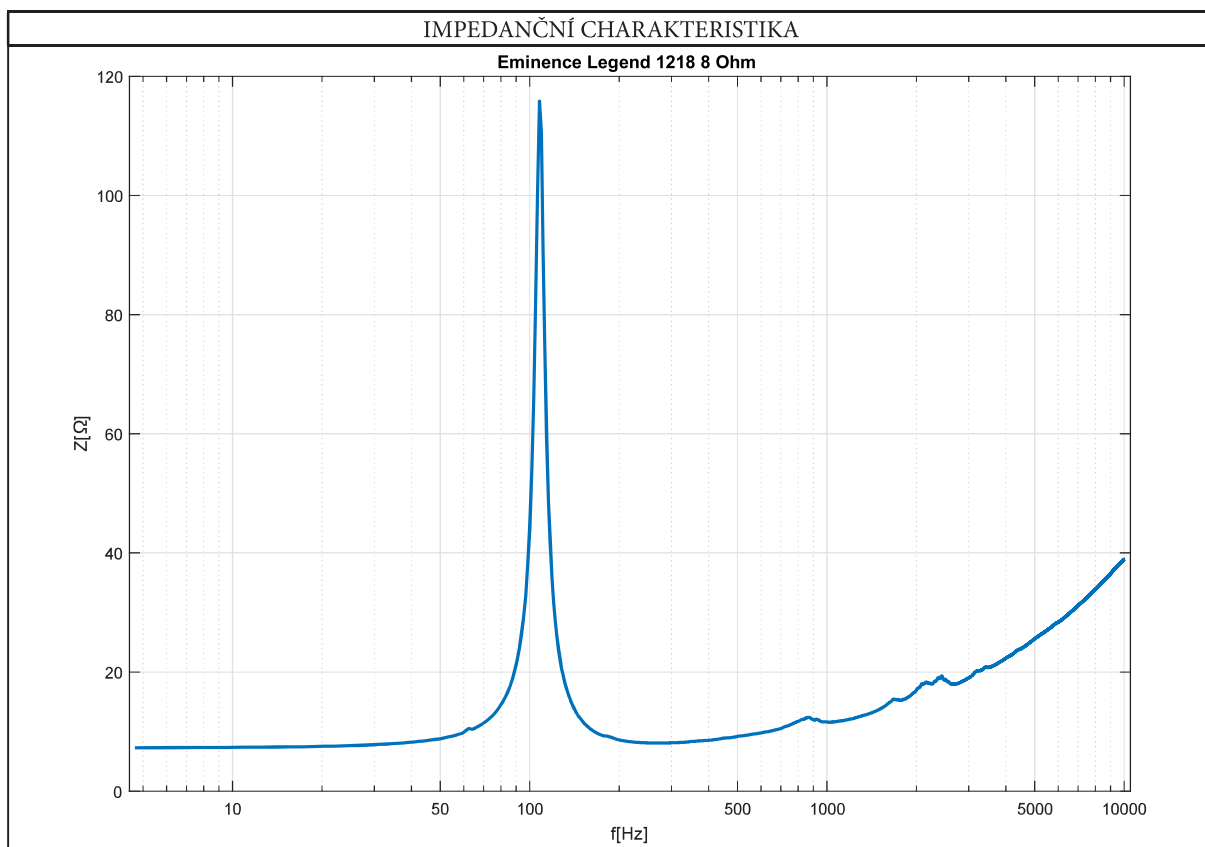
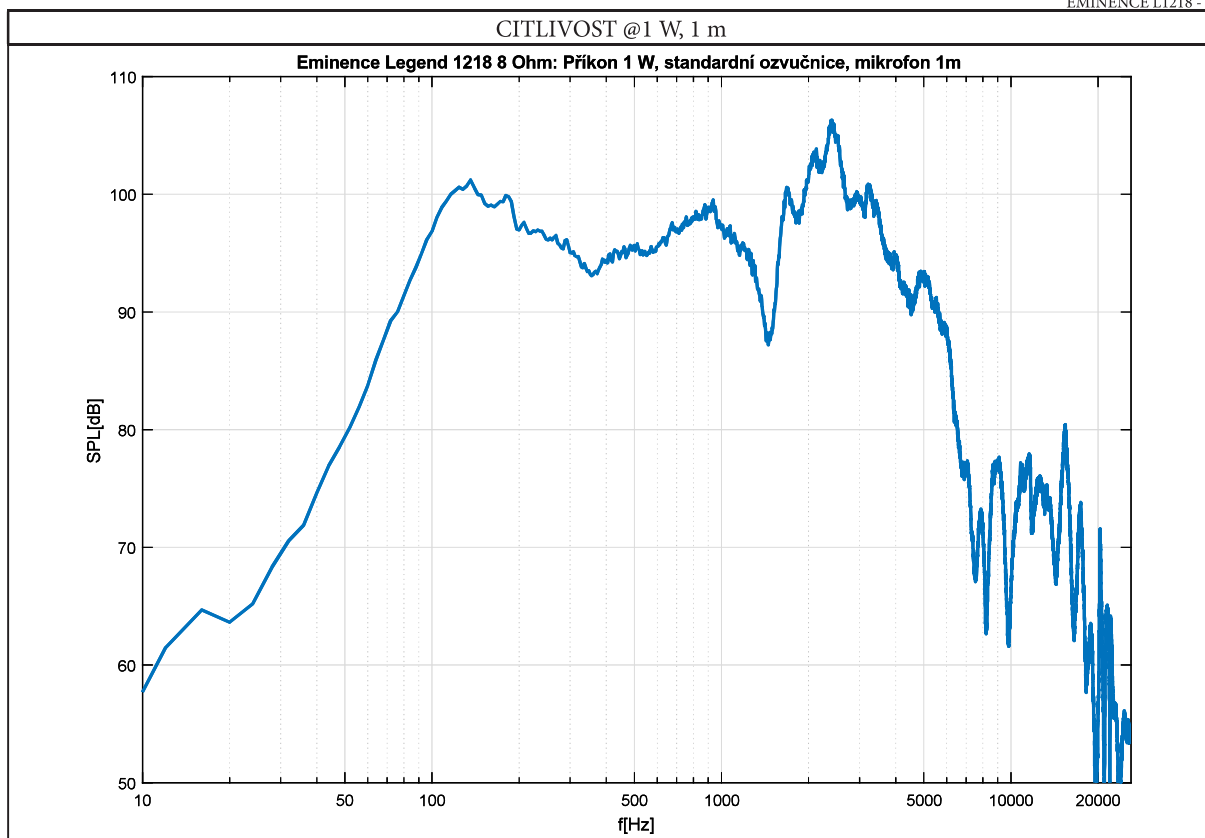
THIELE-SMALL PARAMETRY	
Činný odpor km. cívky $R_e$	7,23 $\Omega$
Aktivní plocha membrány $S_d$	490,00 cm <sup>2</sup>
Bl faktor	12,60 Tm
Celková hm. kmit. systému $m_{ms}$	34,95 g
Hmotnost kmit. systému $m_{md}$	38,66 g
Celková poddajnost membr. $c_{ms}$	0,06 mm/N
Akustická poddajnost $c_a$	1,6 <sup>^</sup> 10 <sup>^</sup> 7 m <sup>5</sup> /N
Ekvivalentní objem $V_{as}$	22,31 l
Elektrický činitel jakosti $Q_{es}$	1,04
Mechanický činitel jakosti $Q_{ms}$	16,45
Celkový činitel jakosti $Q_{ts}$	0,98
Jmenovitá citlivost $L_s$	96 dB
Účinnost $\eta$	2,38 %
Odpor kmitacího systému $r_{ms}$	1,40 Ns/m



SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY V UZAVŘENÉ OZVUČNICI @ 2 W, 2 m,  $V_{ozv} = 43$  l



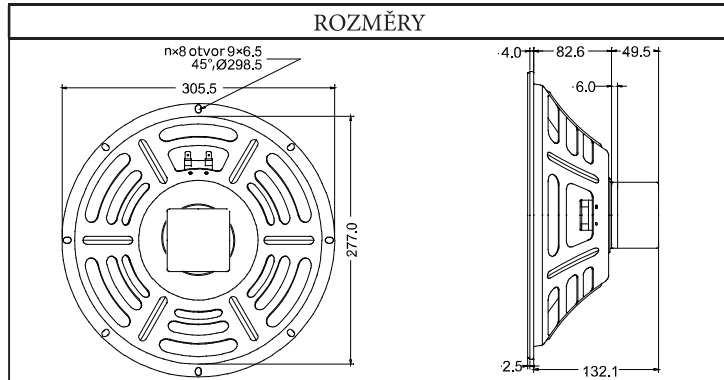
EMINENCE L1218 - B



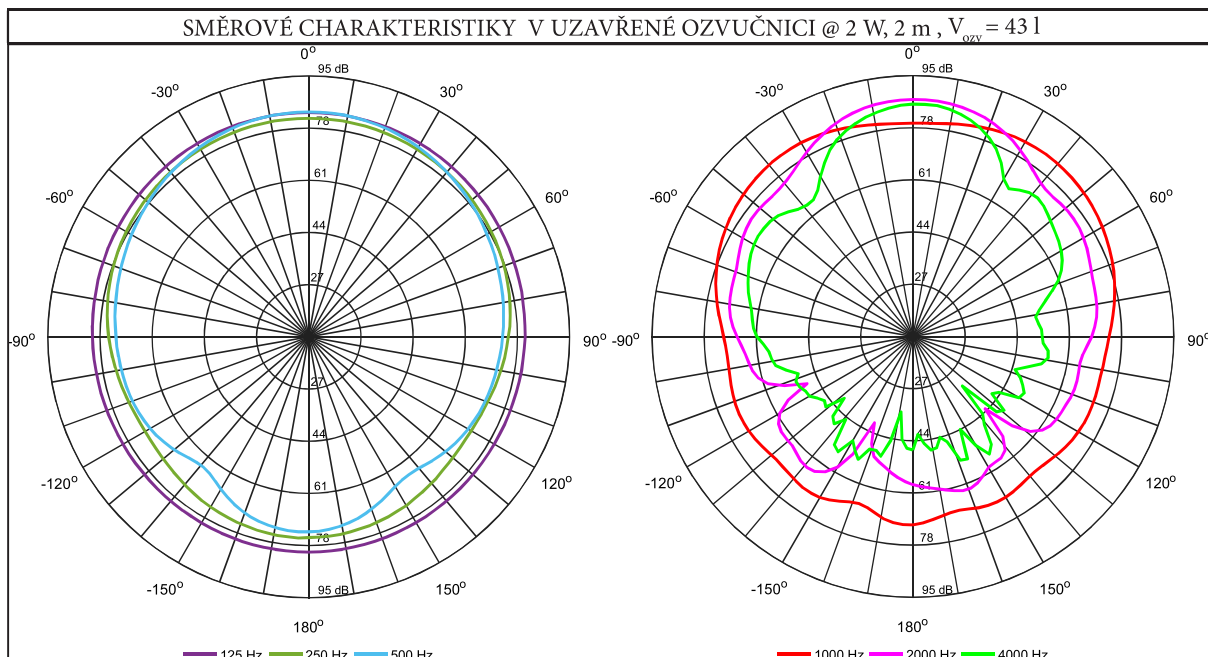
JENSEN P12R - A

# Jensen p12R

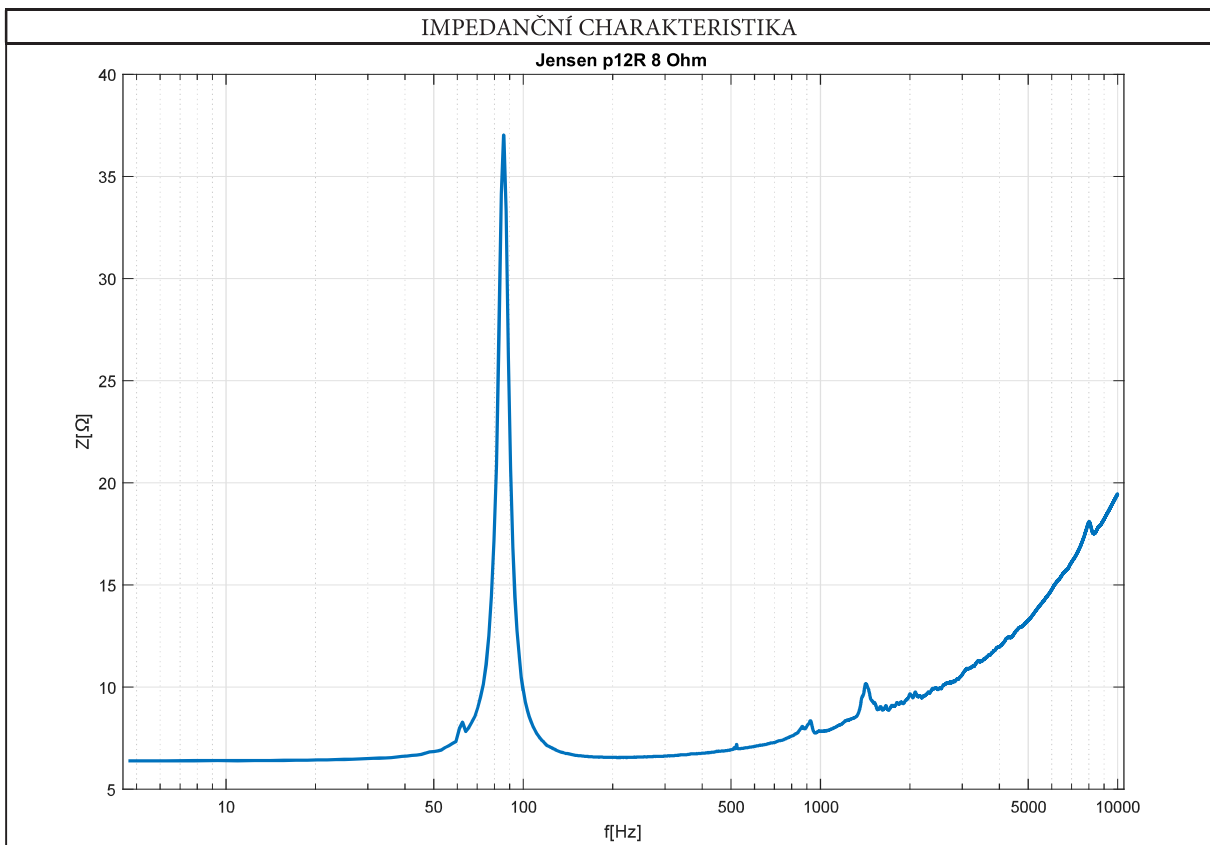
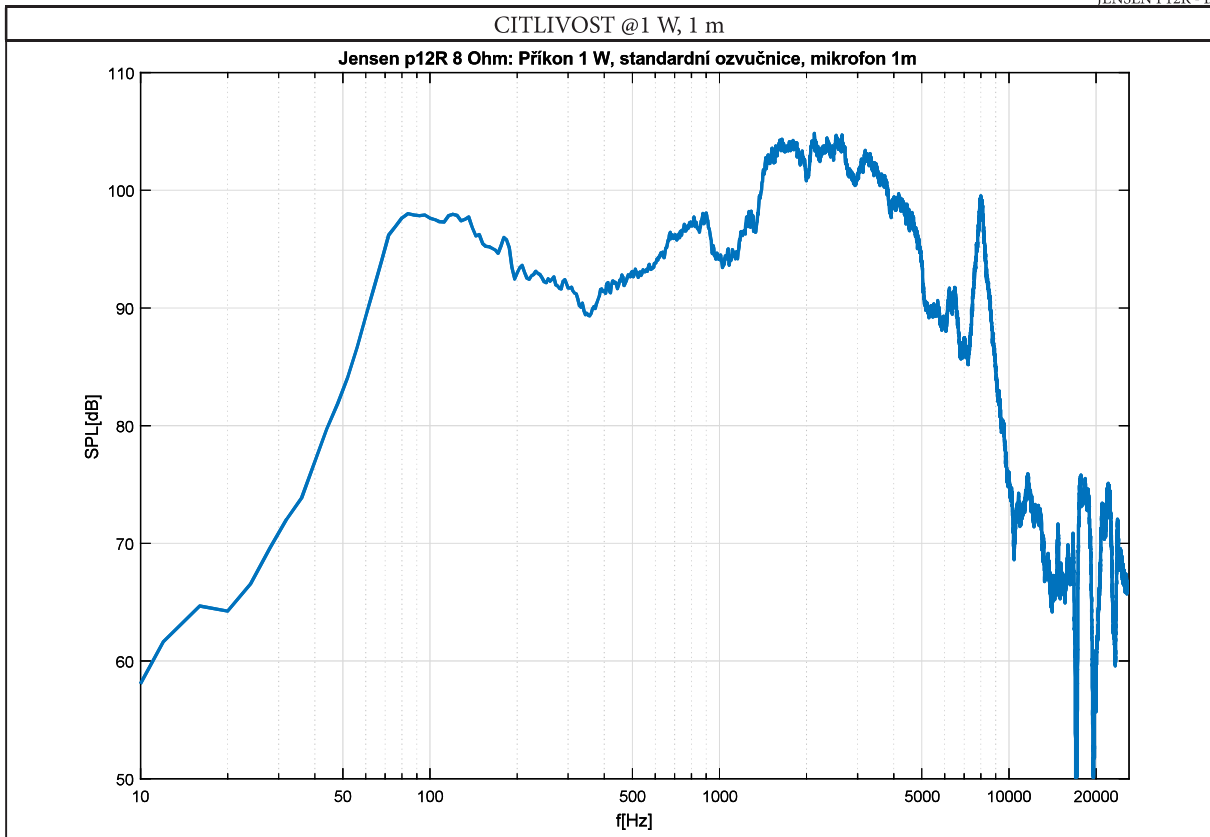
ZÁKLADNÍ PARAMETRY	
Celkový průměr	306 mm
Hmotnost	1,61 kg
Nominální impedance $X_{nom}$	8 $\Omega$
Nominální příkon $P_{NOM}$	25 W
Citlivost @1W, 1m $L_s$	94,4 dB
Kmitočtové pásmo	58-5800 Hz
Rezonanční kmitočet $f_s$	83 Hz
THD <sub>1W</sub>	0,97 %
THD <sub>10W</sub>	3,65 %
Magnet	AlNiCo



THIELE-SMALL PARAMETRY	
Činný odpor km. cívky $R_e$	6,31 $\Omega$
Aktivní plocha membrány $S_d$	490,00 cm <sup>2</sup>
Bl faktor	5,43 Tm
Celková hm. kmit. systému $m_{ms}$	24,81 g
Hmotnost kmit. systému $m_{md}$	18,52 g
Celková poddajnost membr. $c_{ms}$	0,15 mm/N
Akustická poddajnost $c_a$	3,6 <sup>^</sup> 10 <sup>^</sup> 7 m <sup>5</sup> /N
Ekvivalentní objem $V_{as}$	50,42 l
Elektrický činitel jakosti $Q_{es}$	2,75
Mechanický činitel jakosti $Q_{ms}$	14,06
Celkový činitel jakosti $Q_{ts}$	2,30
Jmenovitá citlivost $L_s$	92,23 dB
Účinnost $\eta$	1,00 %
Odpor kmitacího systému $r_{ms}$	0,91 Ns/m



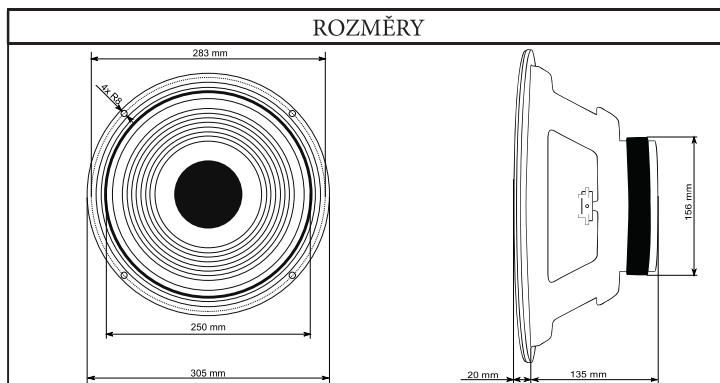
JENSEN P12R - B



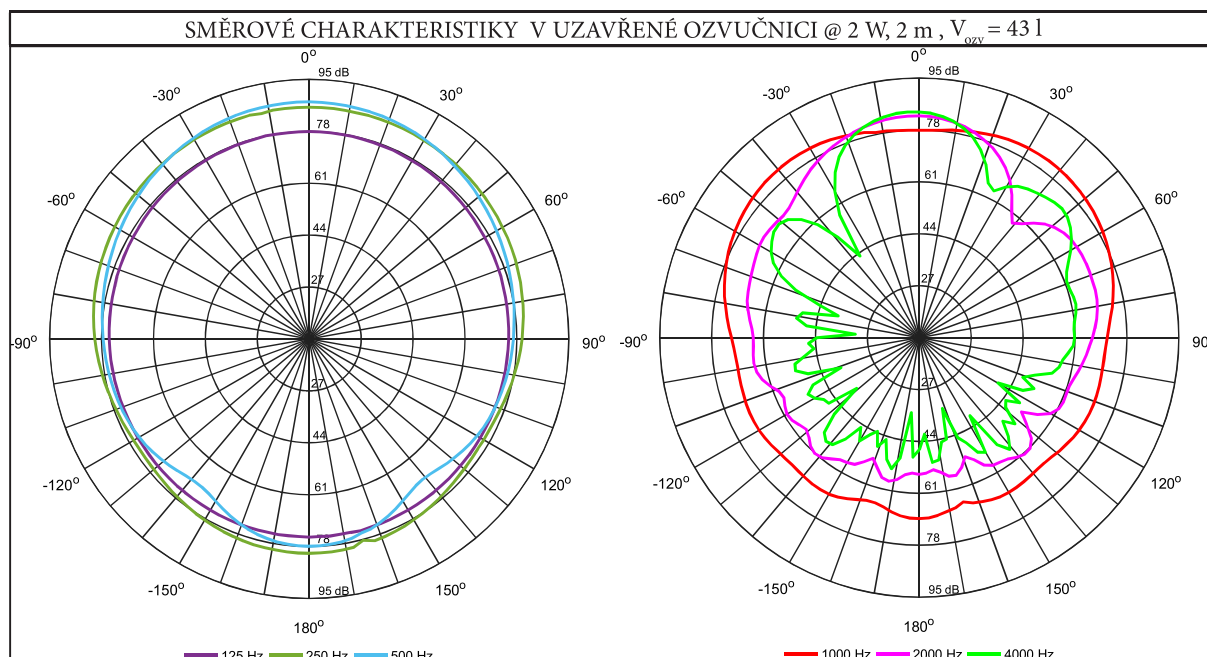
HH INVADER - A

# HH Invader

ZÁKLADNÍ PARAMETRY	
Celkový průměr	305 mm
Hmotnost	4,70 kg
Nominální impedance $X_{nom}$	8 $\Omega$
Nominální příkon $P_{NOM}$	40 W
Citlivost @1W, 1m $L_s$	94,4 dB
Kmitočtové pásmo	68-6540 Hz
Rezonanční kmitočet $f_s$	72 Hz
THD <sub>1W</sub>	2,27 %
THD <sub>10W</sub>	8,13 %
Magnet	Keramický



THIELE-SMALL PARAMETRY	
Činný odpor km. cívky $R_e$	6,33 $\Omega$
Aktivní plocha membrány $S_d$	490,00 cm <sup>2</sup>
Bl faktor	12,73 Tm
Celková hm. kmit. systému $m_{ms}$	26,73 g
Hmotnost kmit. systému $m_{md}$	20,45 g
Celková poddajnost membr. $c_{ms}$	0,19 mm/N
Akustická poddajnost $c_a$	4,5 <sup>^</sup> 10 <sup>^</sup> 7 m <sup>5</sup> /N
Ekvivalentní objem $V_{as}$	62,30 l
Elektrický činitel jakosti $Q_{es}$	0,47
Mechanický činitel jakosti $Q_{ms}$	15,40
Celkový činitel jakosti $Q_{ts}$	0,46
Jmenovitá citlivost $L_s$	98,96 dB
Účinnost $\eta$	4,75 %
Odpor kmitacího systému $r_{ms}$	0,78 Ns/m





HH INVADER - B

