

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří HEFLER**
Osobní číslo: **E19N0003P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Konstrukce akustických zdrojů zvuku pro ověřování volného akustického pole**
Zadávající katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

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



Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem a realizací akustického zdroje pro zjišťování parametrů volného akustického pole ve frekvenčním pásmu alespoň 100Hz – 8kHz. První část práce se zabývá studiem norem ČSN EN ISO 3745, ČSN ISO 6926 a ČSN ISO 26101, kde je popsána metodika určování způsobilosti volného pole a jsou zde shrnuty požadavky na zkušební zdroje. Druhá část práce je věnována návrhu a realizaci zdroje. Poslední část se věnuje měření parametrů vyrobeného zdroje.

Klíčová slova

Volné akustické pole, bezodrazová komora, polobezodrazová komora, pokles akustického tlaku, akustický střed zdroje, všesměrový zdroj zvuku, směrová charakteristika

Abstract

The presented diploma thesis deals with the design and implementation of an acoustic source for determining the parameters of a free acoustic field in the frequency band at least 100Hz - 8kHz. The first part of the thesis deals with the study of standards ČSN EN ISO 3745, ČSN ISO 6926 and ČSN ISO 26101, where the methodology for determining the free field capability is described and the requirements for test sources are summarized. The second part of the work is devoted to the design and implementation of source. The last part is devoted to measuring the parameters of manufactured source.

Key words

Free acoustic field, anechoic chamber, semi-anechoic chamber, sound pressure level drop, acoustic center of source, omnidirectional acoustic source, directional characteristic of acoustic source

Prohlášení

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

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

V Plzni dne 7.6.2021

Jiří Hefler

Poděkování

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

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Zdeňku Frankovi za odbornou pomoc při výrobě zdroje. Zdroj byl vyroben v nově vzniklé dílně Markerspace na Fakultě elektrotechnické v Plzni.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK	12
1 BEZODRAZOVÉ A POLOBEZODRAZOVÉ KOMORY S ODRAZIVOU ROVINNOU	13
1.1 ZÁKON POKLESU AKUSTICKÉHO TLAKU	13
1.2 MĚŘENÍ PARAMETRŮ ZPŮSOBILOSTI VOLNÉHO ZVUKOVÉHO POLE	14
2 ZKUŠEBNÍ ZDROJE	17
2.1 ČASOVÁ STABILITA A OPAKOVATELNOST VÝSTUPU AKUSTICKÉHO VÝKONU	17
2.2 SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY ZDROJE.....	17
2.3 SMĚROVÝ INDEX ZDROJE.....	18
2.4 KALIBRACE ZDROJE.....	18
2.5 UMÍSTĚNÍ ZDROJE.....	19
2.6 VELIKOST ZDROJE	19
3 NÁVRH ZDROJE	20
3.1 EXISTUJÍCÍ ŘEŠENÍ.....	20
3.2 VÝBĚR VHODNÉ KONSTRUKCE	22
3.3 VÝPOČET DYNAMICKÉHO ROZSAHU ZDROJE.....	22
3.4 VÝBĚR REPRODUKTORŮ	23
3.5 STANOVENÍ POČTU REPRODUKTORŮ.....	24
3.6 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORU V UZAVŘENÉ OZVUČNICI.....	25
3.7 NÁVRH KONSTRUKCE ZDROJE	30
3.8 ZAPOJENÍ REPRODUKTORŮ	31
4 VÝROBA ZDROJE	32
5 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ VYROBENÉHO ZDROJE	33
5.1 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA.....	34
5.2 SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA	37
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY	41
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A – KATALOGOVÉ HODNOTY REPRODUKTORŮ UDÁVANÉ VÝPOČTEM	1
PŘÍLOHA B – AMPLITUDOVÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY.....	4
PŘÍLOHA C – SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY ZDROJE.....	7

Úvod

Předkládaná práce je zaměřená na konstrukci akustického zdroje zvuku pro ověřování volného akustického pole, který bude využíván na Katedře materiálů a technologií na Fakultě elektrotechnické v Plzni.

Zdroj bude převážně využíván pro ověřování parametrů polobezodrazových komor s odrazovou rovinou. Z toho důvodu byla vybrána konstrukce zdroje vyzařující polokulovou vlnoplochu ve frekvenčním pásmu 100 Hz až 8kHz.

První část práce je věnována metodice určování způsobilosti volného pole v bezodrazových a polobezodrazových komorách s odrazivou rovinou. Tato metodika je blíže popsána v normě ČSN ISO 26101. V druhé části práce jsou shrnuty požadavky na zkušební zdroje. Tyto požadavky jsou blíže popsány v normách ČSN ISO 26101, ČSN ISO 6926 a ČSN EN ISO 3745. Další část práce se věnuje návrhu a realizaci samotného zdroje. Poslední část práce je zaměřená na ověření parametrů realizovaného zdroje.

Seznam symbolů a zkratk

W	akustický výkon [W]
I	akustická intenzita [W/m^2]
P	akustický tlak [Pa]
L_p	hladina akustického tlaku [dB]
D_I	index směrovosti akustického zdroje
Q	činitel směrovosti
F_s	rezonanční kmitočet reproduktoru ve volném prostoru [Hz]
R_e	stejnoseměrný odpor vinutí cívky [Ω]
Q_{es}	elektrický činitel jakosti reproduktoru
Q_{ms}	mech. činitel jakosti
Q_{ts}	celkový činitel jakosti
V_{as}	ekvivalentní objem reproduktoru [l]
S_d	efektivní plocha membrány [cm^2]
M_{ms}	hmotnost celého kmitacího systému [g]
C_{ms}	poddajnost kmitacího systému reproduktoru [m/N]
S_{ms}	tuhost kmitacího systému neboli převrácená hodnota poddajnosti [N/m]
R_{ms}	mechanické tlumení. [Ns/m]
Bl	gyrační faktor – součin velikosti magnetické indukce a délky vinutí [T·m]
L_e	elektrická indukčnost kmitací cívky měřená při 1 kHz [mH]

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 POKLES AKUSTICKÉHO TLAKU – PŘEVZATO Z [6].....	13
OBRÁZEK 2 NOR 276- PŘEVZATO Z [7].....	20
OBRÁZEK 3 NOR 275- PŘEVZATO Z [7].....	20
OBRÁZEK 4 SOUSTAVA ZDROJŮ POUŽITÝCH V [9].....	21
OBRÁZEK 5 REPRODUKTOR FRS 7A	23
OBRÁZEK 6 POKRYTÍ AKUSTICKÉHO POLE JEDNOTLIVÝMI REPRODUKTORY	24
OBRÁZEK 7 SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORU FRS 7 A – PŘEVZATO Z [11].....	25
OBRÁZEK 8 NÁHRADNÍ SCHÉMA PŘÍMOVYZAŘUJÍCÍHO ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU	26
OBRÁZEK 9 NÁHRADNÍ SCHÉMA PŘÍMOVYZAŘUJÍCÍHO ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU PŘEVEDENÉ NA ELEKTRICKOU STRANU.....	26
OBRÁZEK 10 NÁHRADNÍ SCHÉMA ELEKTRODYNAMICKÉHO REPRODUKTORU V UZAVŘENÉ OZVUČNICI PŘEVEDENÉ NA ELEKTRICKOU STRANU	27
OBRÁZEK 11 VYPOČÍтанÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA REPRODUKTORU FRS 7A S MEZNÍ FREKVENCÍ 252 Hz.....	30
OBRÁZEK 12 3D MODEL DÍLU KONSTRUKCE ZDROJE.....	31
OBRÁZEK 13 3D MODEL KONSTRUKCE ZDROJE	31
OBRÁZEK 14 SCHÉMA ZAPOJENÍ REPRODUKTORŮ.....	32
OBRÁZEK 15 VYTIŠTĚNÁ KONSTRUKCE ZDROJE	32
OBRÁZEK 16 VYROBENÝ AKUSTICKÝ ZDROJ.....	33
OBRÁZEK 17 SCHÉMA MĚŘENÍ VYROBENÉHO ZDROJE.....	33
OBRÁZEK 18 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA BÍLÝM ŠUMEM V OSE REPRODUKTORU VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE	34
OBRÁZEK 19 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA RŮŽOVÝM ŠUMEM V OSE REPRODUKTORU VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE.....	34
OBRÁZEK 20 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA BÍLÝM ŠUMEM MEZI DVĚMA REPRODUKTORY PO OBVODU VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE.....	35
OBRÁZEK 21 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA RŮŽOVÝM ŠUMEM MEZI DVĚMA REPRODUKTORY PO OBVODU VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE.....	35
OBRÁZEK 22 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA BÍLÝM ŠUMEM V OSE MEZI TŘEMI REPRODUKTORY VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE.....	36
OBRÁZEK 23 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA RŮŽOVÝM ŠUMEM V OSE MEZI TŘEMI REPRODUKTORY VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE.....	36
OBRÁZEK 24 RELATIVNÍ MĚROVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJE MĚŘENA VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE ...	37
OBRÁZEK 25 RELATIVNÍ SMĚROVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJE MĚŘENA VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE .	37
OBRÁZEK 26 SMĚROVOST ZDROJE V BLÍZKOSTI OSY REPRODUKTORU VE SPODNÍ ŘADĚ MĚŘENA VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE	38
OBRÁZEK 27 SMĚROVOST ZDROJE V BLÍZKOSTI OSY MEZI DVĚMA REPRODUKTORY VE SPODNÍ ŘADĚ MĚŘENA VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE	38
OBRÁZEK 28 FOTOGRAFIE Z PRŮBĚHU MĚŘENÍ ZDROJE.....	39
AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA BÍLÝM ŠUMEM V OSE REPRODUKTORU VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE	4
AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA BÍLÝM ŠUMEM MEZI DVĚMA REPRODUKTORY PO OBVODU VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE	4
AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA BÍLÝM ŠUMEM V OSE MEZI TŘEMI REPRODUKTORY VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE	5
AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA RŮŽOVÝM ŠUMEM V OSE REPRODUKTORU VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE	5
AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA RŮŽOVÝM ŠUMEM MEZI DVĚMA REPRODUKTORY PO OBVODU VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE	6
AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MĚŘENA RŮŽOVÝM ŠUMEM V OSE MEZI TŘEMI REPRODUKTORY VE VZDÁLENOSTI 0,5 M OD ZDROJE.....	6
RELATIVNÍ MĚROVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJE MĚŘENA VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE	7
RELATIVNÍ MĚROVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJE MĚŘENA VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE	7
SMĚROVOST ZDROJE V BLÍZKOSTI OSY REPRODUKTORU VE SPODNÍ ŘADĚ MĚŘENA VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE	8
SMĚROVOST ZDROJE V BLÍZKOSTI OSY REPRODUKTORU VE SPODNÍ ŘADĚ MĚŘENA VE VZDÁLENOSTI 1 M OD ZDROJE	8

Seznam tabulek

TABULKA 1.2-1 MAXIMÁLNÍ POVOLENÁ ODCHYLKA ZMĚŘENÝCH HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU OD TEORETICKÝCH HLADIN PODLE ZÁKONA POKLESU	16
TABULKA 2-1-1 MAXIMÁLNÍ HODNOTA SMĚRODATNÉ ODCHYLKY HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU REFERENČNÍHO ZDROJE ZVUKU V OPAKOVATELNÝCH PODMÍNKÁCH – PŘEVZATO Z [4]	17
TABULKA 2-2-1 MAXIMÁLNÍ POVOLENÉ ODCHYLKY AKUSTICKÉHO TLAKU MEZI SOUSEDNÍMI TŘETINOOKTÁVOVÝMI PÁSMY.....	17
TABULKA 2-3-1 PŘÍPUSTNÉ ODCHYLKY SMĚROVOSTI ZKUŠEBNÍHO ZDROJE – PŘEVZATO Z [5].....	18
TABULKA 3-1-1 ROZLOŽENÍ ZDROJŮ PRO POKRYTÍ PÁSMA 40 Hz- 40 KHz POUŽITÉ V ČLÁNKU [8]	21
TABULKA 3-1-2 ROZLOŽENÍ ZDROJŮ PRO POKRYTÍ PÁSMA 20 Hz- 10 KHz POUŽITÉ V ČLÁNKU [9]	21
TABULKA 3-6-1 TS PARAMETRY REPRODUKTORU FRS 7A UDÁVANÉ VÝROBCEM.....	29

1 Bezodrazové a polobezodrazové komory s odrazivou rovinou

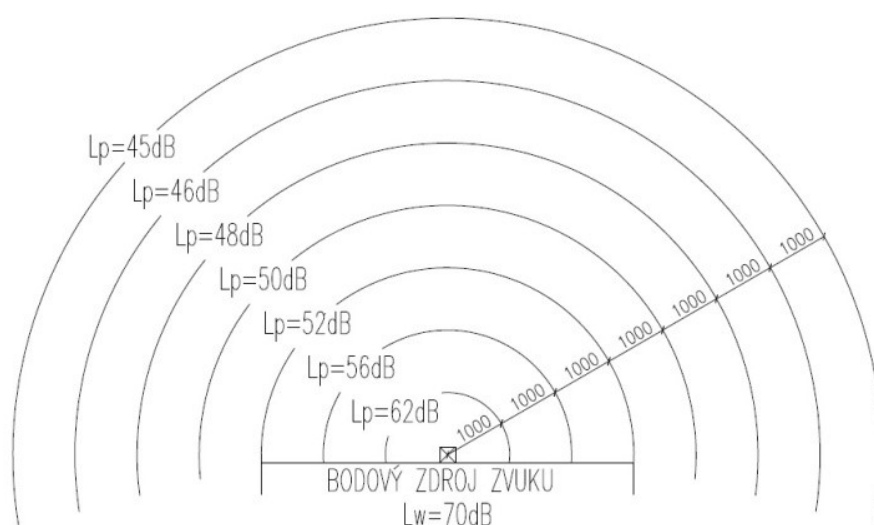
Cílem bezodrazových komor je vytvoření volného akustického pole. Toho je dosaženo pomocí materiálů, které dokážou pohltit veškerou na ně dopadající akustickou energii. V bezodrazové komoře tyto materiály zakrývají všechny obvodové stěny, včetně stropu a podlahy. U polobezodrazových komor, je podlaha nezakrytá a volné pole se vyskytuje nad ní. Nazýváme ji odrazivou rovinou.

Problematikou určování způsobilosti prostředí volného akustického pole se zabývá norma [3], jejíž předmětem je:

- metodika určování způsobilosti bezodrazových a polobezodrazových prostorů
- stanovení metody používající diskrétní frekvence nebo širokopásmový signál
- stanovení postupu pro určení způsobilosti všesměrového zdroje
- metoda útlumu zvuku divergencí
- popis prezentace výsledků a popis nejistot pro jednotlivá měření

1.1 Zákon poklesu akustického tlaku

Způsobilost volného pole v těchto komorách určujeme pomocí zákona poklesu akustického tlaku. Ten říká, že podél přímé dráhy od zdroje zvuku dochází k poklesu střední hodnoty akustického tlaku, vlivem sférického šíření zvukových vln v tomto poli.[3]



Obrázek 1 Pokles akustického tlaku – převzato z [6]

$$W = \oiint I \cdot dS \quad (1.1)$$

Protože je plocha integrace uzavřená, můžeme rovnici 1.1 zjednodušit.

$$W = I \cdot S \quad (1.2)$$

Protože se jedná o všesměrový zdroj, vyřazovaná plocha má tvar koule.

$$W = I_1 \cdot S_1 = I_2 \cdot S_2 \quad (1.3)$$

$$I_1 \cdot 4 \cdot \pi \cdot l_1^2 = I_2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot l_2^2 \quad (1.4)$$

Pokud nyní řekneme, že $l_2 = 2 \cdot l_1$, dojdeme k závěru, že akustický tlak s dvojnásobkem vzdálenosti klesne o 6 dB.

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 \quad (1.5)$$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 \quad (1.6)$$

$$L_{P_2} - L_{P_1} = 10 \cdot \log\left(\frac{l_1}{2 \cdot l_1}\right)^2 = -6 \text{ dB} \quad (1.7)$$

1.2 Měření parametrů způsobilosti volného zvukového pole

Zdroj zvuku, který se používá, by měl aproximovat bodový zdroj zvuku v daném frekvenčním rozsahu. Měl by být znám jeho akustický střed a jeho stabilita by neměla kolísat o více než $\pm 0,2$ dB. Zdroj musí být schopen vyzařovat dostatečný akustický výkon tak, aby hladina akustického tlaku byla vyšší alespoň o 6 dB než hladina hluku pozadí. Tato podmínka musí být dodržena po celé dráze pohybu mikrofону. Akustický střed zdroje zvuku by měl být umístěn uprostřed komory.

Použitý mikrofón musí být všesměrový. Mikrofón se pohybuje minimálně po pěti drahách. Ty musí být přímé a musí směřovat od akustického středu zdroje. Alespoň jedna z drah musí směřovat do jednoho z rohů prostoru. Alespoň jedna z drah do hraniční plochy prostředí. Pokud prostor nemá čtvercový půdorys, jedna z drah musí směřovat k nejbližší hraniční ploše prostoru a jedna k nejbližší ploše prostoru. Pokud prostor obsahuje

hraniční plochu s rozdílnými vlastnostmi od okolních ploch (např. dveře, vyústění ventilace nebo průzory), ostatní dráhy musí směřovat k těmto plochám. Začátek dráhy mikrofonu musí být uvnitř fyzického objemu zkušebního zdroje a první měření akustického tlaku musí začínat nejvýše čtvrtinu vlnové délky nejnižší frekvence hodnocení od tohoto počátku. Délka měření musí být minimálně polovina vlnové délky nejnižší frekvence hodnocení a poslední bod měření musí končit na hypotetickém okraji bezodrazového prostoru. [3]

Pro měření parametrů způsobilosti volného akustického pole je využívána metoda útlumu divergencí. Naměřené výsledky poklesu akustického tlaku v komoře, ve kterých jsou zahrnuty příspěvky přímých i odražených složek akustické energie, se porovnávají podle rovnice 1.8 s poklesem akustického tlaku, vyskytující se v ideálním volném zvukovém poli. [3]

Následující text této kapitoly je výtahem z [3].

$$\Delta L_{pi} = L_{pi} - L_p(r_i) \quad (1.8)$$

Kde:

ΔL_{pi} je odchylka od zákona poklesu.

L_{pi} je změřená hladina akustického tlaku v bodě měření i .

$\Delta L_{pi}(r_i)$ je hladina akustického tlaku ve vzdálenosti r_i odhadnutá dle zákona poklesu.

Odhad hladin akustického tlaku založený na zákoně poklesu se provádí podle rovnice 1.9.

$$L_p(r_i) = b - 20 \cdot \log \left(\frac{r_i}{r_0} \right) \quad (1.9)$$

Kde:

b je parametr nastaven na optimalizaci naměřených hladin akustického tlaku do tolerančního pásma k maximalizování hodnocené vzdálenosti od zkoušeného zdroje.

r_0 je referenční hodnota vzdálenosti 1 m.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N 20 \cdot \log \left(\frac{r_i}{r_0} \right) + \sum_{i=1}^N L_{pi}}{N} \quad (1.10)$$

V prostoru, který je považován za bezodrazový, nebo polobezodrazový, nesmí odchylky naměřených hladin akustického tlaku od odhadu na základě zákona poklesu, včetně rozšířené nejistoty měření překročit hodnoty dané tabulkou 1.2-1.

Tabulka 1.2-1 Maximální povolená odchylka změřených hladin akustického tlaku od teoretických hladin podle zákona poklesu

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

2 Zkušební zdroje

Zdroj zvuku, který se používá, by měl aproximovat bodový zdroj zvuku v daném frekvenčním rozsahu. Měl by být znám jeho akustický střed a jeho stabilita by neměla kolísat o více než $\pm 0,2$ dB. Akustický střed zdroje zvuku by měl být umístěn uprostřed komory. [3]

2.1 Časová stabilita a opakovatelnost výstupu akustického výkonu

Podle normy [4] musí být hladina akustického výkonu, referenčního zdroje zvuku, konstantní v čase v každém třetinooktávovém pásmu za splnění opakovatelných podmínek. V Tabulce 2.1-1 jsou uvedeny maximální hodnoty směrodatné odchylky hladiny akustického tlaku.

Tabulka 2-1-1 Maximální hodnota směrodatné odchylky hladiny akustického výkonu referenčního zdroje zvuku v opakovatelných podmínkách – převzato z [4]

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

Norma [4] dále říká, že výrobce zdroje je povinen uvést rozsah kolísání napájecího napětí, při kterém v libovolně vybraném třetinooktávovém pásmu hladina akustického výkonu nekolísá o více než $\pm 0,3$ dB

2.2 Spektrální charakteristiky zdroje

Výstupem referenčního zdroje musí být ustálený zvuk v celém svém kmitočtovém rozsahu, který je rozdělen na nejméně třetinooktávová pásma se středními kmitočty v rozsahu 100 Hz až 10 kHz. [4]

Tabulka 2-2-1 Maximální povolené odchylky akustického tlaku mezi sousedními třetinooktávovými pásmy

Frekvenční rozsah	Maximální odchylka mezi sousedními 1/3 oktávovými pásmy v daném rozsahu	Rozsah 1/3 oktávových pásem nad daným rozsahem
100 Hz až 10 kHz	± 3 dB	± 12 dB
Rozšířený rozsah	± 4 dB	± 16 dB

2.3 Směrový index zdroje

Podle normy [4] pro polobezodrazové místnosti nesmí nejvyšší hodnota směrového indexu zdroje v libovolném třetinooktávovém pásmu se středním kmitočtem mezi 100 Hz až 10 kHz přesáhnout + 6 dB. V bezodrazových komorách platí pro zdroje stejné požadavky a měření směrovosti probíhá podle pokynů popsanych v příloze A normy [5]. Zde je popsán postup měření a přípustné odchylky směrovosti zkušebního zdroje, které jsou uvedeny v Tabulce 2.3-1. [4]

Tabulka 2-3-1 Přípustné odchylky směrovosti zkušebního zdroje – převzato z [5]

Typ zkušební místnosti	Střední frekvence třetinooktávového pásma [Hz]	Přípustné odchylky směrovosti [dB]
Bezodrazová	≤630	± 1,5
	800 až 5000	± 2,0
	6300 až 10000	± 2,5
	>10000	± 5,0
Polobezodrazová	≤630	± 2,0
	800 až 5000	± 2,5
	6300 až 10000	± 3,0
	>10000	± 5,0

Samotný index směrovosti pak udává míru rozsahu, ve kterém zkoušený zdroj hluku vyzařuje zvuk ve směru i-té polohy mikrofону na měřicí ploše vzhledem ke střední hodnotě vyzařování zvuku přes měřicí plochu. [5]

$$D_{Ii} = L_{pi} - \overline{L}_P \quad (2.1)$$

Kde:

L_{pi} je hladina akustického tlaku v i-té poloze mikrofону na měřicí ploše korigovaná na hluk pozadí, pokud je zkoušený zdroj hluku v provozu

\overline{L}_P je hladina akustického tlaku na ploše

2.4 Kalibrace zdroje

Norma [4] říká, že výrobce zdroje musí určit maximální časový interval mezi kalibracemi tak, aby nedocházelo k překročení maximálních hodnot směrodatných odchylek hladin akustického výkonu, uvedených v Tabulce 2.1-1.

Pro určení, zda je kalibrace referenčního nutná mezi jednotlivými časovými intervaly, by měly být příležitostně měřeny hladiny akustického tlaku v třetinooktávových pásmech v jednom nebo více referenčních bodech. [4]

2.5 Umístění zdroje

Pro bezodrazové komory platí pravidlo, že zdroj má být umístěn předpokládanou polohou akustického středu do geometrického středu místnosti. Je nutné, aby konstrukční prvky zdroje (např. stojan, podstavec nebo závěs zdroje) neovlivňovali parametry volného pole a je tudíž nutné, tyto konstrukční prvky byly řádně zabezpečeny proti odrazům zvukových vln.

Pro polobezodrazové komory platí pravidlo, že zdroj má být umístěn předpokládanou polohou akustického středu do geometrického středu místnosti. Zdroj má být umístěn vždy na odrazivé rovině a vzdálenost akustického středu zdroje od odrazivé roviny nesmí přesáhnout 150 mm. V případě, že je v odrazivé ploše dutina, zdroj se umísťuje tak, aby jeho vyzářovací plocha byla v rovině s podlahou. Obecně by měl být zdroj nesymetricky umístěn vůči stěnám a ve vzdálenosti nejméně 1,5 m od stěny. [4] [5]

2.6 Velikost zdroje

V normách není velikost zdroje přesně popsána. Vycházejme tedy z dostupných informací. Podle normy [3] při měření způsobilosti prostředí volného pole musí být začátek dráhy mikrofону uvnitř fyzického objemu zkušebního zdroje a první měření akustického tlaku musí začínat nejvýše čtvrtinu vlnové délky nejnižší frekvence hodnocení od tohoto počátku. Pro zdroj s rozsahem od 100 Hz do 8 kHz se jedná o vzdálenost 85 cm. Norma [5] udává, že měření akustického tlaku ve vzdálenosti 50 cm od akustického středu zdroje. Norma [3] pro určování způsobilosti volného akustického pole doporučuje zdroj, který ve vzdálenosti 0,5 m splňuje požadavky uvedené v Tabulce 2.3-1. Velikost zdroje by tedy měla být do 50 cm od jeho akustického středu.

3 Návrh zdroje

3.1 Existující řešení

Na trhu existuje několik výrobců, kteří vyrábějí zdroje podobného typu. Nejčastěji se jedná o zdroje typu dodekahedron, které vyzařují všesměrově.



Obrázek 2 Nor 276- převzato z [7]

Na obrázku 2 je zdroj Nor 276 určený pro frekvenční pásmo 50-5000 Hz. Tento zdroj je určen především pro měření v prostorové akustice. Zdroj odpovídá normě ISO 140-3, která se zabývá měřením zvukové izolace stavebních konstrukcí. Část 3 se zabývá laboratorním měřením vzduchové neprůzvučnosti stavebních konstrukcí.

Společnost Norsonic také nabízí zdroj Nor 275, který má tvar polovičního dodekahedronu. Je určený pro frekvenční pásmo 500-5000 Hz. Je složen ze 6 reproduktorů a odpovídá normě ISO 140. Svou konstrukcí je určen pro měření v polobezodrazových laboratořích.



Obrázek 3 Nor 275- převzato z [7]

Při průzkumu trhu nebyl nalezen žádný komerčně dostupný zdroj, který by odpovídal požadavkům norem [3], [4] a [5], popsáním v kapitole 2. Problematice zdroje pro ověřování parametrů bezodrazových prostorů se věnují články [8] a [9]. V obou případech se jedná o sestavy zdrojů, které společně pokryjí pracovní frekvenční pásmo.

Článek [8] popisuje řešení pro frekvenční pásmo 40 Hz až 40 kHz. Rozložení zdrojů pro polobezodrazové komory je popsáno v tabulce 3.1-1.

Tabulka 3-1-1 Rozložení zdrojů pro pokrytí pásma 40 Hz- 40 kHz použité v článku [8]

f [kHz]	Použitý zdroj
0,04-0,4	Poloviční dodekahedron, průměr 400mm, 6 reproduktorů
0,5-4	Tlakový reproduktor s 1/2'' sondou
4,8-20	Tlakový reproduktor s 1/4'' sondou
0,04-2	Reproduktor uložený v podlaze komory průměr 75mm
2,5-40	Piezo reproduktor uložený v podlaze

Článek [9] popisuje řešení pro frekvenční pásmo 20 Hz až 10 kHz. Rozložení zdrojů pro polobezodrazové komory je popsáno v tabulce 3.1-2.

Tabulka 3-1-2 Rozložení zdrojů pro pokrytí pásma 20 Hz- 10 kHz použité v článku [9]

f [kHz]	Použitý zdroj
0,02-0,18	Reprobedna s 12' reproduktorem RCF L12P540
0,15-5	Konstrukce ve tvaru koule s 12 středovými reproduktory BMS
1,4-20	Konstrukce ve tvaru koule s 12 výškovými reproduktory Föön

Soustava zdrojů z článku [9] je zobrazena na obrázku 4.



Obrázek 4 Soustava zdrojů použitých v [9]

3.2 Výběr vhodné konstrukce

Cílem práce je vytvořit zdroj, který bude převážně využíván v polobezodrazových komorách. Zadaný frekvenční rozsah zdroje je 100 Hz až 8 kHz. Soustavy zdrojů popsané v [8] a [9] sice pokrývají celé frekvenční pásmo. Měření s velkým počtem zdrojů je však zdoluhavé, protože je potřeba provádět měření pro každý zdroj zvlášť, což přináší značné komplikace (např. stavba měřících soustav). Z tohoto důvodu je cílem této práce vytvořit jediný zdroj, který bude vyhovovat všem požadavkům. Zdroj by měl ideálně vyzařovat polokulové vlnoplochy. Z tohoto důvodu byla zvolena konstrukce typu polokoule s několika reproduktory po povrchu.

3.3 Vypočet dynamického rozsahu zdroje

Hladina akustického tlaku by měla být větší alespoň o 10 dB nad hladinou okolního hluku ve všech bodech na každé dráze mikrofonu ve celém frekvenčním pásmu.

$$L_p = L_0 + 10 \times \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) \quad (3.1)$$

Kde:

L_p je výsledná hladina akustického tlaku

L_0 je hladina akustického tlaku v místě zdroje

Q je činitel směrovosti – pro zdroje s polokulovou vyzařovací plochou ($Q=2$)

r je vzdálenost od zdroje

Pokud známe hluk pozadí a známe minimální odstup nad hlukem pozadí, jejich součtem získáme minimální požadovanou hodnotu v nejbližším měřícím bodě v komoře. Úpravou vztahu 3.1 jsem pak schopni vypočítat potřebnou hladinu akustického tlaku v místě zdroje.

$$L_0 = L_p - 10 \cdot \log \left(\frac{Q}{2\pi r^2} \right) \quad (3.2)$$

3.4 Výběr reproduktorů

Při výběru reproduktorů je zapotřebí zohlednit několik faktorů. Jedním z nejdůležitějších je směrovost zdroje. Požadavky norem na směrovost jsou popsány v kapitole 2.3. Je jasné, že směrovost je úměrně závislá na počtu reproduktorů. Čím více reproduktorů ve zdroji bude, tím lepší bude i směrovost zdroje. Toto platí především na vyšších kmitočtech.

Dalším neméně důležitým faktorem, který je potřeba uvažovat, je velikost zdroje. Požadavky na velikost zdroje jsou popsány v kapitole 2.6. Určují ji především rozměry a počet reproduktorů. Je tedy zapotřebí najít vhodný kompromis v počtu reproduktorů tak, aby byla splněna požadovaná směrovost a zároveň byla velikost zdroje co nejmenší.

Pro konstrukci zdroje bylo vybíráno mezi reproduktory výrobce Visaton. Hlavní důraz byl kladen na směrové charakteristiky a co nejvíce vyrovnané amplitudové frekvenční charakteristiky. V úvahu přicházely následující reproduktory:

- FRW 10 N
- FRS 8
- FRS 7 A
- KT 100 V
- HX 10
- FRS 8M
- FR 58

Nakonec byl výběr zúžen na 3 reproduktory FRS 8 M, FRS 7 A a FR58. Návrh zdroje byl proveden pro všechny tři reproduktory. Zde bude uveden návrh pro reproduktor FRS 7 A.

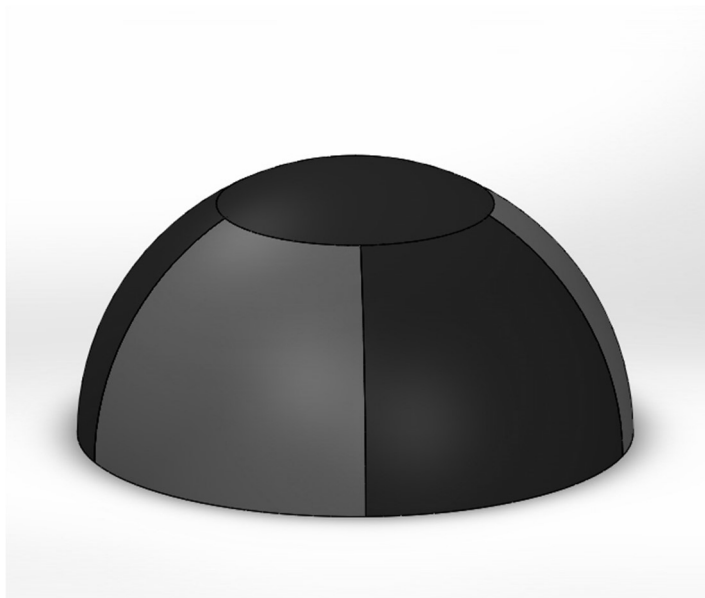


Obrázek 5 Reproduktor FRS 7A

3.5 Stanovení počtu reproduktorů

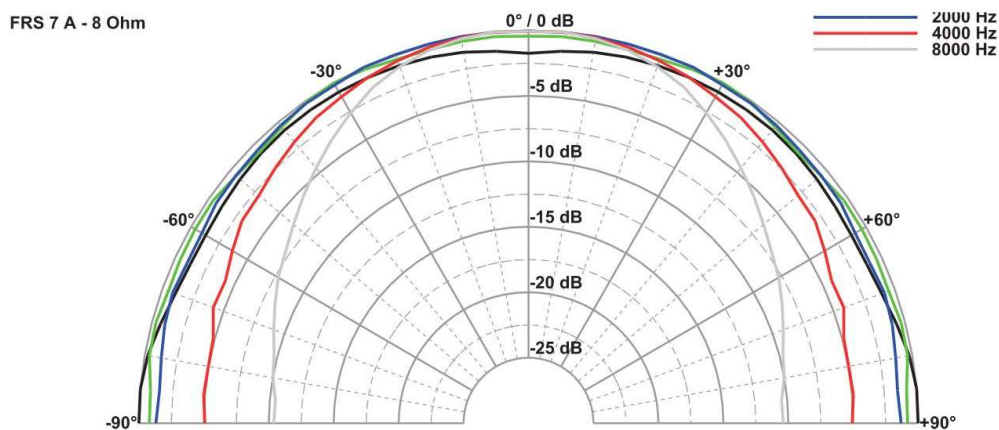
Nejdříve je potřeba stanovit počet reproduktorů ve zdroji. Aby to bylo možné, je nutné určit rozložení akustického pole okolo zdroje. K tomu potřebujeme znát směrové charakteristiky reproduktoru, které následně bude skládat podle geometrického rozložení reproduktorů.

Uvažujme nyní, že bude použito 6 reproduktorů. Jeden reproduktor na vrcholu polokoule a 5 po obvodu. Geometrický střed uložení reproduktorů je uprostřed základny polokoule. Při pohledu zepředu je poloměr pokryt třemi reproduktory, z nichž každý pokrývá 60° . Po obvodu je pokrytý pěti reproduktory, z nichž každý pokrývá 72° . Pokrytí akustického pole je znázorněno na obrázku 6.



Obrázek 6 Pokrytí akustického pole jednotlivými reproduktory

Z obrázku 6 je patrné, že nejkritičtějšími místy jsou z pohledu směrovosti body na rozhraní dvou a třech reproduktorů. Na obrázku 7 je zobrazena směrová charakteristika reproduktoru udávaná výrobcem. Je známo, že nejhorší směrovost má reproduktor pro 8 kHz. Kritická místa byla tedy hodnocena právě pro 8 kHz.



Obrázek 7 Směrová charakteristika reproduktoru FRS 7 A – převzato z [11]

Pro určení poklesu akustického tlaku v kritických místech bylo pro zjednodušení zanedbáno posunutí reproduktoru od akustického středu zdroje a působení ostatních reproduktorů zdroje, které s kritickými místy přímo nesousedí, se také neuvažovalo. Ze směrové charakteristiky byly odečteny hodnoty poklesu akustického tlaku.

- Pro úhel 36° je pokles akustického tlaku -4 dB
- Pro úhel 30° je pokles akustického tlaku -2,5 dB

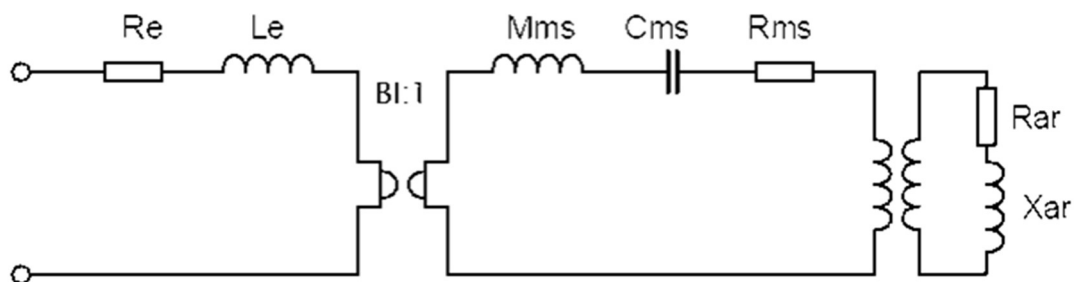
$$L_p = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right) \quad (3.3)$$

V bodě, kde se setkává působení dvou reproduktorů vyšel pokles akustického tlaku přibližně -1 dB. V bodě, kde se setkává působení třech reproduktorů vyšel zisk akustického tlaku 1,3 dB. Srovnání výsledných hodnot s přípustnými odchylkami směrovosti, uvedených v Tabulce 2.3-1, potvrdilo, že zvolený počet reproduktorů, tedy 6, je dostačující.

Použitý postup pro určení akustického tlaku v těchto bodech je spíše odhadem, nicméně pro tento účel dostačující. Pro přesné určení by bylo zapotřebí složitých simulací a výpočtů.

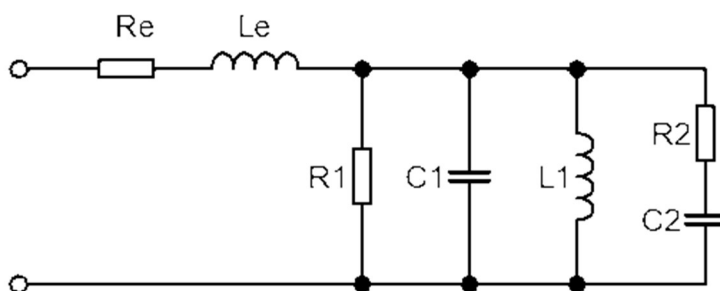
3.6 Frekvenční charakteristika reproduktoru v uzavřené ozvučnici

Určení frekvenční charakteristiky bylo provedeno na základě výpočtu přenosové funkce, který je popsán v článku [10], ze kterého vychází tato kapitola. Doplňující informace byly čerpány z [2]. Výpočet vychází z náhradního schématu elektrodynamického reproduktoru.



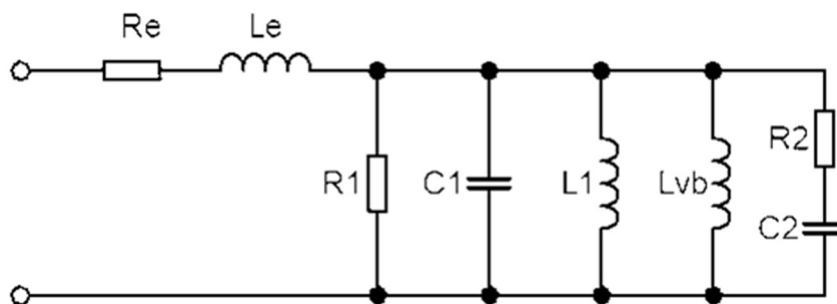
Obrázek 8 Náhradní schéma přímovyřazujícího elektrodynamickeho reproduktoru

Na obrázku 8 je zobrazeno náhradní schéma přímovyřazujícího reproduktoru, tedy bez ozvučnice. Schéma popisuje tři části reproduktoru. Část před gyrátorem popisuje elektrickou část reproduktoru. Za gyrátorem je zobrazena mechanická část reproduktoru a poslední část schématu popisuje vyzařovací impedanci, tedy odpor sloupce vzduchu, který je kladen na membránu reproduktoru. Mezi elektrickými a mechanickými veličinami platí určitá analogie. Napětí lze uvažovat jako sílu, proud jako rychlost, elektrický odpor jako mechanický odpor, kapacitu jako poddajnost (nebo tuhost, jež je převrácená hodnota poddajnosti), a indukčnosti jako hmotnost. Gyrátor, který spojuje elektrickou a mechanickou část, má jako vstupní veličinu proud kmitající cívky. Výstupem je pak síla, působící na mechanickou část reproduktoru, v analogii tedy napětí. Pro další uvažování je nutné převést celé schéma na elektrickou část.



Obrázek 9 Náhradní schéma přímovyřazujícího elektrodynamickeho reproduktoru převedené na elektrickou stranu

Dosud uvedená náhradní schémata vyjadřují analogii k přimovýrazujícímu elektrodynamickému reproduktoru. Pro návrh zdroje je ale zapotřebí uvažovat reproduktor v uzavřené ozvučnici. Chování reproduktoru v uzavřené ozvučnici lze popsat doplněním schémat o impedanci objemu ozvučnice, tedy poddajnosti membrány. Po převedení na elektrickou stranu je tato impedance vyjádřena jako indukčnost a je paralelně přiřazena k původní indukčnosti, která představuje poddajnost závěsu membrány.



Obrázek 10 Náhradní schéma elektrodynamického reproduktoru v uzavřené ozvučnici převedené na elektrickou stranu

Jednotlivé prvky lze vypočítat podle následujících vztahů, převzatých z článku [10].

$$R_1 = \frac{(Bl)^2}{R_{ms}} \quad (3.4)$$

Kde:

Bl je gyrační faktor

R_{ms} je mechanické tlumení

$$C_1 = \frac{M_{ms}}{(Bl)^2} \quad (3.5)$$

Kde:

M_{ms} je hmotnost kmitajícího systému

$$L_1 = C_{ms} \times (Bl)^2 \quad (3.6)$$

Kde:

C_{ms} je poddajnost kmitacího systému

$$R_2 = \frac{(Bl)^2}{S_d^2 R_{AR}} \quad (3.7)$$

Kde:

S_d je efektivní plocha membrány

R_{AR} je vyzářovací odpor spolukmitajícího sloupce vzduchu

$$C_2 = \frac{m_{AR} S_d^2}{(Bl)^2} \quad (3.8)$$

Kde:

m_{AR} – vyzářovací hmotnost spolukmitajícího sloupce vzduchu

$$R_{AP} = 128 \times C_0 \times \frac{\rho}{9 \times \pi^2 \times S_d} \quad (3.9)$$

$$m_{AP} = 8 \times \frac{\rho}{3 \times \pi^2 \times r} \quad (3.10)$$

Kde:

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

ρ – hustota vzduchu při 20 °C (= 1,205 kg/m³)

r – poloměr membrány

$$c_{vb} = \frac{V_b}{P_0 \times \kappa} \quad (3.11)$$

Kde:

V_b je objem uzavřené ozvučnice v litrech.

P_0 je normální akustický tlak

κ je Poissonova konstanta. (=1,4)

$$L_{vb} = \frac{(Bl)^2 \times V_b}{P_0 \times \kappa \times S_d^2} = \frac{c_{vb} \times (Bl)^2}{S_d^2} \quad (3.12)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_{ms} \times (C_{ms} + C_{vb})}} \quad (3.13)$$

$$f_r = F_s \sqrt{\frac{V_b \times V_{AS}}{V_b}} \quad (3.14)$$

Kde:

F_s je rezonanční kmitočet reproduktoru

$$Q_{tc} = Q_{ts} \times \frac{f_r}{F_s} \quad (3.15)$$

Kde:

Q_{tc} je celkový činitel jakosti reproduktoru

Q_{ts} je činitel jakosti reproduktoru

Přenosová funkce je dána vztahem 3.16.

$$T_{j\omega} = \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_r}\right)^2}{\left(\frac{j\omega}{\omega_r}\right)^2 + \left(\frac{j\omega}{\omega_r Q_{tc}}\right) + 1} \quad (3.16)$$

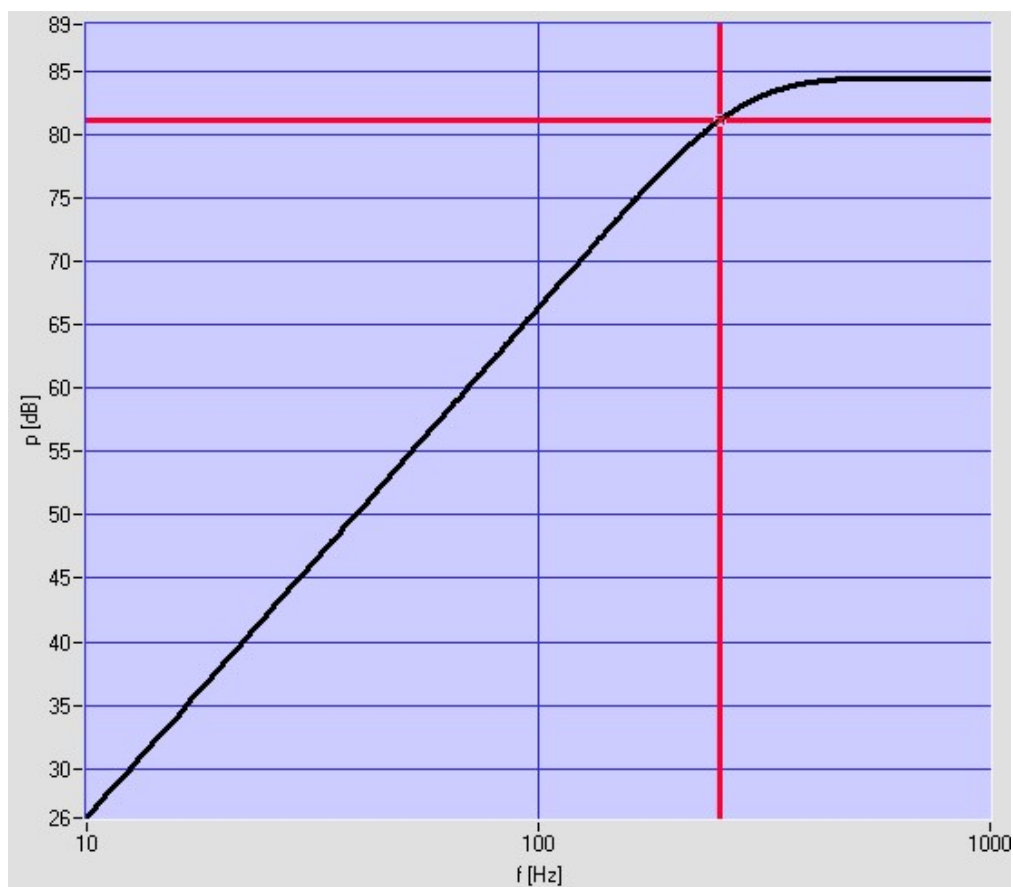
Uvedený postup nezohledňuje směrovost reproduktoru na vyšších kmitočtech, proto je vhodný pro použití na nižších kmitočtech. S ohledem na tuto skutečnost byla frekvenční charakteristika vypočtena v programu vytvořeném na Katedře materiálů a technologií na Fakultě elektrotechnické v Plzni, kde je problém vyřešen. Pro vytvoření simulace byly zapotřebí Thiele-Smallovy parametry reproduktoru uvedené v tabulce 3-6-1.

Tabulka 3-6-1 TS parametry reproduktoru FRS 7A udávané výrobcem

Re [Ω]	Le [mH]	Bl [T.m]	fr [Hz]	Qm [-]	Qe [-]	Qts [-]	Vas [l]	Mms [g]	S [cm ²]
7,2	0,6	2,1	250	3,32	2,08	1,28	0,3	0,8	22

Pomocí programu byla následně spočítána frekvenční charakteristika. Optimální objem ozvučnice 0,45 l / 1 reproduktor, tedy přibližně 3 litru na celý zdroj po přičtení objemu

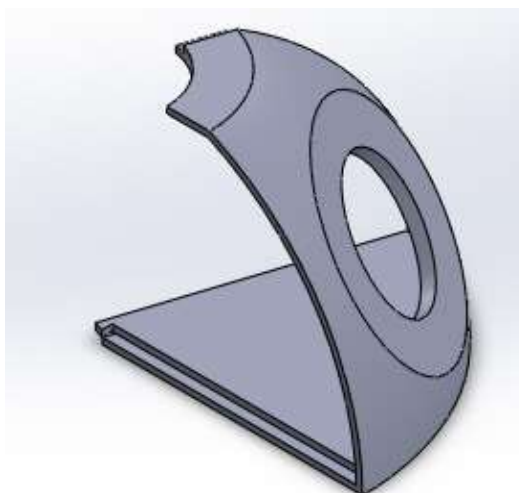
magnetů, který je přibližně 0,2 litru, je výsledkem optimalizace, kde se hledal kompromis mezi co nejnižší dolní mezní frekvencí (-3dB) a co nejmenším objemem ozvučnice.



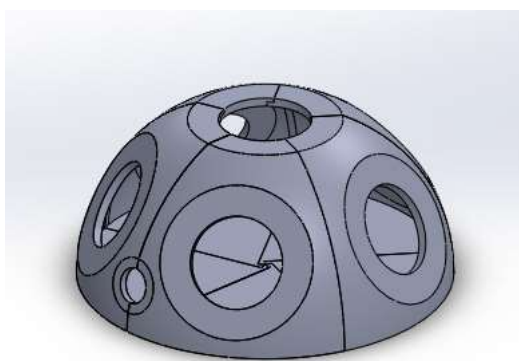
Obrázek 11 Vypočítaná frekvenční charakteristika reproduktoru FRS 7A s mezní frekvencí 252 Hz

3.7 Návrh konstrukce zdroje

Po stanovení počtu reproduktorů, typu reproduktoru a optimálního objemu ozvučnice, bylo přistoupeno k návrhu konstrukce zdroje. Jako první bylo zapotřebí určit technologii výroby. Vzhledem k možnostem katedry v úvahu přicházela výroba dřevěné konstrukce z truhlářské překližky, nebo výroba pomocí 3D tisku. Vzhledem k jednodušší a přesnější výrobě byla zvolena technologie 3D tisku. Vnější poloměr zdroje byl stanoven 125 mm při tloušťce stěny 6 mm. Při návrhu konstrukce bylo nutné uvažovat maximální tiskovou plochu použité tiskárny, která byla 200 mm x 200 mm. Proto byla konstrukce rozdělena na 5 dílů, které se při výrobě slepí. Aby byla dosažena potřebná pevnost ve spoji, byli při vytváření modelu vytvořeny 5mm zámky na plochách spojů. Model zdroje byl vytvořen ve studentské licenci programu SolidWorks 2020.



Obrázek 12 3D model dílu konstrukce zdroje

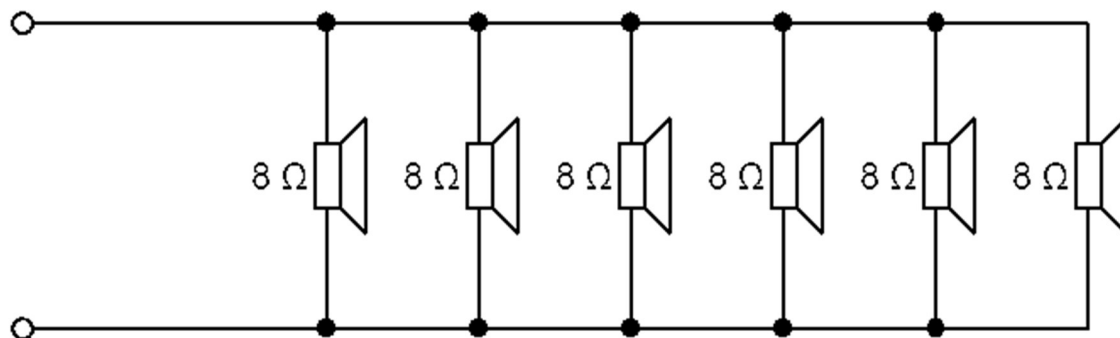


Obrázek 13 3D model konstrukce zdroje

3.8 Zapojení reproduktorů

Je nutné, aby všechny reproduktory vyzařovaly tzv. ve fázi. Proto bylo zvoleno paralelní zapojení všech 6 reproduktorů. Výsledná impedance je pak dána vztahem 3.17 a její hodnota je $1,33 \Omega$.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} + \frac{1}{Z_6}} \quad (3.17)$$



Obrázek 14 Schéma zapojení reproduktorů

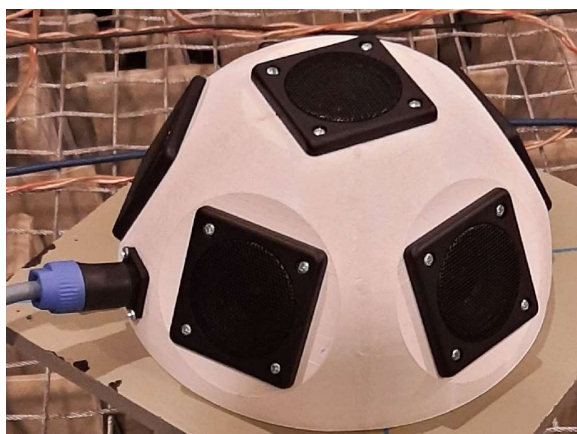
4 Výroba zdroje

K výrobě zdroje byla zvolena technologie 3D tisku. Celá konstrukce zdroje se skládá z 5 shodných dílů, které jsou k sobě lepeny. Pro zajištění těsnosti ozvučnice bylo nutné utěsnit všechny spoje na zdroji. K tomu byla využita tmel odolávající vibracím konstrukce.



Obrázek 15 Vytisknutá konstrukce zdroje

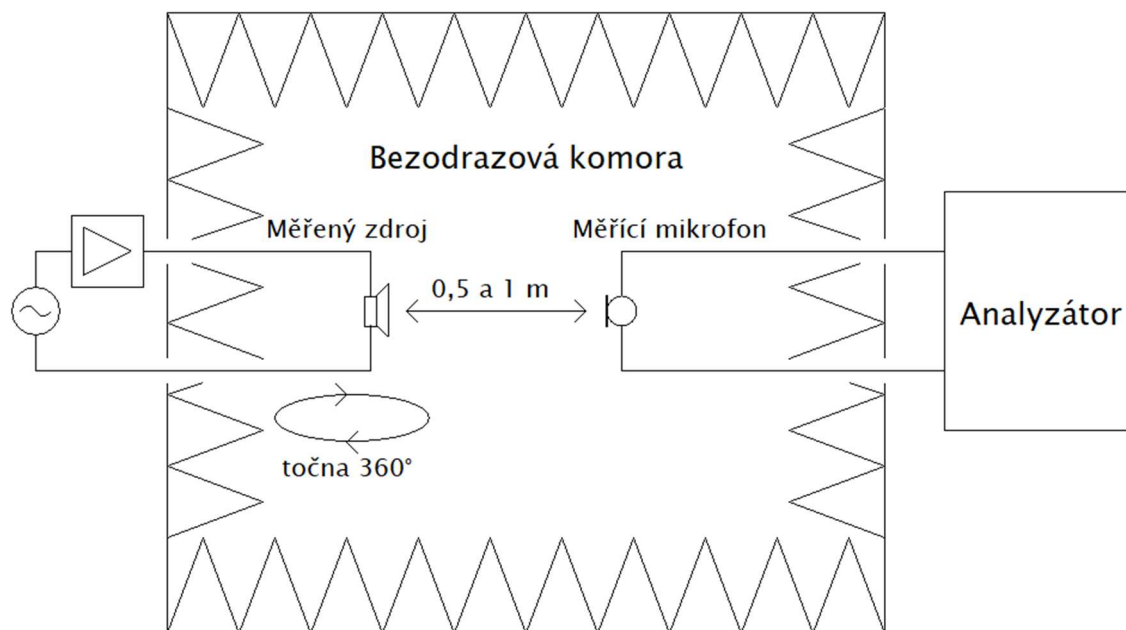
Před osazením reproduktorů bylo dno ozvučnice vyloženo akustickou vatou v tloušťce 20 mm. Reproductory jsou připojeny na dvoupinový konektor speakon Neutrik NL4FX.



Obrázek 16 Vyrobený akustický zdroj

5 Ověření parametrů vyrobeného zdroje

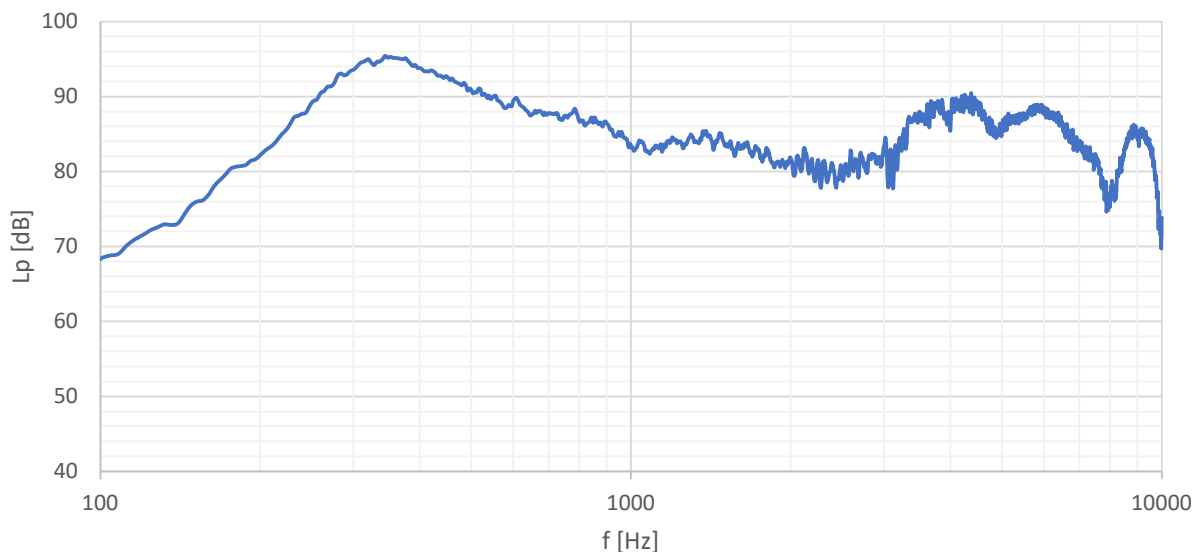
Ověření parametrů vyrobeného zdroje bylo provedeno na základě změřených amplitudových frekvenčních charakteristik zdroje a směrových charakteristik zdroje. Měření bylo provedeno v bezodrazové komoře na Fakultě elektrotechnické v Plzni. Protože je zdroj navrhován především pro použití v polobezodrazových komorách s odrazivou rovinou, byl zdroj umístěn na podkladovou desku o větších rozměrech, než je zdroj samotný. Tím bylo dosaženo alespoň částečného nahrazení odrazivé roviny.



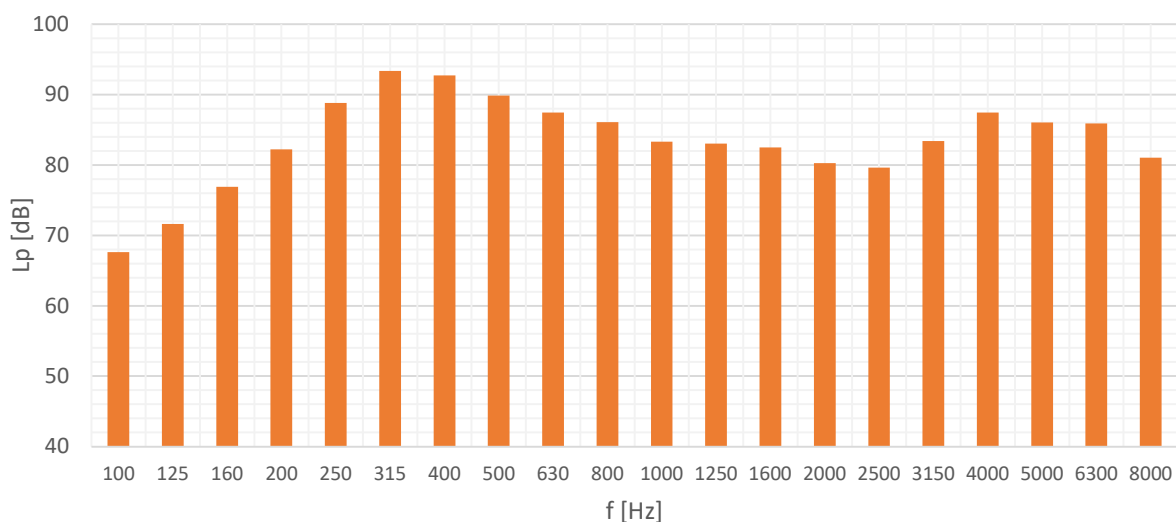
Obrázek 17 Schéma měření vyrobeného zdroje

5.1 Amplitudová frekvenční charakteristika

Amplitudová frekvenční charakteristika byla měřena ve třech bodech pro vzdálenosti 0,5 m a 1 m. V každém měřicím bodě bylo provedeno měření pomocí FFT analýzy v celém pásmu a CPB analýzy v 1/3 oktávových pásmech. První měřicí bod leží v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m od zdroje.



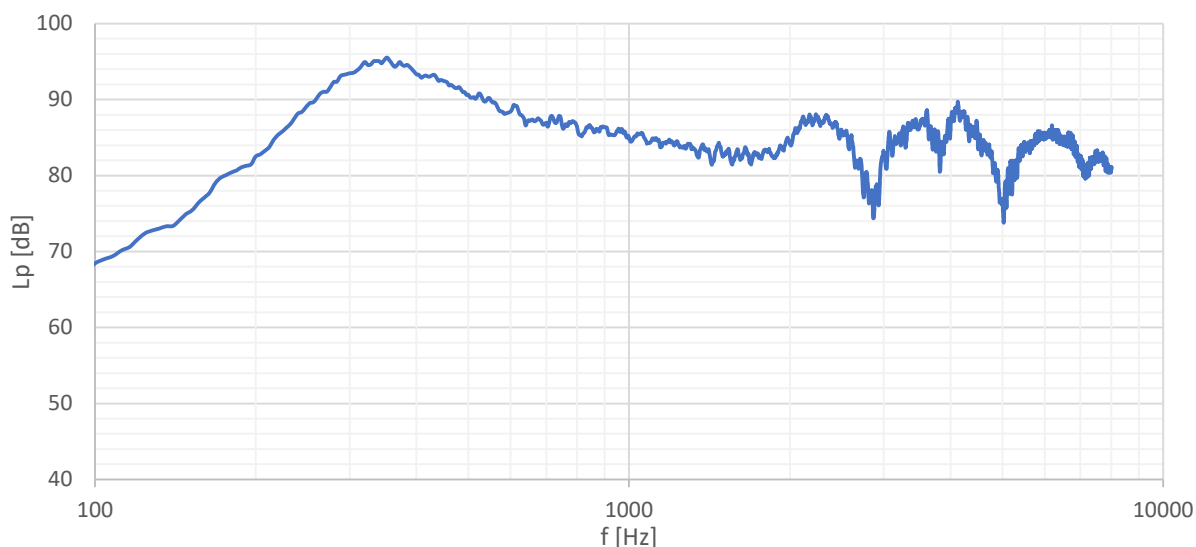
Obrázek 18 Amplitudová frekvenční charakteristika měřena bílým šumem v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m od zdroje



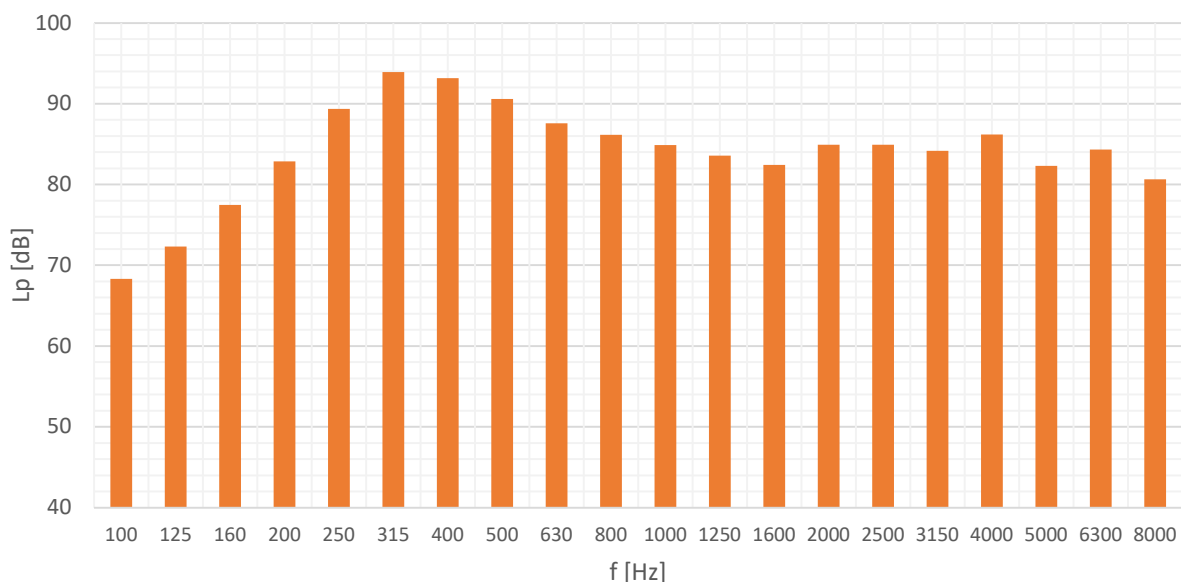
Obrázek 19 Amplitudová frekvenční charakteristika měřena růžovým šumem v ose reproduktoru ve vzdálenosti 1 m od zdroje

Při porovnání charakteristiky na obrázku 19 s tabulkou 2-2-1 zjistíme, že na kmitočtech od 100 Hz do 315 Hz není splněna podmínka odstupe 3 dB mezi sousedními 1/3 oktávovými pásmy.

Další měřicí bod leží mezi dvěma reproduktory ve spodní řadě ve vzdálenosti 1 m od zdroje.

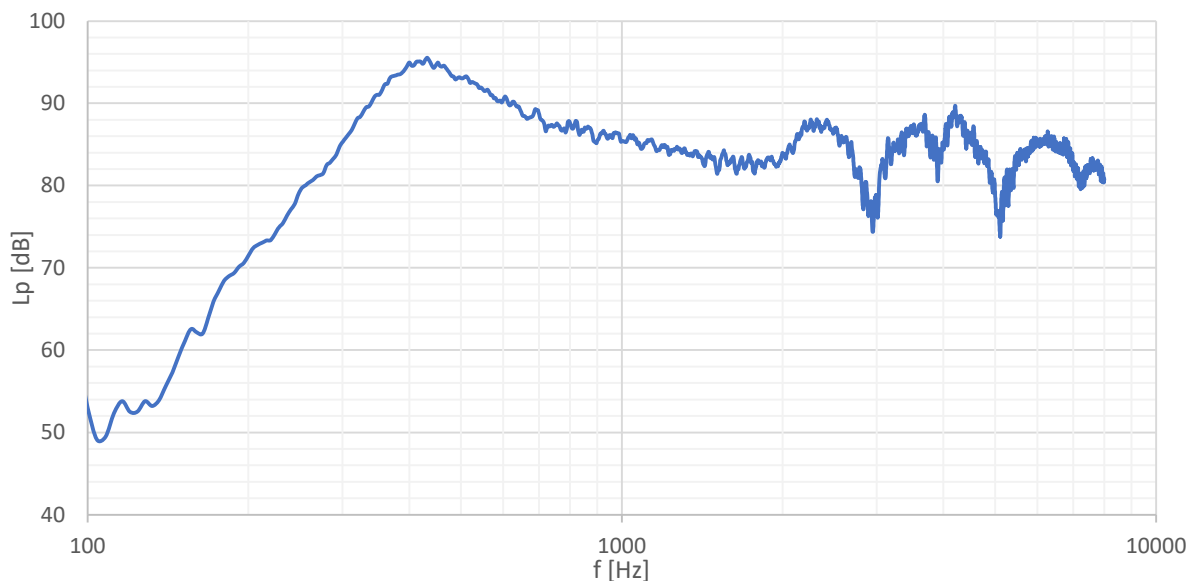


Obrázek 20 Amplitudová frekvenční charakteristika měřena bílým šumem mezi dvěma reproduktory po obvodu ve vzdálenosti 1 m od zdroje

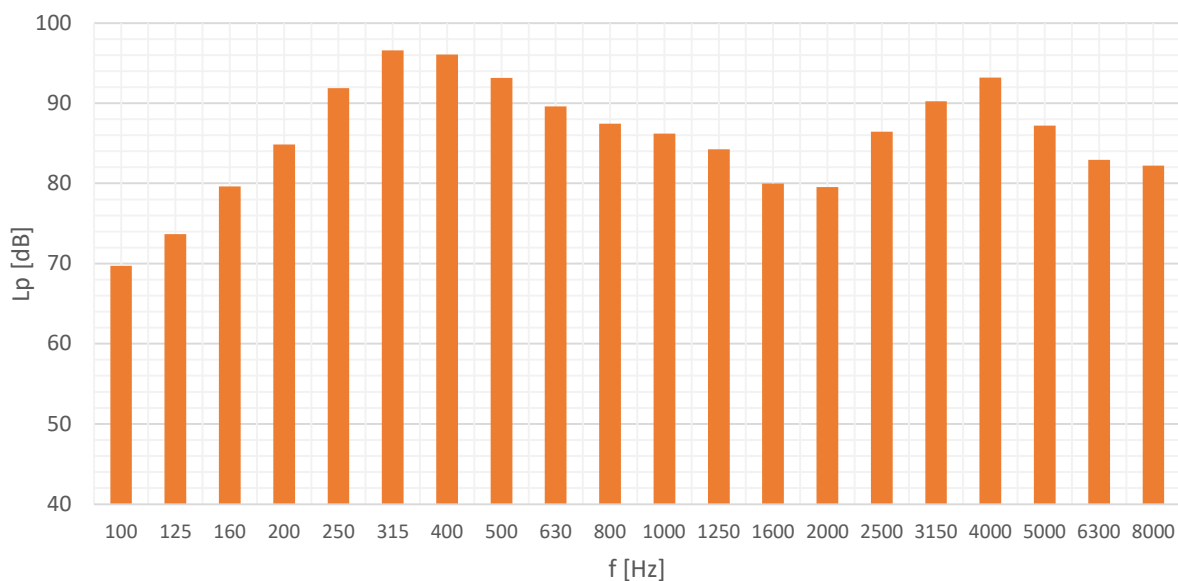


Obrázek 21 Amplitudová frekvenční charakteristika měřena růžovým šumem mezi dvěma reproduktory po obvodu ve vzdálenosti 1 m od zdroje

Posledním měřicí bod leží v ose mezi třemi reproduktory ve vzdálenosti 1 m od zdroje.



Obrázek 22 Amplitudová frekvenční charakteristika měřena bílým šumem v ose mezi třemi reproduktory ve vzdálenosti 1 m od zdroje



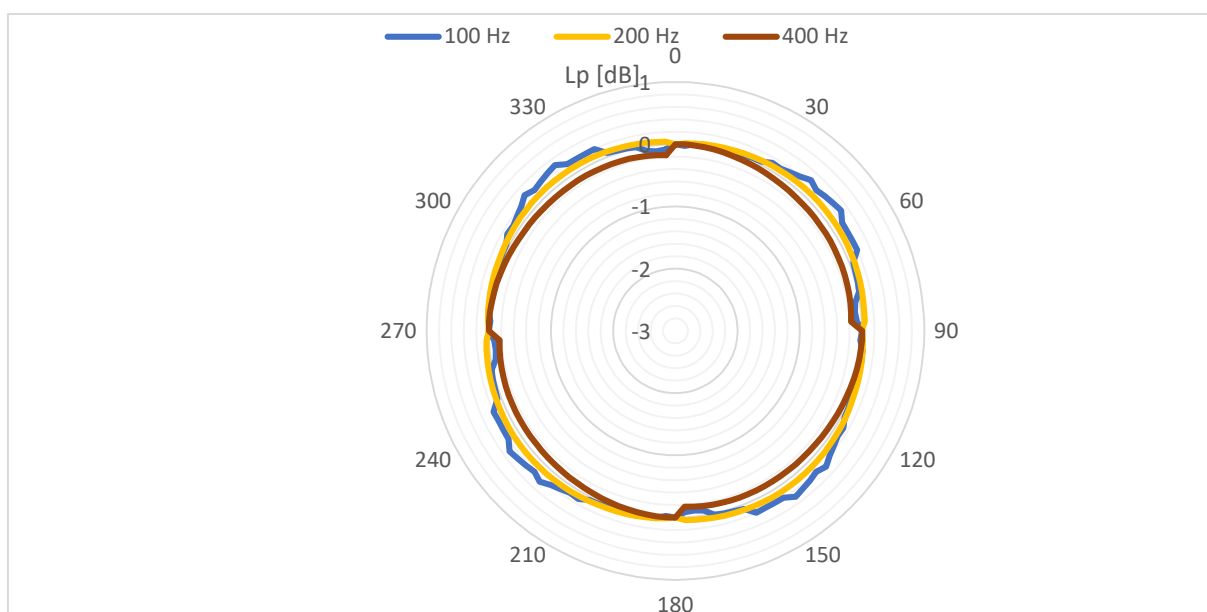
Obrázek 23 Amplitudová frekvenční charakteristika měřena růžovým šumem v ose mezi třemi reproduktory ve vzdálenosti 1 m od zdroje

Všechny amplitudové frekvenční charakteristiky, měřené bílým šumem, jsou viditelně zvlněné. Cílem je však aby byly co nejvíce vyrovnané. Vyrovnaní charakteristiky lze docílit vhodnou ekvalizací signálu. K tomu lze využít například DSP procesor. V takovém případě by byl zdroj použitelný přibližně od 250 Hz do 8 kHz, kde by díky vyrovnaní charakteristiky

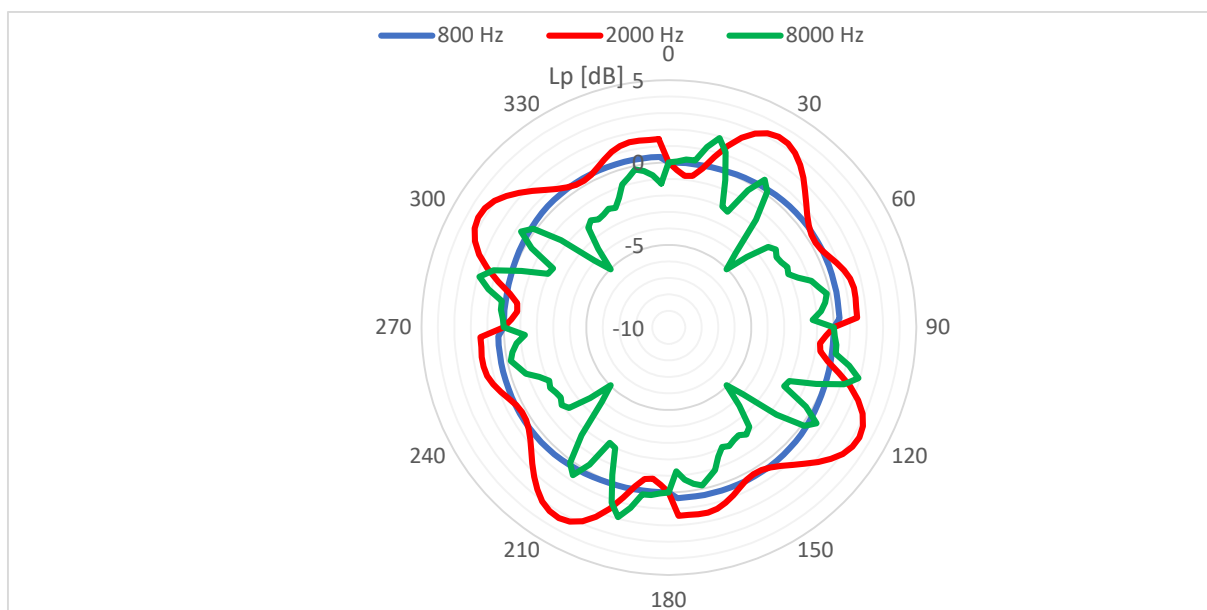
byla splněna podmínka maximálního odstupu 3 dB mezi sousedními 1/3 oktávovými pásmy. Amplitudové frekvenční charakteristiky pro ostatní měřící body jsou uvedeny v příloze B.

5.2 Směrová charakteristika

Měření směrové charakteristiky bylo provedeno pomocí dálkově ovládané točny. Výchozí poloha otáčení zdroje byla nastavena tak, aby byl mikrofon v ose reproduktoru ve spodní řadě. Měření bylo provedeno pro vzdálenosti 0,5 m a 1 m.

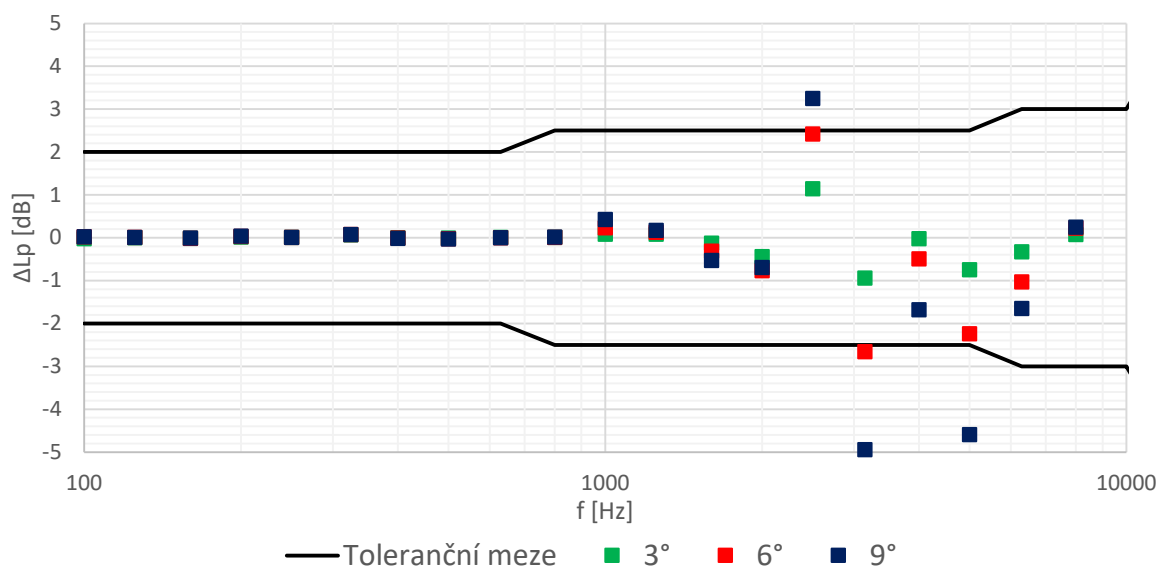


Obrázek 24 Relativní měrová charakteristika zdroje měřena ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje

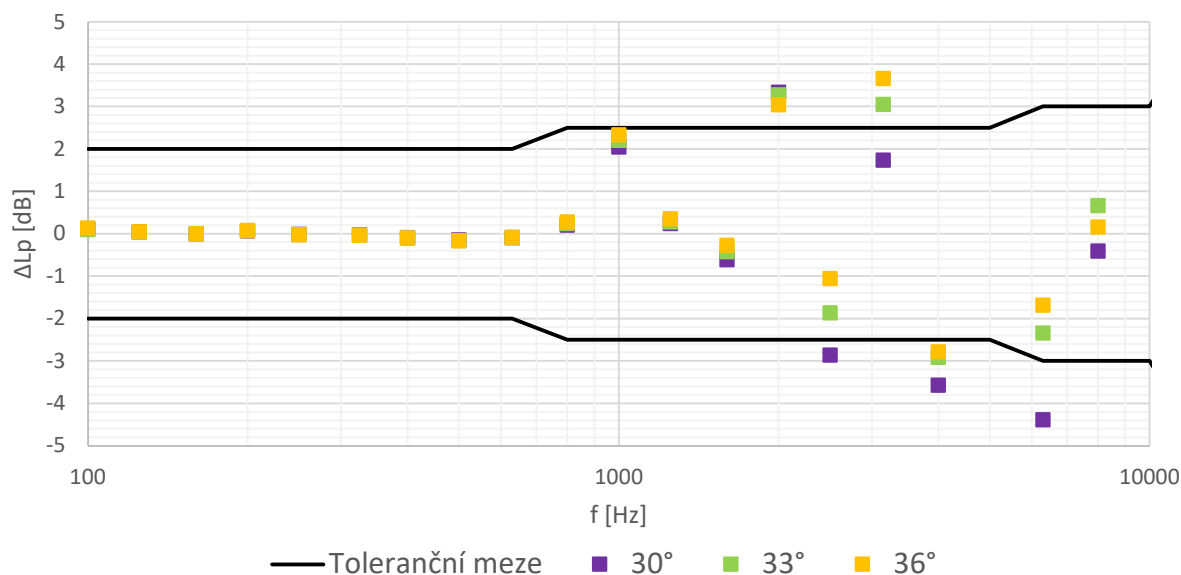


Obrázek 25 Relativní směrová charakteristika zdroje měřena ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje

Relativní směrové charakteristiky z obrázků 24 a 25 jsou po celém obvodu souměrné, zvolená konstrukce zdroje tedy vyhovuje. Pro porovnání směrovosti s normou [5] jsou však směrové charakteristiky nevhodné. Proto byly naměřené hodnoty vyjádřeny ve frekvenční charakteristice. Hodnoty akustického tlaku jsou vztaženy k hodnotám naměřeným v ose reproduktoru, tedy počátku otáčení zdroje při měření. Toleranční meze v charakteristikách jsou dány tabulkou 2-3-1.



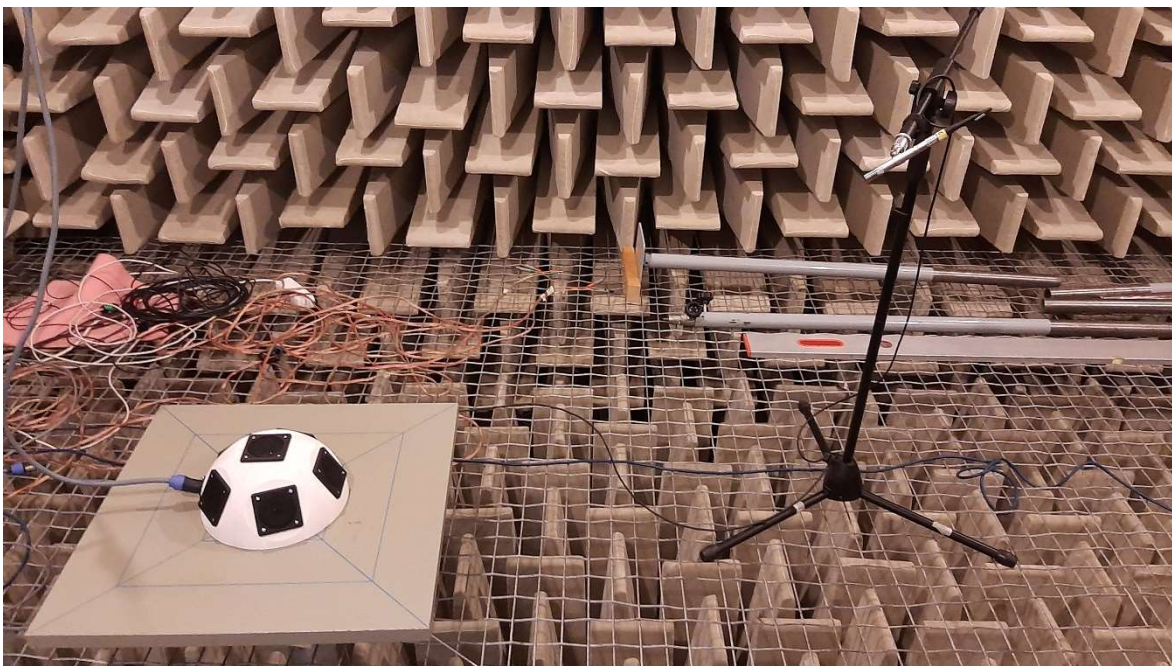
Obrázek 26 Směrovost zdroje v blízkosti osy reproduktoru ve spodní řadě měřena ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje



Obrázek 27 Směrovost zdroje v blízkosti osy mezi dvěma reproduktory ve spodní řadě měřena ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje

Z obrázku 26 je patrné, že ve vzdálenosti 0,5m zdroj přípustné směrodatné odchylky směrovosti, dané normou [5], splňuje do úhlu natočení 6° od osy reproduktoru ve spodní

řadě v celém frekvenčním pásmu. V dalších úhlech jsou toleranční meze překročeny. V ose mezi dvěma reproduktory zdroj splňuje směrovost do 2 kHz. Tyto výchyly jsou způsobeny především nevyrovnanou amplitudovou frekvenční charakteristikou. Jejich hodnota nepřekračuje toleranční meze o více než 1,5 dB. Vhodná ekvalizace signálu by tento problém měla eliminovat a zdroj by měl splňovat požadovanou směrovost danou normou [5] ve všech úhlech natočení. Směrové charakteristika změřené v 1 m vzdálenosti od zdroje jsou uvedeny v příloze C.



Obrázek 28 Fotografie z průběhu měření zdroje

Závěr

V začátku práce je popsána metoda určování způsobilosti volného pole v bezodrazových komorách a polobezodrazových komorách s odrazivou rovinou. V další části práce jsou popsány jednotlivé požadavky norem [3], [4] a [5] na zkušební akustické zdroje.

Hlavním cílem práce bylo navrhnout a realizovat akustický zdroj, nebo sestavu zdrojů pro ověřování volného akustického pole v pásmu 100 Hz – 8kHz, který by odpovídal požadavkům popsaným v úvodu práce. Při návrhu zdroje bylo rozhodnuto, že sestava zdrojů pro účely využití není příliš vhodná a bylo přistoupeno k návrhu jednoho zdroje tvaru polokoule. Jako vhodný reproduktor byl vybrán měnič od výrobce Visaton FRS 7 A. Následně byl stanoven počet potřebných reproduktorů, na základě výpočtu rozložení vyzařovaného akustického pole okolo zdroje. Samotný návrh konstrukce byl vytvořen v programu SolidWorks 2020.

Jako technologie výroby zdroje byl zvolen 3D tisk. Konstrukce je slepena z 5 shodných dílů. Pro zajištění potřebné těsnosti byla konstrukce vytmelena. Následně byly osazeny reproduktory.

Parametry vyrobeného zdroje byly ověřeny měřením v bezodrazové komoře. Výsledky měření ukázaly, že vyrobený zdroj neodpovídá požadavkům norem v celém frekvenčním pásmu, nicméně tyto požadavky lze splnit vhodnou úpravou měřicího signálu.

Seznam literatury

- [1] Malcolm J. Crocker. *Handbook of acoustics*. Wiley-Interscience- 1997
- [2] Ctirad Smetana a kolektiv. *Praktická elektroakustika*. SNTL Praha 1981
- [3] ČSN ISO 26101. *Akustika – Zkušební metody určování způsobilosti prostředí volného pole*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [4] ČSN ISO 6926. *Akustika – Požadavky na vlastnosti a kalibraci referenčních zdrojů zvuku používaných pro určování hladin akustického výkonu*. Český normalizační institut - 2001.
- [5] ČSN ISO 3745. *Akustika - Určení hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [6] *Ekvivalentní hladina akustického tlaku venkovních prostorů v praxi* [online]. Poslední změna 6. 5. 2013- [Cit. 15.4.2021]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vetrani-klimatizace/9866-ekvivalentni-hladina-akustickeho-tlaku-venkovnich-prostoru-v-praxi>
- [7] Norsonic. Product data- Noise Excitation Equipment for Building Acoustics Measurements. [online]. [Cit. 10.11.2020]. Dostupné z: <https://norsonic.be/assets/assets/1/noise-excitation.pdf>
- [8] Bethke, Ch., Wittstock, V. *Technical aspects in the qualification of free-field environments*. [online]. [Cit. 15. 11. 2020] Dostupné z: https://pub.dega-akustik.de/NAG_DAGA_2009/data/articles/000190.pdf
- [9] Ben-Gurgion University of the Negev. *ITA Measuring Loudspeaker*. [online]. [Cit. 15. 11. 2020] Dostupné z: <https://www.ee.bgu.ac.il/~acl/Equip/Dode-brochure.pdf>
- [10] Sýkora Bohumil. *Reproduktory a reproduktorové soustavy trochu jinak*. Amatérské rádio B/5 1993
- [11] Visaton. Nabídka společnosti visaton [online]. [Cit 15.4.2021] Dostupné z: <https://www.visaton.de/en/products/drivers/fullrange-systems/>

Přílohy

Příloha A – Katalogové hodnoty reproduktorů udávané výpočtem

8 cm (3,3") HiFi-Breitbandlautsprecher mit starkem Magnetantrieb und hohem Schalldruckpegel. Besonders geeignet für Schallzeilen und kleine Bassreflex-Lautsprecher, z.B. in Mini-Sub-Sat-Systemen.

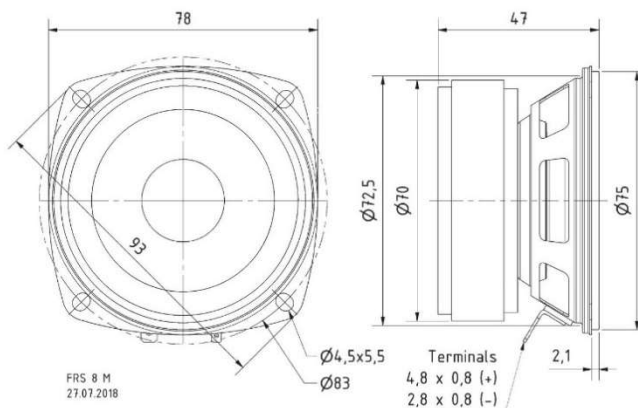
Anwendungsmöglichkeiten: Schallzeilen, Mini-Hifi-Boxen

Zubehör: Schutzgitter (Art. No. 1138, 4634)

8 cm (3.3") HiFi full-range driver with high force factor and good sensitivity. Special developed for use in column-speakers and small bass-reflex-cabinets, e.g. in miniature subwoofer/satellite-systems.

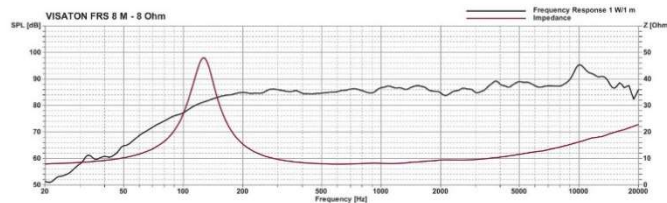
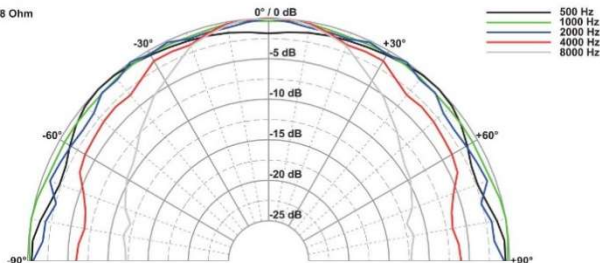
Typical applications: Column speakers, Mini hi-fi systems

Accessories: Protective grille (Art. No. 1138, 4634)



FRS 8 M
27.07.2018

FRS 8 M - 8 Ohm



GERMANY
VISATON[®]

FRS 8 M

Art. No. 2001 - 8 Ω



Art. No. 4634 *) Art. No. 1138 *)



Technische Daten / Technical Data

Nennbelastbarkeit Rated power	30 W
Musikbelastbarkeit Maximum power	50 W
Impedanz Impedance	8 Ω
Übertragungsbereich (-10 dB) Frequency response (-10 dB)	100-20000 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel Mean sound pressure level	88 dB (1 W/1 m)
Grenzauslenkung x_{max} Excursion limit x_{max}	± 2,5 mm
Resonanzfrequenz Resonant frequency	125 Hz
Obere Polplattenhöhe Height of front pole-plate	4 mm
Schwingspulendurchmesser Voice coil diameter	20 mm Ø
Schallwandöffnung Cut-out diameter	75 mm Ø
Anschluss Terminal	4,8 x 0,8 mm (+)/2,8 x 0,8 mm (-)
Gewicht netto Net weight	0,5 kg

*) Details und Zeichnungen siehe Seite 372-376 /
Details and drawings see page 372-376

Weitere Daten Seiten / for further data see pages 377-378

GERMANY
VISATON®

FRS 7 A

Art. No. 2412 – 8 Ω



Technische Daten / Technical Data

Nennbelastbarkeit	8 W
Rated power	8 W
Musikbelastbarkeit	15 W
Maximum power	15 W
Impedanz	8 Ω
Impedance	8 Ω
Abstrahlwinkel (-6 dB)	149°/4000 Hz
Opening angle (-6 dB)	149°/4000 Hz
Übertragungsbereich (-10 dB)	200–20000 Hz
Frequency response (-10 dB)	200–20000 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel	88 dB (1 W/1 m)
Mean sound pressure level	88 dB (1 W/1 m)
Resonanzfrequenz	220 Hz
Resonant frequency f_s	220 Hz
Schwingspuldurchmesser	14 mm
Voice coil diameter	14 mm
Anschluss	
Terminal	2,8 x 0,5 mm (+)/2,8 x 0,5 mm (-)
Gewicht netto	0,2 kg
Net weight	0,2 kg

6,5 cm (2,5") Breitbandlautsprecher mit ausgeglichenem Frequenzgang und sehr gutem Hochtonanteil. Besonders geeignet als Einbaulautsprecher für die Musikwiedergabe sowie zur Bestückung von ELA-Zeilen. Für die Baugröße ungewöhnlich hoher Wirkungsgrad. Entspricht dem Modell FRS 7 – 8 Ohm, jedoch mit Anschlussfahnen 2,8 x 0,8 mm (+) und 2,8 x 0,8 mm (-).

Anwendungsmöglichkeiten

- Schmale ELA-Zeilen
- Kontroll-Lautsprecher für elektronische Geräte
- Modellbau
- Elektronische Musikinstrumente

Eigenschaften

- Wasserdichte Membran
- Metallausführung
- 100 °C temperaturfest

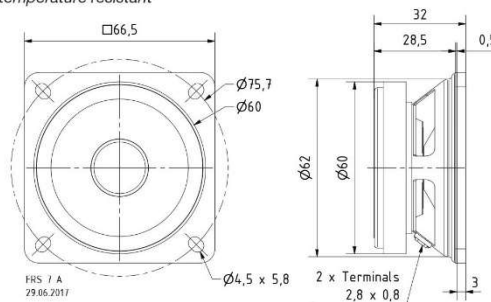
6.5 cm (2.5") fullrange speaker with balanced frequency response and very good highs. Especially suitable as built-in speaker for music reproduction and as driver for 100 V network column speakers. Outstandingly high efficiency compared to the small size. Equivalent to model FRS 7 - 8 Ohm, but with connectors 2.8 x 0.8 mm (+) and 2.8 x 0.8 mm (-).

Typical applications

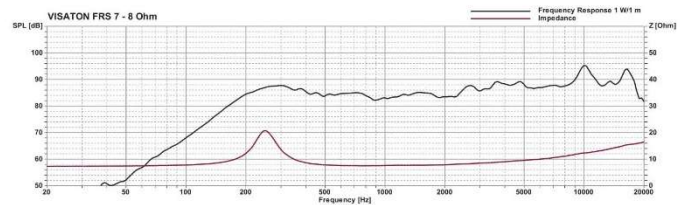
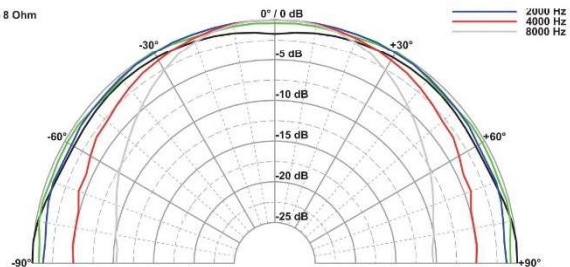
- Narrow network column speakers
- Control speaker for electronic devices
- Model construction
- Electronic musical instruments

Attributes

- Water proof cone
- Metal basket
- 100 °C temperature resistant



FRS 7 A - 8 Ohm





FR 58

Art. No. 2204 – 4 Ω

Art. No. 2205 – 8 Ω



Art. No. 2203 **)



5,8 cm (2,3") Breitbandlautsprecher mit Membran aus beschichtetem Papier, Gummisicke, quadratischem Metallkorb mit 4 Montagelöchern und Gummidichtung. Sehr linearer und weiter Frequenzgang bei niedriger Resonanzfrequenz ermöglicht universellen Einsatz, auch für Hi-Fi-Anwendungen.

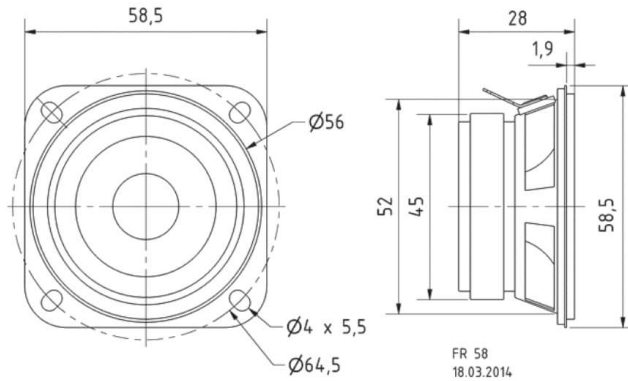
Zubehör: Schutzgitter (Art.-No. 2203)

Bestückung: PACTO, SOUNDBAR

5.8 cm (2.3") fullrange speaker with coated paper cone, rubber surround, squared metal basket with 4 mounting holes and rubber gasket. Very linear and wide frequency response and low resonant frequency provide a wide range of applications, including Hi-Fi.

Accessories: Protective grille (Art.-No. 2203)

Applied to: PACTO, SOUNDBAR



Technische Daten / Technical Data

Nennbelastbarkeit	10 W
Rated power	10 W
Musikbelastbarkeit	12 W
Maximum power	12 W
Impedanz	4 Ω / 8 Ω
Impedance	4 Ω / 8 Ω
Übertragungsbereich (-10 dB)	120 – 20000 Hz
Frequency response (-10 dB)	120 – 20000 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel	81 dB (1 W/1 m)
Mean sound pressure level	81 dB (1 W/1 m)
Grenzauslenkung x_{mech}	± 2,5 mm
Excursion limit x_{mech}	± 2,5 mm
Resonanzfrequenz	190 Hz
Resonant frequency	190 Hz
Obere Polplattenhöhe	2,4 mm
Height of front pole-plate	2,4 mm
Schwingspuldurchmesser	14 mm
Voice coil diameter	14 mm
Schallwandöffnung	57 mm
Cut-out diameter	57 mm
Anschluss	5,2 x 0,5 mm (+)/2,8 x 0,5 mm (-)
Terminal	5,2 x 0,5 mm (+)/2,8 x 0,5 mm (-)
Gewicht netto	0,13 kg
Net weight	0,13 kg

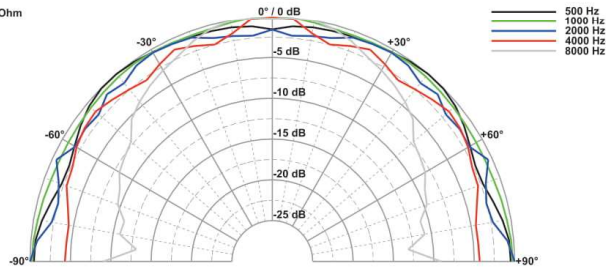
*) IP-Schutzklasse für Frontseite bei Einbau in ein abgedichtetes Gehäuse (ggf. ist eine Verklebung des Lautsprechers und eine Frontabdeckung (Gitter) notwendig)

*) IP protection class for front side when built into a sealed enclosure (gluing of the loudspeaker and a front cover (grille) might be necessary)

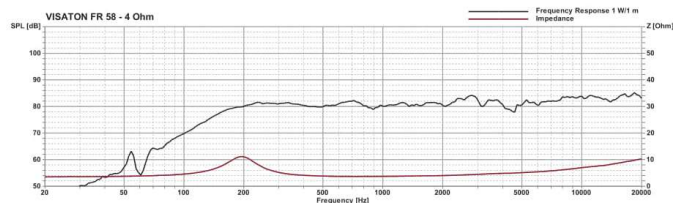
**) Details und Zeichnungen siehe Seite 372–376 / Details and drawings see page 372–376

Weitere Daten Seiten / for further data see pages 377–378

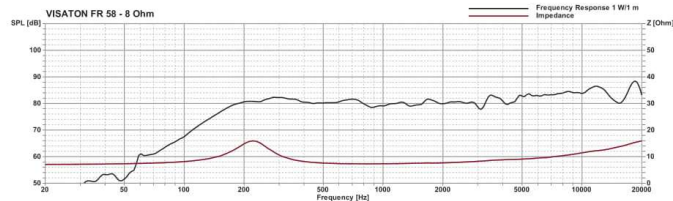
FR 58 - 8 Ohm



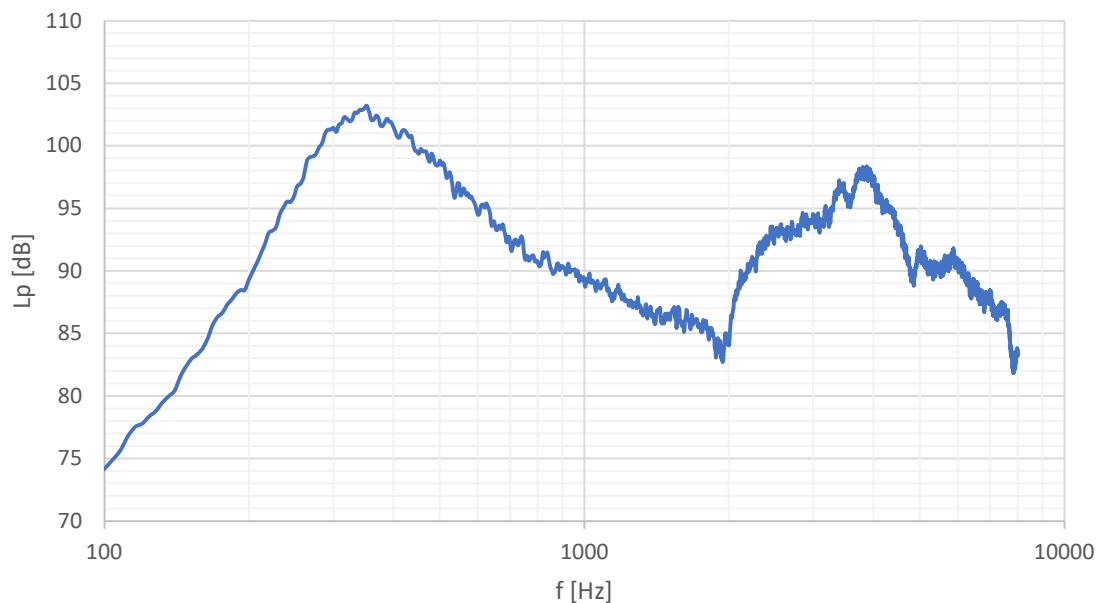
VISATON FR 58 - 4 Ohm



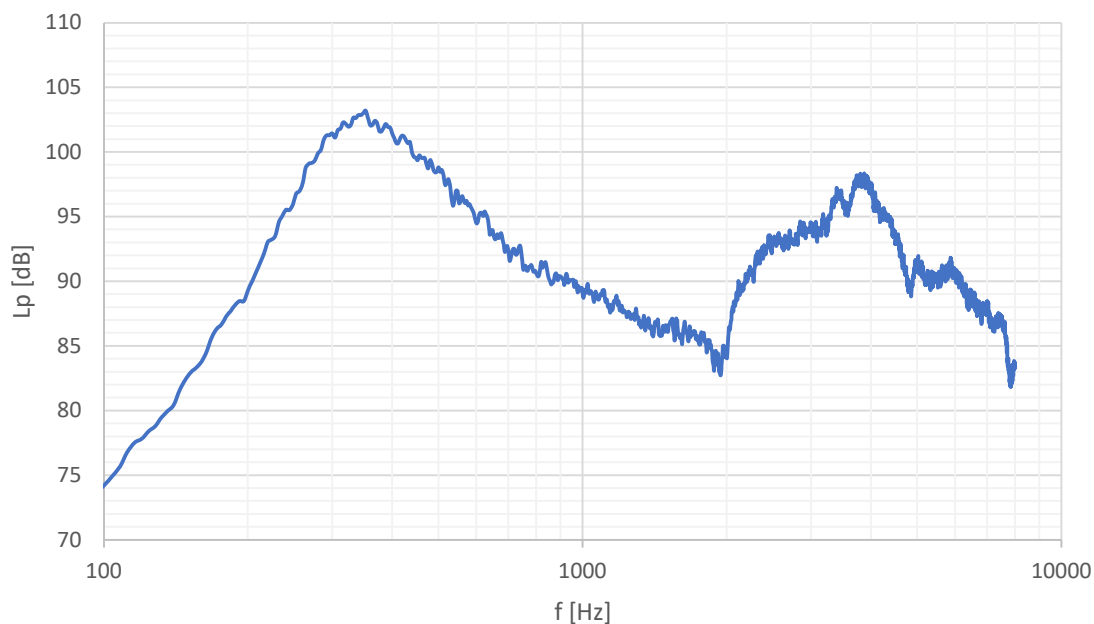
VISATON FR 58 - 8 Ohm



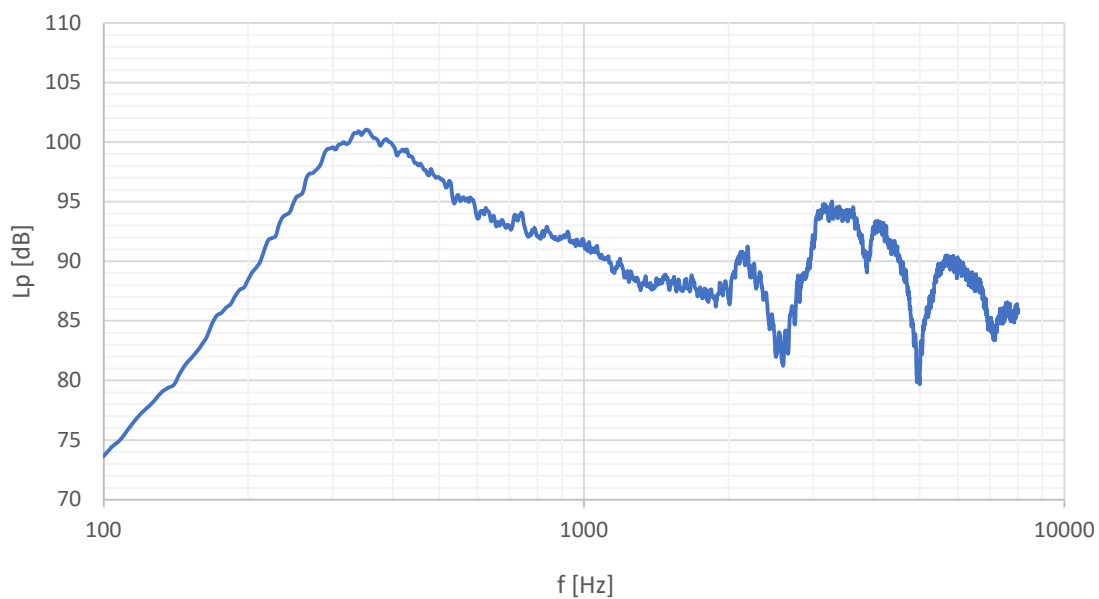
Příloha B – Amplitudové frekvenční charakteristiky



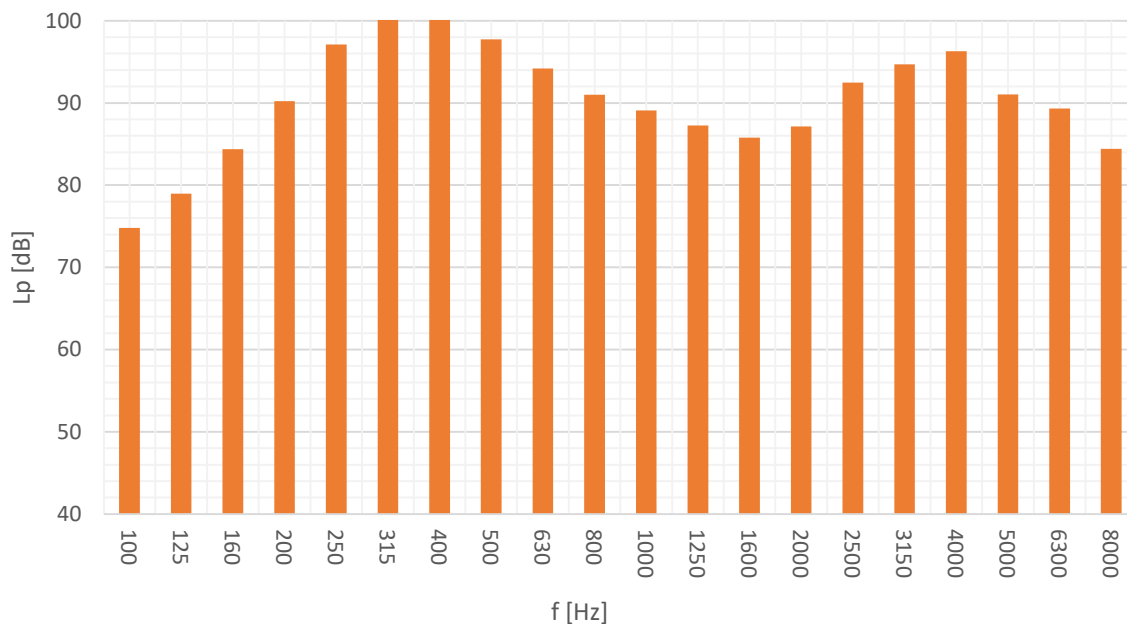
Amplitudová frekvenční charakteristika měřena bílým šumem v ose reproduktoru ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje



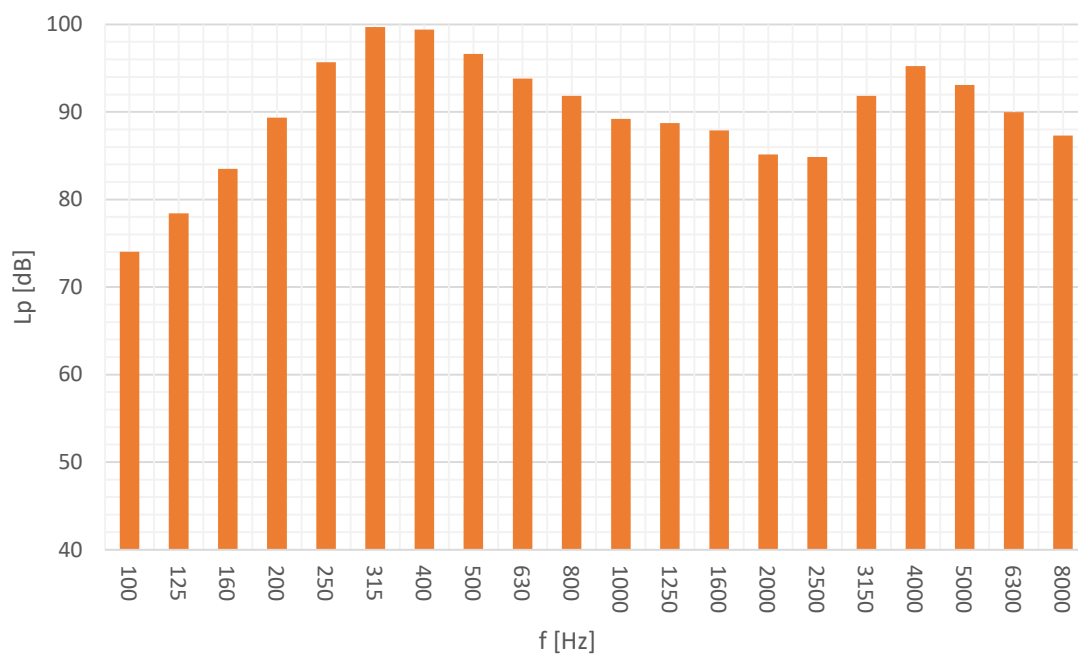
Amplitudová frekvenční charakteristika měřena bílým šumem mezi dvěma reproduktory po obvodu ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje



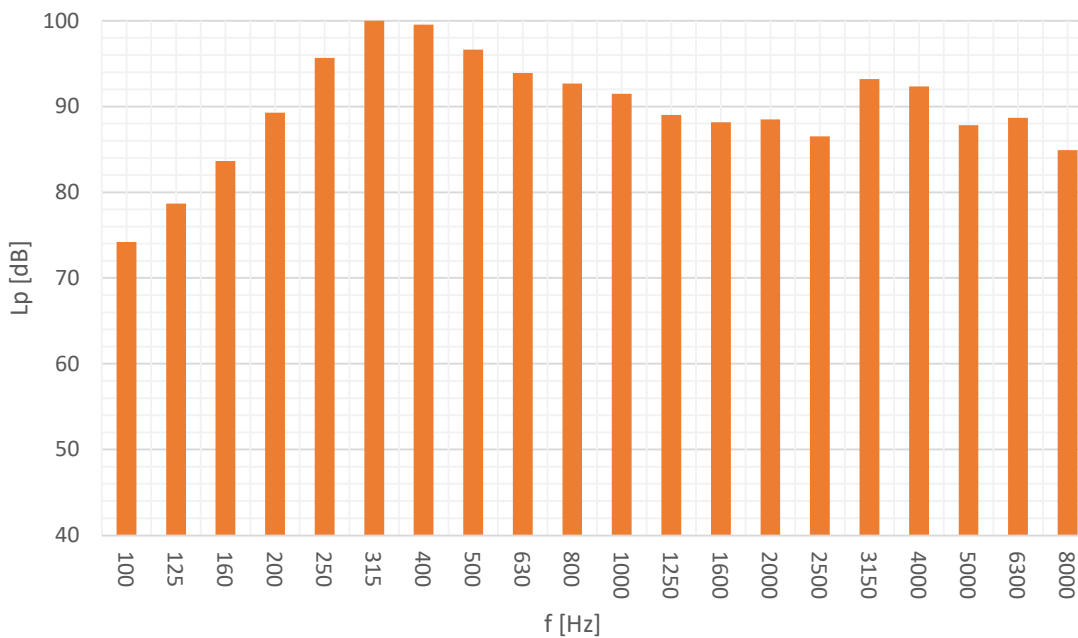
Amplitudová frekvenční charakteristika měřena bílým šumem v ose mezi třemi reproduktory ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje



Amplitudová frekvenční charakteristika měřena růžovým šumem v ose reproduktoru ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje

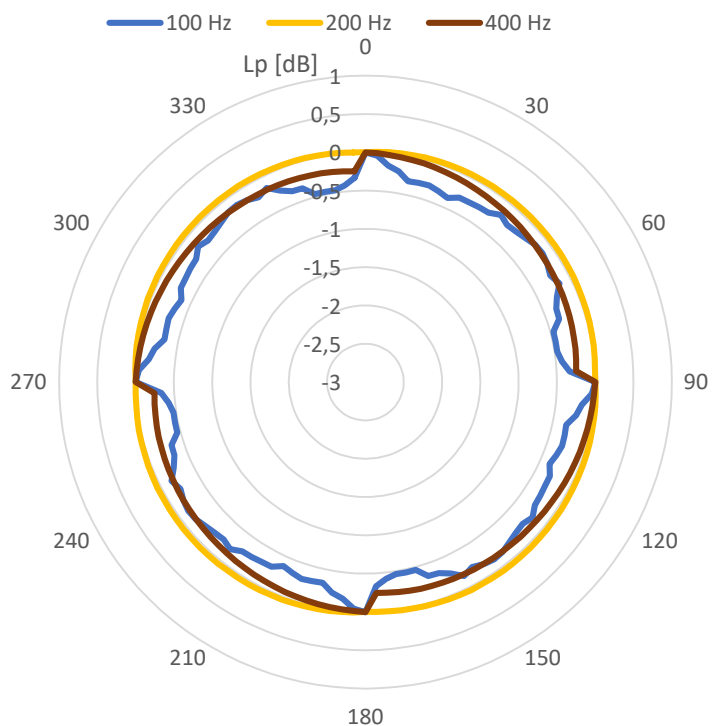


Amplitudová frekvenční charakteristika měřena růžovým šumem mezi dvěma reproduktory po obvodu ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje

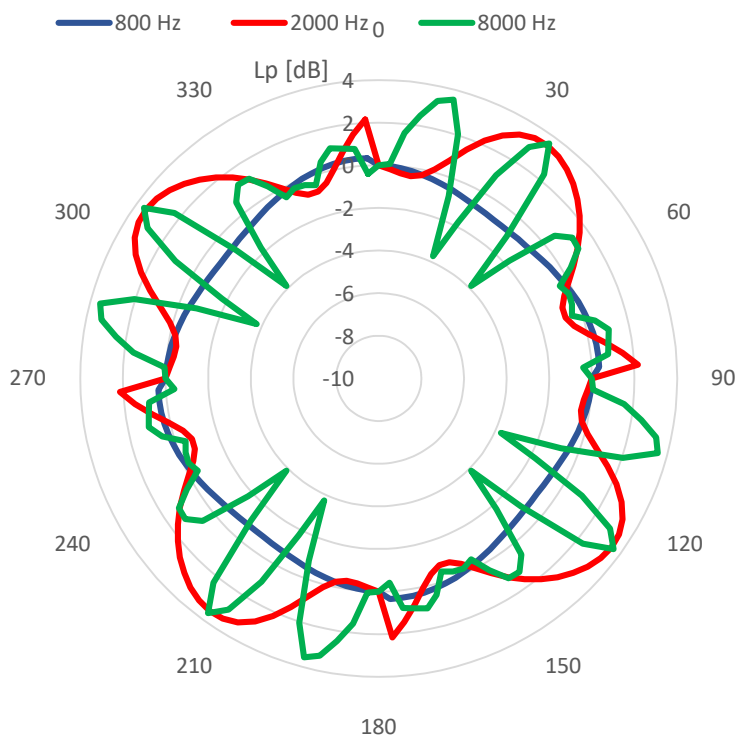


Amplitudová frekvenční charakteristika měřena růžovým šumem v ose mezi třemi reproduktory ve vzdálenosti 0,5 m od zdroje

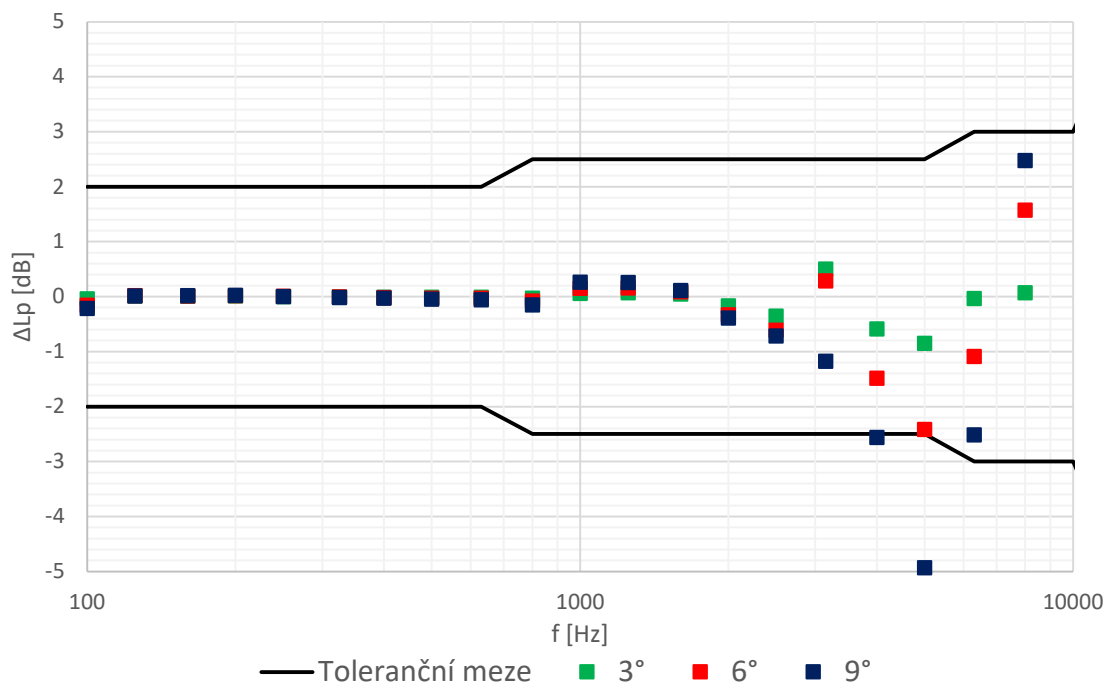
Příloha C – Směrové charakteristiky zdroje



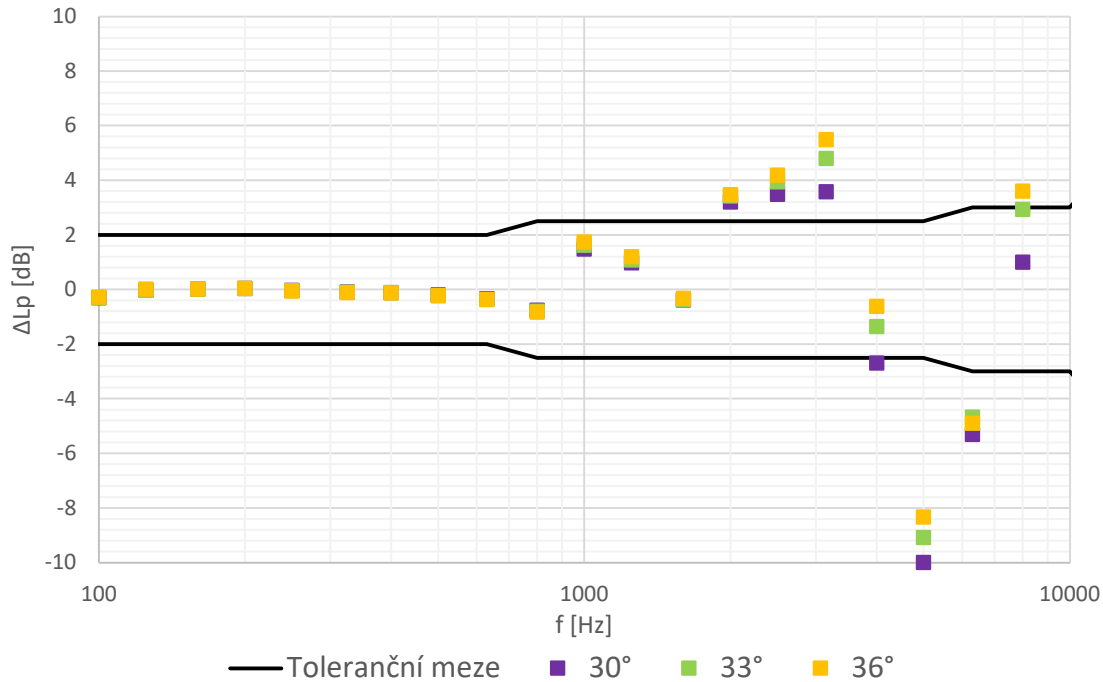
Relativní měrová charakteristika zdroje měřena ve vzdálenosti 1 m od zdroje



Relativní měrová charakteristika zdroje měřena ve vzdálenosti 1 m od zdroje



Směrnost zdroje v blízkosti osy reproduktoru ve spodní řadě měřena ve vzdálenosti 1 m od zdroje



Směrnost zdroje v blízkosti osy reproduktoru ve spodní řadě měřena ve vzdálenosti 1 m od zdroje