



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

### ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA PRO REPRODUKCI NÍZKÝCH KMITOČTŮ SE SMĚROVÝM VYZAŘOVÁNÍM

LOUDSPEAKER SYSTEM FOR REPRODUCTION OF LOW FREQUENCIES WITH DIRECTIONAL RADIATION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Šimon Skvaril

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

BRNO 2022

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Audio inženýrství**  
specializace Zvuková produkce a nahrávání  
Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Šimon Skvaril

**ID:** 195761

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

## NÁZEV TÉMATU:

### Reproduktorová soustava pro reprodukci nízkých kmitočtů se směrovým vyzařováním

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti konstrukce reproduktorové soustavy realizující směrový akustický zářič nízkých kmitočtů prvního řádu v rámci jediné ozvučnice. Zaměřte se na možnosti realizace zpoždění zejména akustickými obvody. Provedte simulaci rozložení akustického pole zvolenou numerickou metodou a simulaci kmitočtové charakteristiky pomocí modelu se soustředěnými parametry. Finální návrh ozvučnice realizujte a proveďte ověřovací měření.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Škvor, Z., Akustika a elektroakustika. Academia, Praha, 2001. ISBN 80-200-0461-0

[2] HILL, Geoff. Loudspeaker modelling and design: a practical introduction. New York: Routledge, 2019. ISBN 9780815361336.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 24.5.2022

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cílem práce je navržení ozvučnice, jejíž klíčovou vlastností je směrové vyzařování na nízkých kmitočtech. V průběhu práce jsou popsány základní vlastnosti zvukového vlnění a jeho chování na překážkách. Je popsána výpočetní metoda FDTD spolu se sadou nástrojů K-wave pro MATLAB, která tuto metodu využívá. Dále je vytvořen virtuální model v programu MATLAB, na kterém je ověřena funkčnost navrhovaného řešení. Dalším krokem je vytvoření zmenšeného modelu ozvučnice, na kterém je ověřena shoda teoretických poznatků s praktickými měřeními. Nakonec je vytvořen prototyp ozvučnice ve skutečné velikosti, u kterého jsou změřeny základní parametry, včetně směrové charakteristiky.

## **Klíčová slova**

Zvukové vlnění; FDTD; reproduktor; ozvučnice; směrová charakteristika

## **Abstract**

Final product of this work is design of speaker baffle which will have directional radiation at low frequencies. In the course of the work, propagation of sound waves and their behaviour at obstacles are described. The computational method FDTD and the K-wave toolkit for MATLAB, which uses this method, are described. In MATLAB a virtual model of speaker baffle is created and proposed solution is verified. Next step is creation of scaled model of speaker baffle on which agreement of theoretical computations with real-world measurement is verified. Final step is creation of prototype of speaker baffle,, whose parameters are measured, including polar response.

## **Keywords**

Sound; FDTD; Loudspeaker; Speaker Baffle; Polar Pattern

## **Bibliografická citace**

SKVARIL, Šimon. *Reproduktorová soustava pro reprodukci nízkých kmitočtů se směrovým vyzařováním*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141428>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jiří Schimmel.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Šimon Skvaril</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>195761</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2021/22</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Reproduktorová soustava pro reprodukci nízkých kmitočtů se směrovým vyzařováním</i>

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 18. prosince 2021

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, trpělivost a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji svým rodičům za neutuchající podporu a rady.

V Brně dne: 18. prosince 2021

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK.....	11
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ZVUKU .....</b>	<b>13</b>
2.1 ŠÍŘENÍ ZVUKU PROSTOREM .....	14
2.1.1 Sčítání dvou koherentních signálů .....	14
2.1.2 Odraz zvukové vlny od překážky .....	16
2.1.3 Difúzní odraz.....	17
2.1.4 Absorpce .....	17
2.1.5 Difrakce .....	18
2.2 VÝPOČETNÍ FDTD METODA ZA POMOCI SADY NÁSTROJŮ K-WAVE PRO MATLAB .....	20
<b>3. REPRODUKCE ZVUKU .....</b>	<b>22</b>
3.1 AKUSTICKÝ ZÁŘIČ.....	22
3.1.1 Akustický zářič 0. řádu.....	22
3.1.2 Akustický zářič 1. řádu a n-tého řádu .....	23
3.2 PÍSTOVĚ KMITAJÍCÍ KRUHOVÁ MEMBRÁNA.....	24
3.3 REPRODUKTORY.....	25
<b>4. ELEKTRODYNAMICKÝ PŘÍMOVYZAŘUJÍCÍ REPRODUKTOR.....</b>	<b>27</b>
4.1 T/S PARAMETRY .....	27
4.1.1 Stejnoseměrný odpor kmitací cívky.....	27
4.1.2 Mechanická poddajnost .....	28
4.1.3 Ekvivalentní objem vzduchu.....	28
4.1.4 Celková hmotnost kmitajících částí.....	28
4.1.5 Rezonanční kmitočet .....	28
4.1.6 Efektivní plocha membrány.....	28
4.1.7 Mechanický odpor.....	28
4.1.8 Bl faktor .....	28
4.1.9 Mechanický, elektrický a celkový činitel jakosti .....	28
4.1.10 Vyzařovací impedance membrány.....	29
4.1.11 Náhradní elektrické schéma .....	29
4.2 REPRODUKTOROVÁ OZVUČNICE.....	30
4.2.1 Uzavřená ozvučnice .....	30
4.2.2 Ozvučnice typu Bass-Reflex .....	31
4.2.3 Ozvučnice s pasivním zářičem .....	33
4.2.4 Ozvučnice typu Transmission Line.....	33
4.3 NÍZKOFREKVENČNÍ BASOVÉ REPRODUKTORY – SUBWOOFERY .....	34
4.4 SMĚROVÉ KONFIGURACE BASOVÝCH SOUPRAV .....	35
4.4.1 Gradientní konfigurace .....	35
4.4.2 End-Fire konfigurace.....	36
4.4.3 TM (Thomas Mundorf) konfigurace.....	37

<b>5. NÁVRH BASOVÉHO REPRODUKTORU SE SMĚROVOU VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKOU .....</b>	<b>39</b>
5.1.1 <i>Vytvoření zmenšeného modelu ozvučnice .....</i>	<i>43</i>
<b>6. VYTVOŘENÍ OZVUČNICE VE SKUTEČNÉ VELIKOSTI.....</b>	<b>47</b>
6.1 MĚŘENÍ V BLÍZKÉM POLI .....	48
6.2 MĚŘENÍ VE VZDÁLENÉM POLI.....	50
<b>7. POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ S VÝSLEDKY SIMULACÍ .....</b>	<b>54</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>57</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>58</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>60</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Rozdíl v dB při sčítání dvou koherentních signálů o stejné amplitudě v závislosti na vzájemném fázovém posunu.....	15
Obr. 2.2 Porovnání výsledné kmitočtové charakteristiky pro 3 různé hodnoty zpoždění. ....	15
Obr. 2.3 Odraz zvukového vlnění od překážky.....	16
Obr. 2.4 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě stojatého vlnění vytvořené odrazem od zdi pro kmitočty 400 Hz a 2000 Hz.....	16
Obr. 2.5 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě difuzního odrazu pro 400 Hz a 2000 Hz. ....	17
Obr. 2.6 Míra absorpce v závislosti na kmitočtu ve vzduchu [3][5]. ....	18
Obr. 2.7 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě difrakce o překážku pro 100 Hz a 2000 Hz. ....	19
Obr. 2.8 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě difrakce na štěrbině pro 100 Hz a 2000 Hz. ....	19
Obr. 2.9 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě difrakce o hranu pro 100 Hz a 2000 Hz. ....	19
Obr. 2.10 Rozdíly v použitých okolních bodech mezi jednotlivými FDTD metodami [3]. ....	20
Obr. 3.1 Porovnání směrové charakteristiky akustických zářičů různého řádu. ....	22
Obr. 3.2 Porovnání rozpadu směrové charakteristiky zářiče 1. řádu.....	23
Obr. 3.3 Směrová charakteristika pro membránu s poloměrem 8,75 cm pro pět různých kmitočtů. ....	24
Obr. 3.4 Prostorové rozložení hladiny akustického tlaku v blízkém poli membrány .....	25
Obr. 4.1 Schéma jednotlivých částí elektrodynamického reproduktoru. ....	27
Obr. 4.2 Obecný tvar modulové impedanční charakteristiky reproduktoru. ....	27
Obr. 4.3 Náhradní elektrické schéma elektrodynamického reproduktoru.....	30
Obr. 4.4 Schéma uzavřené ozvučnice. ....	30
Obr. 4.5 Vyobrazení vlivu celkového činitele jakosti $Q_{tc}$ na kmitočtovou odezvu v oblasti rezonančního kmitočtu.....	31
Obr. 4.6 Schéma bassreflexové ozvučnice.....	32
Obr. 4.7 Porovnání kmitočtové odezvy bassreflexové a uzavřené ozvučnice. ....	32
Obr. 4.8 Porovnání impedančních charakteristik mezi bassreflexovou a uzavřenou ozvučnicí. ....	33
Obr. 4.9 Schéma ozvučnice s pasivním zářičem.....	33
Obr. 4.10 Schéma Transmission-Line ozvučnice .....	34
Obr. 4.11 Příklad dvoupásmového reproduktoru – Focal Chora 806 [9].....	34
Obr. 4.12 Příklad reproduktoru s 32" měničem – Funktion One F132. [10].....	35
Obr. 4.13 Vývoj směrové charakteristiky gradientní basové konfigurace. ....	36
Obr. 4.14 Porovnání kmitočtové odezvy pro samotný reproduktor s přední částí konfigurace a se zadní částí konfigurace .....	36
Obr. 4.15 Vývoj směrové charakteristiky pro End-Fire basovou konfiguraci. ....	37
Obr. 4.16 Porovnání kmitočtové odezvy pro samotný reproduktor, v přední části konfigurace a v zadní části konfigurace .....	37
Obr. 4.17 Směrová charakteristika TM konfigurace při pohledu z boku.....	38
Obr. 5.1 Porovnání kmitočtových charakteristik pro různé vzdálenosti a zpoždění pro gradientní uspořádání basových reproduktorů.....	40
Obr. 5.2 Ukázka průběhu simulace s vykreslením výsledného rozložení hladiny akustického tlaku pro 80 Hz. ....	41
Obr. 5.3 Porovnání budícího signálu a signálu nahraným před ústím ozvučnice. ....	41
Obr. 5.4 Porovnání gradientní konfigurace zdrojů ve 3D, ve 2D a ve 2D bez ozvučnice pro 40 Hz [dB].	42

Obr. 5.5 Porovnání změn ve směrových charakteristikách po vložení absorbéru pro různé kmitočty při 2D výpočtu [dB].....	43
Obr. 5.6 Porovnání změn ve směrových charakteristikách po vložení absorbéru pro různé kmitočty při 3D výpočtu [dB].....	43
Obr. 5.7 Náhled vytvořeného zmenšeného modelu. ....	44
Obr. 5.8 Porovnání spektrogramů pořízených u ústí netlumené a tlumené ozvučnice. ....	44
Obr. 5.9 Porovnání kmitočtové charakteristiky u ústí zmenšeného modelu ozvučnice před a po zatlumení. ....	45
Obr. 5.10 Porovnání kmitočtové charakteristiky v blízkém poli před reproduktorem před a po zatlumení. ....	45
Obr. 5.11 Porovnání zvukového vlnění nahaného v blízkém poli před reproduktorem a v blízkém poli u ústí ozvučnice.....	46
Obr. 5.12 Porovnání signálů s kompenzací časového zpoždění způsobeného délkou ozvučnice. ....	46
Obr. 6.1 Basový měnič Dayton Audio UM15-22. ....	47
Obr. 6.2 Prototyp basového reproduktorového boxu se směrovou vyzařovací charakteristikou. ....	48
Obr. 6.3 Měření kmitočtové charakteristiky v blízkém poli membrány a ústí netlumené a mírně tlumené ozvučnice.....	49
Obr. 6.4 Měření kmitočtové charakteristiky v blízkém poli membrány a ústí tlumeného minerální vatou a PU pěnou.....	49
Obr. 6.5 měření kmitočtové charakteristiky pro netlumenou ozvučnici ve vzdáleném poli. ....	50
Obr. 6.6 Směrová charakteristika pro 7 různých kmitočtů netlumené ozvučnice. ....	51
Obr. 6.7 měření kmitočtové charakteristiky pro ozvučnici tlumenou minerální vlnou.....	51
Obr. 6.8 Směrová charakteristika pro 7 různých kmitočtů ozvučnice tlumené minerální vatou.....	52
Obr. 6.9 Směrová charakteristika pro 7 různých kmitočtů ozvučnice tlumené kombinací polyuretanové pěny a molitanu. ....	52
Obr. 6.10 Měření kmitočtové charakteristiky pro ozvučnici tlumenou kombinací polyuretanové pěny a pojeného molitanu. ....	53
Obr. 7.1 Porovnání vypočítaných a naměřených směrových charakteristik pro ozvučnici bez vložení tlumícího materiálu. ....	54
Obr. 7.2 Porovnání vypočítaných a naměřených směrových charakteristik pro ozvučnici s vloženým tlumícím materiálem. ....	55

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Srovnání rychlosti zvuku v různých materiálech ..... 13

# 1. ÚVOD

Při vyzařování nízkých kmitočtů pod 100 Hz má naprostá většina reproduktorových soustav kulovou vyzařovací charakteristiku díky velkým hodnotám vlnových délek. To způsobuje při jejich reprodukci řadu problémů, jako například rušení vystupujících umělců na pódiu nebo nechtěné vyzařování zvuku mimo publikum, což může být v případě vystoupení pod širým nebem v obydlené oblasti silně nežádoucí. Tyto problémy se odstraňují vytvářením speciálních konfigurací nízkofrekvenčních reproduktorů, které za pomoci změny intenzity a časových zpoždění mezi jednotlivými reproduktory dosahují směrové charakteristiky.

Předmětem této práce je navrhnutí takové ozvučnice, která efektivně využije energii vyzářenou zadní stěnou membrány reproduktorového měniče tak, že výsledná reproduktorová soustava dosáhne směrové charakteristiky v rámci jediné jednotky.

V práci jsou popsány základní vlastnosti šíření zvukového vlnění včetně sčítání vícero zvukových signálů. Dále je věnována pozornost základním parametrům reproduktorových měničů a ozvučnic, které se těmito měniči osazují. Je vytvořen matematický virtuální model a zmenšený model takovéto reposoustavy a je zkoumáno, zdali je uvedený princip funkční.

V závěru práce je vytvořen prototyp ozvučnice ve skutečné velikosti, u které je změřena směrová a kmitočtová charakteristika. Výsledky tohoto měření jsou následně porovnány s matematickými modely.

## 2. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ZVUKU

To, co lidské sluchové orgány vnímají jako zvuk, je mechanické kmitání částic vzduchu kolem jejich rovnovážné polohy. V případně plynného média, jako je vzduch, se zvukové vlnění šíří pouze ve formě podélného vlnění, tedy že částice kmitají ve směru šíření zvukové vlny.[3] V případě pevných látek (např. ozvučnice hudebních nástrojů) se může zvuk šířit i formou vlnění příčného. Zvukové vlnění se šíří prostorem rychlostí, která se liší jednak v závislosti na materiálu, tak zároveň na podmínkách. Tyto rozdíly znázorňuje tab. 2.1

Tabulka 2.1 Srovnání rychlosti zvuku v různých materiálech [1].

Materiál	Rychlost zvuku [m/s]
Suchý vzduch 0 °C	331
Suchý vzduch 25 °C	346
Voda	1500
Dřevo	3000-4000
Kov	5000-6000

Z této tabulky lze vidět, že rychlost zvuku ve vzduchu poměrně záleží na jeho teplotě. Pro teploty, které se v běžném prostředí vyskytují, lze použít vztah (2.1) [3]:

$$c = (331,3 + 0,606 \cdot t) , \quad (2.1)$$

kde  $c_0$  je výsledná rychlost zvuku v  $\text{ms}^{-1}$ ,  $t$  teplota ve  $^{\circ}\text{C}$ . Tento vztah lze použít přibližně v rozpětí od  $-100^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$ . V pozdější fázi této práce bude při výpočtech používána rychlost zvuku  $344 \text{ ms}^{-1}$ .

Dalšími základními parametry zvukového vlnění jsou frekvence, vlnová délka a perioda. Vztah mezi těmito třemi veličinami je dán vztahem (2.2) [3]

$$\lambda = c_0 T = c_0 \frac{1}{f} = \frac{c_0}{f} , \quad (2.2)$$

kde  $\lambda$  vyznačuje vlnovou délku v m,  $T$  délku trvání jedné periody v s,  $c_0$  rychlost zvuku a  $f$  frekvenci v Hz. Jako slyšitelné spektrum se zpravidla označuje rozpětí kmitočtů od 20 Hz do 20 000 Hz. Po dosazení těchto hodnot do výše uvedeného vzorce (2.2) lze zjistit, že vlnová délka slyšitelného spektra nabývá hodnot od 17 m do 1,7 cm. Tento fakt má ten důsledek, že podle výšky reprodukováného tónu se mění způsob, jakým se vlnění šíří prostorem. Této problematice se věnuje kapitola 3.

## 2.1 Šíření zvuku prostorem

Zvukové vlnění, které se šíří volným prostorem skrze plynné médium, je definováno jako rychlé změny tlaku, vůči kterým je atmosférický tlak neměnný, a tedy zanedbatelný. Základní jednotkou akustického tlaku je Pa a pokud je tato hodnota dosazena do vzorce (2.3) [4]

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (2.3)$$

vyjde hladina akustického tlaku (angl. Sound Pressure Level) vyjádřená v dB(SPL). Veličina  $p$  zde značí akustický tlak v daném bodě a  $p_0$  je vztažná hodnota akustického tlaku pro 0 dB, která odpovídá hodnotě  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Tato hodnota byla stanovena experimentálně a je blízká prahu slyšení tónu o kmitočtu 1000 Hz. Naproti tomu horní hranice, označována jako práh bolesti, je přibližně 120 dB, tedy 20 Pa.

Pokud je prostor homogenní, má zvukové vlnění ve všech souřadnicových osách stejnou konstantní rychlost. Pokud bude uvažován bodový zdroj zvukového vlnění, má vlnoplocha tvar koule. Plocha vlnoplochy tohoto kulového vlnění roste s druhou mocninou se vzdáleností od zdroje a pro akustický tlak platí vztah (2.4) [4]

$$p_2 = p_1 \left( \frac{r_1}{r_2} \right), \quad (2.4)$$

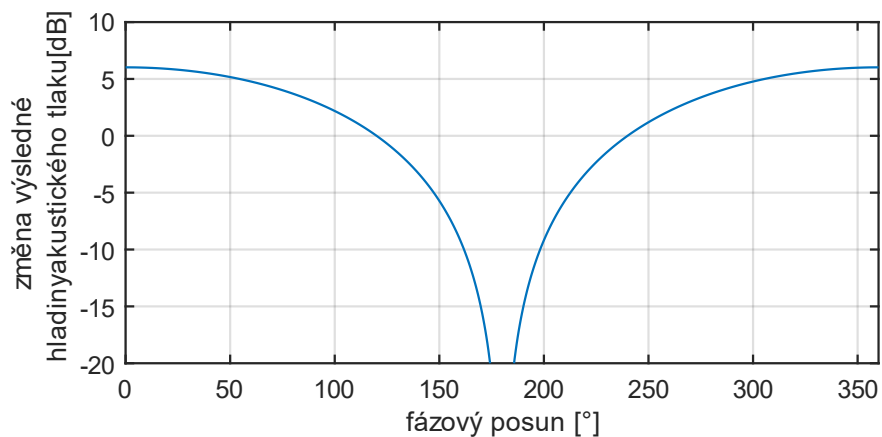
kde  $p_1$ ,  $p_2$  představují akustický tlak ve dvou různých bodech v Pa a  $r_1$ ,  $r_2$  vzdálenost těchto bodů od zdroje. Z tohoto vztahu lze vyčíst, že s dvojnásobnou vzdáleností klesne akustický tlak na polovinu a po dosazení do vzorce (2.3) vypočteme rozdíl v hladině akustického tlaku 6 dB.

### 2.1.1 Sčítání dvou koherentních signálů

V případě, kdy se sčítá více zvukových vlnění (např. v důsledku odrazu), která mají stejný kmitočet, jedná se o vzájemně koherentní signály. V takovém případě platí (2.5) [4]

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1p_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (2.5)$$

kde  $p$  značí výslednou amplitudu akustického tlaku,  $p_1$  a  $p_2$  amplitudu sčítaných signálů a  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  jejich počáteční fázi. Pokud výsledek tohoto vzorce zkombinujeme se vztahem (2.3), dostaneme výsledek součtů těchto dvou signálů v závislosti na jejich vzájemném fázovém posunu, kdy při fázovém posunu mezi  $120^\circ$  a  $240^\circ$  dochází k odečtu signálů, viz. obr. 2.1.



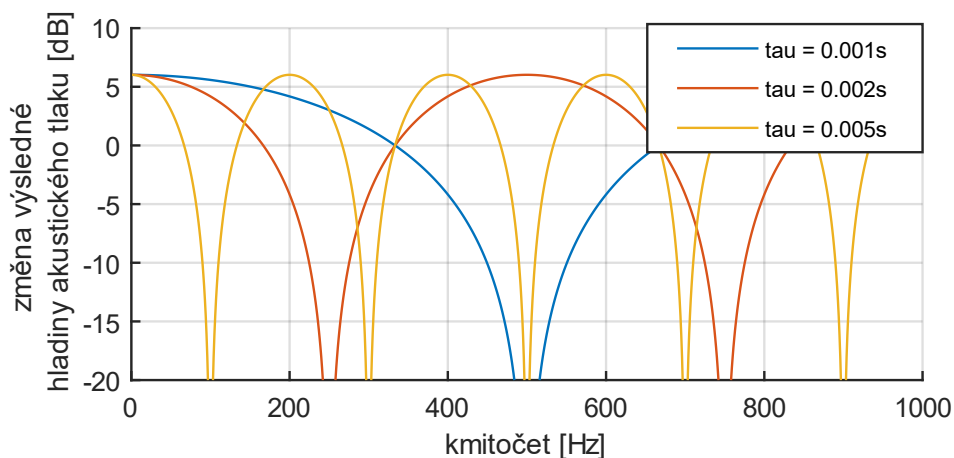
Obr. 2.1 Rozdíl v dB při sčítání dvou koherentních signálů o stejné amplitudě v závislosti na vzájemném fázovém posunu.

Fázový posun závisí v případě odražené zvukové vlny na jejím kmitočtu a jejím zpoždění oproti vlně přímé a dá se vyjádřit vztahem (2.6)

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \cdot 360, \quad (2.6)$$

kde  $\varphi$  je výsledný fázový posun ve  $^\circ$ ,  $T$  je délka trvání jedné periody daného vlnění v s a  $\tau$  je zpoždění sekundární vlny oproti vlně přímé v s.

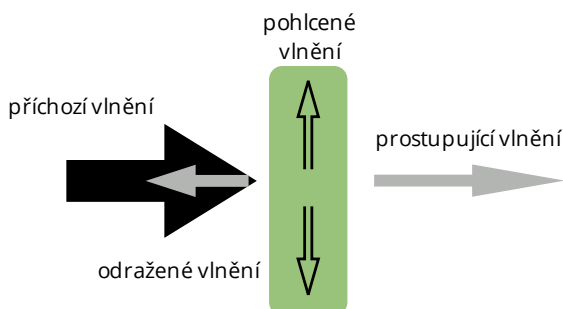
Protože fázový posun závisí na kmitočtu vlnění, znamená to, že v případě sčítání dvou širokospektrálních zvukových vlnění s konstantním zpožděním se začne na jejich součtu projevovat efekt hřebenového filtru. Jde o zvlnění kmitočtové charakteristiky, kdy se pravidelně střídají maxima a minima, přičemž maxima se nachází v celočíselných násobcích kmitočtu, jehož doba trvání jedné periody odpovídá hodnotě zpoždění. Tento efekt vyobrazuje obr. 2.2.



Obr. 2.2 Porovnání výsledné kmitočtové charakteristiky pro 3 různé hodnoty zpoždění.

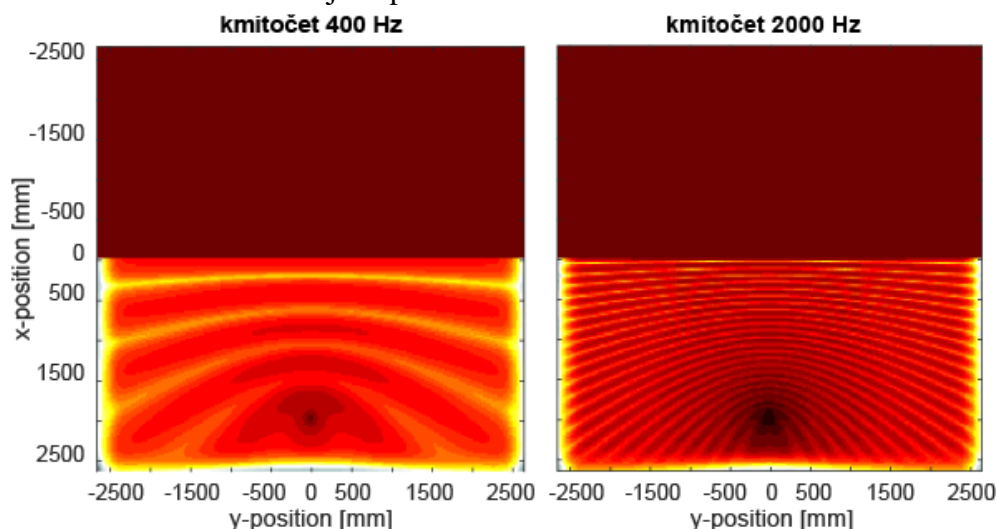
### 2.1.2 Odraz zvukové vlny od překážky

V případě, že zvuková vlna dorazí k nějaké překážce, dochází z části k jejímu odrazu a z části k jejímu pohlcení. Zároveň pohlcená část zvukové energie prostupuje dále překážkou, kde ji na druhé straně opustí. Poměr mezi jednotlivými složkami odrazu se mění v závislosti na materiálu a velikosti překážky a na kmitočtu dopadajícího vlnění. Tento jev znázorňuje obr. 2.3.



Obr. 2.3 Odraz zvukového vlnění od překážky.

Vlna odražená má stejnou fázi jako vlna dopadající, pouze s opačným směrem šíření. V případě hladké plochy dochází tedy k zrcadlovému odrazu a vzniku stojatého vlnění, které má v místě překážky kmitnu a ve vzdálenosti  $\frac{1}{4}$  vlnové délky uzly. Tento jev vyobrazuje obr. 2.4, který byl vypočítán za pomoci FDTD metody v programu MATLAB. Této metodě se věnuje kapitola 2.2.



Obr. 2.4 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě stojatého vlnění vytvořené odrazem od zdi pro kmitočty 400 Hz a 2000 Hz.

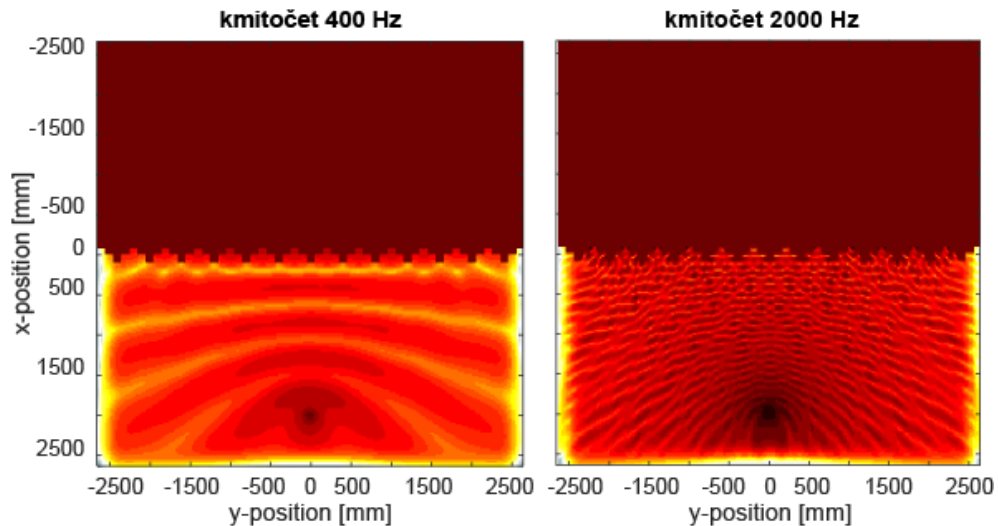
Na tomto obrázku je bodový zdroj umístěn 2 m od překážky. Světlá místa znamenají nízkou hladinu akustického tlaku a tmavá naopak vysokou. Každý odstín znamená změnu hladiny akustického tlaku o 3 dB, takže mezi kmitnami a uzly těchto stojatých vlnění je



rozdíl více než 20 dB. Je zřejmé, že v případě odrazu se prostorové rozložení akustického tlaku mění v závislosti na kmitočtu a vzniká tak prostorový hřebenový filtr.

### 2.1.3 Difúzní odraz

V případě, že jsou na překážce nerovnosti, jejichž velikost odpovídá rozměrově vlnové délce dopadajícího vlnění, dojde k difúznímu odrazu, který stojaté vlnění z části naruší viz obr. 2.5.



Obr. 2.5 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě difúzního odrazu pro 400 Hz a 2000 Hz.

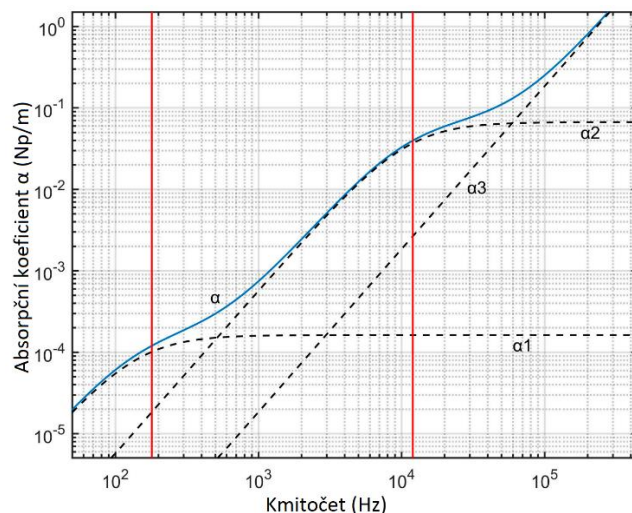
Zde je hloubka nerovností na povrchu přibližně 17 cm a vlnová délka pro kmitočty 400 Hz a 2000 Hz odpovídá 86 cm a 17,2 cm. Je patrné, jak nižší frekvence zůstává prakticky neovlivněna, zatímco u vyšší dochází k narušení stojatého vlnění.

### 2.1.4 Absorpce

Zvuk při průchodu prostředím část své energie ztrácí vlivem tření, molekulární absorpce a disperze. Takto ztracená energie je přeměněna na teplo a vyzářena do okolí. Míra absorpce se v závislosti na kmitočtu mění. Zpravidla platí, že vyšší kmitočty jsou pohlceny více. Závislost míry absorpce zvuku na kmitočtu vyobrazuje obr. 2.6 [3] [5].

Zde je absorpční koeficient  $\alpha$  vyjádřen v jednotkách  $Np/m$ , kdy  $1 Np = 8,686 \text{ dB}$ . V tomto grafu jsou výrazné především tři různé oblasti, které se v daném frekvenčním pásmu podílejí na útlumu:  $\alpha_1$  – molekulární relaxace způsobená molekulami dusíku;  $\alpha_2$  – molekulární relaxace způsobená molekulami kyslíku;  $\alpha_3$  – absorpce způsobená viskózními a tepelnými vodivými účinky.

Tato křivka se zároveň mění podle relativní vlhkosti vzduchu, kdy přibližně při 18% relativní vlhkosti dochází k výraznému útlumu nad 4000 Hz (3 dB), který se zvyšuje o 2 dB každé 2000 Hz. [3]



Obr. 2.6 Míra absorpce v závislosti na kmitočtu ve vzduchu [3][5].

### 2.1.5 Difrakce

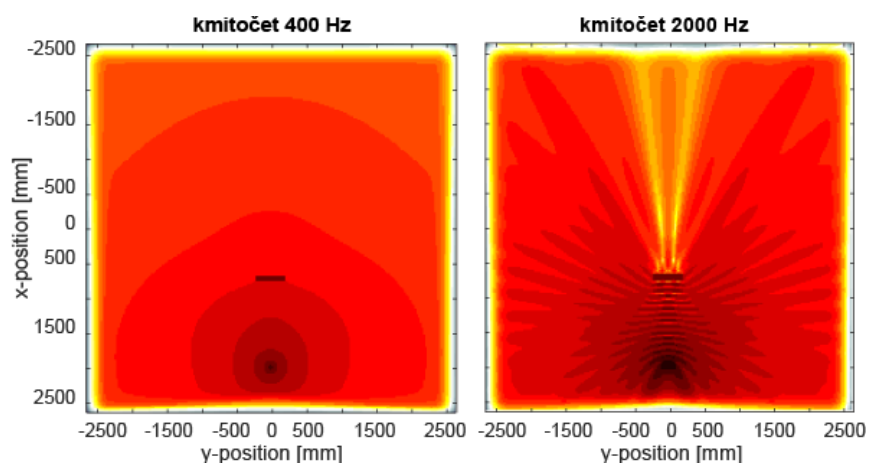
Difrakce je jev, ke kterému dochází při setkání zvukového vlnění s okrajem překážky. Jde o lokální změnu směru šíření, a i zde záleží, zdali jsou rozměry překážky větší než vlnová délka vlnění, nebo zdali jsou menší.

Mohou se vyskytnout tři základní situace, za kterých difrakce nastává. Difrakce o překážku, difrakce na šterbině a difrakce na hraně. Tyto jevy jsou znázorněny na o. 2.7, o. 2.8 a o. 2.9.

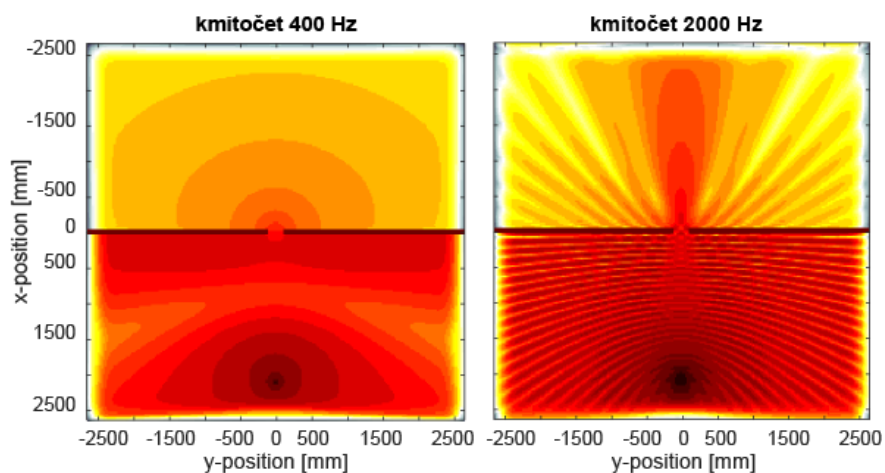
V prvním případě má překážka rozměr 42,5 cm a vlnová délka pro 100 Hz a 2000 Hz je 344 cm a 17,2 cm. Je vidět, že vlnění o nižším kmitočtu překážku „obteče“ a výsledná hladina akustického tlaku v daném prostoru se prakticky nezmění. Zatím co v případě vysokého kmitočtu se za překážkou vytváří akustický stín (obr. 2.7).

V dalším případě má šterbina rozměr 27,5 cm. Protože je výrazně menší než vlnová délka nižšího kmitočtu, začne se opačný konec překážky chovat jako nový kulový zdroj zvuku. Naopak, protože je srovnatelná s vlnovou délkou vyššího kmitočtu, je tento kmitočet zformován do úzkého paprsku, který je lemován postranními laloky z důvodu difrakce a odrazů na hranách šterbiny (obr. 2.8).

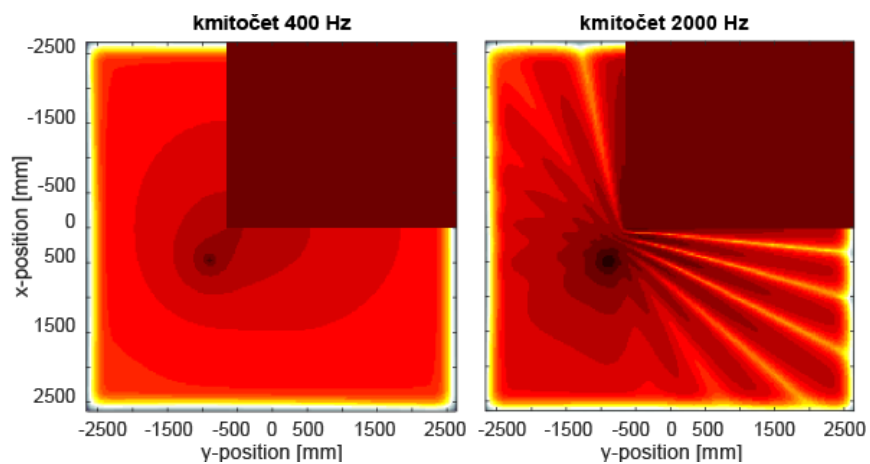
Posledním příkladem je difrakce na hraně, kde opět nižší kmitočet překážku obtéká, ale vyšší kmitočet vlivem odrazů od překážky vytváří stojaté vlnění, a vzniká tak nepravidelné rozložení hladiny akustického tlaku (obr. 2.9).



Obr. 2.7 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě difrakce o překážku pro 100 Hz a 2000 Hz.



Obr. 2.8 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě difrakce na štěrbině pro 100 Hz a 2000 Hz.



Obr. 2.9 Porovnání rozložení hladiny akustického tlaku v případě difrakce o hranu pro 100 Hz a 2000 Hz.

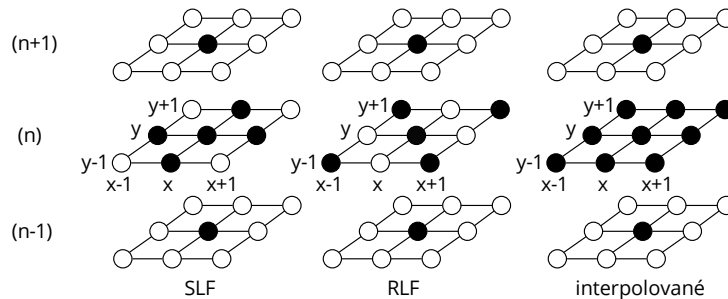
## 2.2 Výpočetní FDTD metoda za pomoci sady nástrojů K-wave pro MATLAB

Z důvodu netradičního typu ozvučnice, který se nikde nevyskytuje, byla zvolena metoda konečných časových rozdílů (Finite Difference Time Domain) k ověření funkčnosti výše uvedeného principu.

Metoda spočívá v rozdělení prostoru na čtvercovou (nebo krychlovou, pokud se jedná o výpočty ve 3D) mřížku o stejně velkých úsecích, jejichž velikost je několikanásobně menší než vlnová délka nejvyššího simulovaného kmitočtu [3], kdy je potřeba alespoň 10 bodů na vlnovou délku [12]. Výpočet probíhá po diskrétních časových krocích, kdy je v každém bodě prostorové mřížky následující hodnota vypočtena na základě aktuální hodnoty v okolních bodech a z hodnoty daného bodu v kroku předchozím. [3]

Podle toho, které okolní body jsou zvoleny pro provedení výpočtu, se tato metoda dále dělí na další podmetody, viz obr. 2.10.

- SLF – Standart Leapfrog používá okolní body v přímém kontaktu
- RLF – Rotated Leapfrog používá body které sousedí na diagonálách
- IDWM, IISO, IWB – jedná se o tzv interpolované metody, kdy se používají všechny sousední body.



Obr. 2.10 Rozdíly v použitých okolních bodech mezi jednotlivými FDTD metodami [3].

Popis cestování zvukové vlny v kartézských souřadnicích je dán vlnovou rovnicí, což je diferenciální rovnice druhého řádu (2.7)[3][12] [13]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c_0^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right), \quad (2.7)$$

která vzniká kombinací tří diferenciálních rovnic prvního řádu (2.8)(2.9) a (2.10)[12]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \cdot \mathbf{u}, \quad (2.9)$$

$$p = c_0^2 \rho, \quad (2.10)$$

kde  $p$  představuje akustický tlak,  $\rho_0$  je ambientní hustota prostředí,  $c_0$  je rychlost zvuku,  $\rho$  akustická hustota,  $\mathbf{u}$  akustická rychlost částic a  $x, y, z$  jsou prostorové souřadnice.

Nástroj K-wave řeší tuto soustavu rovnic, protože to následně umožňuje přidání více druhů zdrojů zvukového vlnění a zároveň umožňuje použití takzvané PML (Perfectly Matched Layer) vrstvy za hranicí výpočetního pole. Tato vrstva má nastavený vysoký činitel pohltivosti, který není založený na fyzikálních rovnicích a jejím účelem je pohlcení všech příchozích vlnění, čímž funguje jako prostorový anti-aliasingový filtr. V opačném případě by se kvůli použití rychlé Fourierovy transformace, se kterou tato sada nástrojů pracuje, všechny vlny, které by měly opustit výpočetní pole na jedné straně, znovuobjevily na straně druhé [12]. Nástroj K-wave není volně dostupný, nicméně je k dostání zdarma na stránkách vydavatele po registraci na jeho oficiálních stránkách. Přesný postup získání nástroje popisuje příloha A.

Hlavní metody, které K-wave provádí, jsou funkce `kspaceFirstOrder1D`, `kspaceFirstOrder2D` a `kspaceFirstOrder3D`. Každá z nich slouží k výpočtům v prostoru o tolika dimenzích, kolik obsahuje jejich název. Do každé z nich se zadávají 4 vstupní parametry v podobě čtyř struktur [12]:

- **kgrid** – obsahuje informace o počtu výpočetních bodů a o jejich rozměrech, zároveň je v něm zadána informace o velikosti časových kroků a kolik jich bude v celém výpočtu provedeno.
- **medium** – obsahuje informace o rychlosti zvuku, hustotě a absorpčních koeficientech v daném médiu. Je možné vytvořit mřížku o shodné velikosti s výpočetní mřížkou `kgrid`, kde se dají ke každému bodu přiřadit jiné vlastnosti. To umožňuje vytvoření heterogenního prostředí.
- **source** – nese informace o tom, které body jsou součástí zdroje, jakého jsou typu (jestli tlakové nebo rychlostní) a jaký signál generují v průběhu výpočtu.
- **sensor** – nese informace o tom, které body zaznamenávají hodnoty a jaké proměnné jsou zaznamenány. Lze zaznamenávat například časový průběh akustické rychlosti, akustického tlaku, rychlost i tlak v RMS.

V programu MATLAB s použitím k-wave sady nástrojů byl vytvořen model reproduktoru ve 3D s rozlišením prostorové mřížky 2,5 cm. Kód, který byl pro tyto výpočty použit je přiložen na příloze B. Výpočty je možné provádět i ve 2D, ale tyto výpočty mají tu vlastnost, že kulové vlnění zde nahrazuje vlnění válcové (ve třetí ose jsou všechny prvky protaženy do nekonečna), což má za následek, že s dvojnásobkem vzdálenosti poklesne hladina akustického tlaku pouze o 3 dB a ne o 6 dB, jako je tomu v případě kulového vlnění. To vede k tomu, že výsledky ve 2D jsou pouze orientační a od skutečných směrových charakteristik se liší.

## 3. REPRODUKCE ZVUKU

### 3.1 Akustický zářič

V této kapitole jsou čerpány informace z [4].

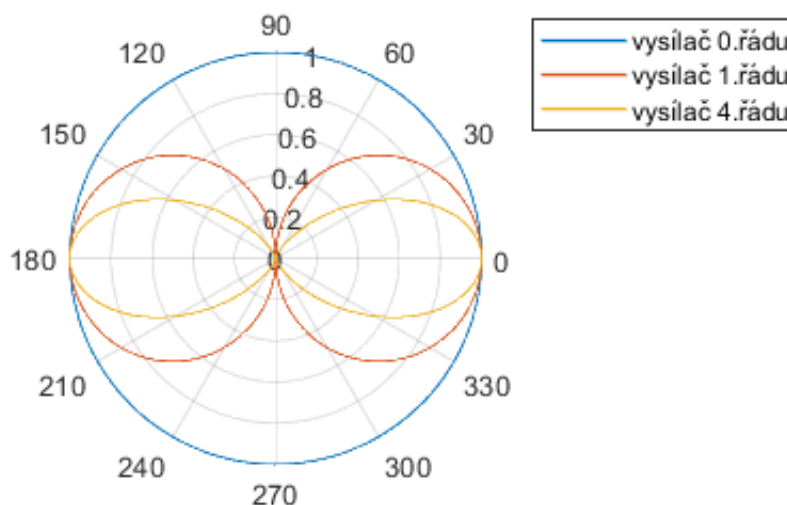
Jakýkoliv objekt, který způsobí vytvoření akustického pole, lze nazývat akustickým zářičem. Základní vlastností každého zářiče je jeho směrová charakteristika. Ta vyjadřuje poměr mezi akustickým tlakem v referenční ose daného zářiče k akustickému tlaku v daném směru od osy, a to ve stejné vzdálenosti od zdroje. Její tvar je kmitočtově závislý a zobrazuje se ve 2D podobě ve formě polárního grafu.

Dalším důležitým parametrem je kmitočtová charakteristika, která vyznačuje závislost akustického tlaku na kmitočtu v ose daného zářiče.

Každý zářič lze charakterizovat řádem, který vypovídá o jeho směrové charakteristice. Zároveň platí, že zářiče vyšších řádů lze vytvořit kombinací zářičů řádů nižších. V případě, že je zářič výrazně menší než vlnová délka vyzařovaného vlnění, platí vztah (3.1) [4]

$$\eta = |\cos^n \varphi|, \quad (3.1)$$

kde  $\eta$  vyjadřuje poměr akustického tlaku pod úhlem  $\varphi$ ,  $n$  vyjadřuje řád zářiče. Rozdíly mezi jednotlivými řády vyobrazuje obr. 3.1.



Obr. 3.1 Porovnání směrové charakteristiky akustických zářičů různého řádu.

#### 3.1.1 Akustický zářič 0. řádu

Tento zářič je definovaný jako pulsující koule, kde akustický tlak není závislý na úhlu od osy zářiče (viz o. 3.1). Takový zářič je označován jako monopól. Zároveň velikost akustického tlaku v závislosti na vzdálenosti od zářiče je nepřímo úměrná v blízkém i vzdáleném poli, kde hranice mezi blízkým a vzdáleným polem je definována

vztahem 3.2. Tato strmota poklesu akustického tlaku je -6 dB na každý dvojnásobek vzdálenosti od zářiče

$$r_m = 1/k , \quad (3.2)$$

kde  $r_m$  je mezní vzdálenost v m a  $k$  je vlnové číslo v  $m^{-1}$ . Hodnota vlnového čísla je dána vztahem (3.3)

$$k = 2\pi/\lambda , \quad (3.3)$$

kde  $\lambda$  představuje vlnovou délku v m.

### 3.1.2 Akustický zářič 1. řádu a $n$ -tého řádu

Zářič 1. řádu vznikne spojením dvou zářičů 0. řádu, které jsou umístěny ve vzdálenosti, která je výrazně nižší než vlnová délka vyzařovaného vlnění, a zároveň kmitají v protifázi. Tímto vznikne akustický dipól (viz obr. 3.1).

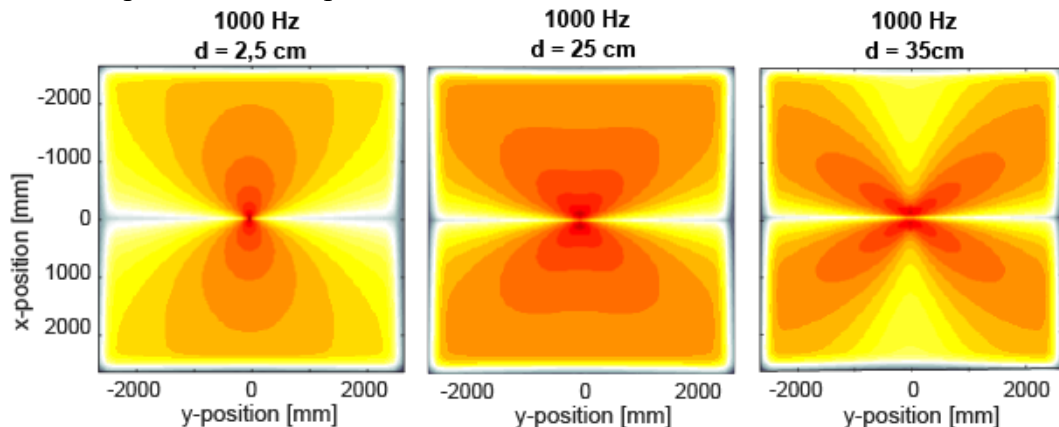
Pro zářiče vyšších řádů platí, že vznikají složením dvou zářičů, které jsou o řád nižší, tedy například zářič 4. řádu vznikne spojením dvou zářičů 3. řádu.

Akustický tlak klesá ve vzdáleném poli stejně, jako tomu u zářiče 0. řádu, strmostí -6 dB na dvojnásobek vzdálenosti od zářiče, avšak v blízkém poli platí závislost (3.4)[4]

$$-6(n + 1)dB , \quad (3.4)$$

kde  $n$  představuje řád daného zářiče.

Pokud u zářičů vyšších řádů dojde k tomu, že vzdálenost mezi jednotlivými zářiči přibližně odpovídá vlnové délce vyzařovaného signálu, vzniknou deformace směrových charakteristik. Místo osmičkové charakteristiky se začnou objevovat postranní laloky. Tento jev vyobrazuje obr. 3.2, kde veličina  $d$  představuje vzdálenost mezi zářiči 0. řádu. Vlnová délka pro 1000 Hz odpovídá 34,4 cm.



Obr. 3.2 Porovnání rozpadu směrové charakteristiky zářiče 1. řádu.

## 3.2 Pístově kmitající kruhová membrána

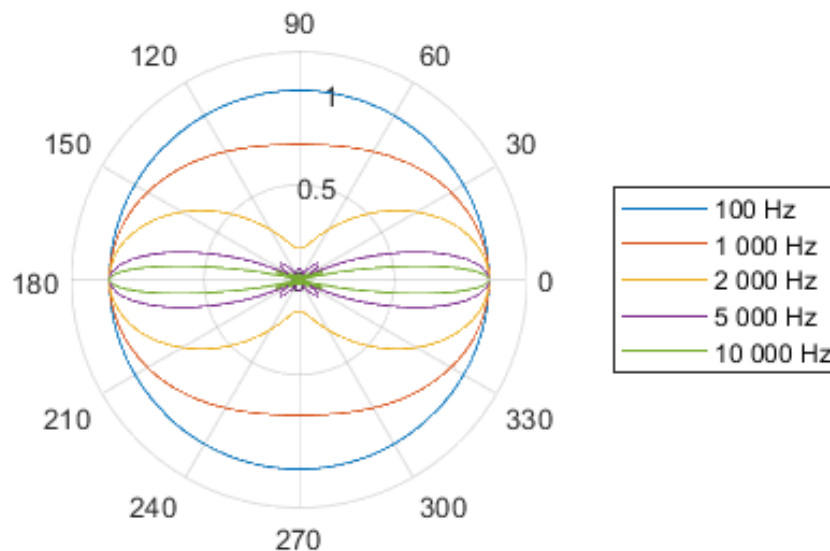
Naprostá většina reproduktorů, které se v dnešní době používají k vytváření zvuku, má charakter pístově kmitající membrány. Vlivem reálných rozměrů, které membrány mají, dochází v blízkém poli k nerovnoměrnému rozložení hladiny akustického tlaku, ke kterým dochází vlivem fázových posunů mezi jednotlivými dílčími vlněními vyzařovanými elementárními složkami membrány. Mezní vzdálenost u kruhové membrány se vypočítá vzorcem (3.5)[4]

$$z_m = \frac{1}{2k\pi} |(kR)^2 - \pi^2|, \quad (3.5)$$

kde  $k$  představuje vlnové číslo daného kmitočtu a  $R$  je poloměr dané membrány v m. Směrová charakteristika se dá vypočítat vzorcem (3.6)

$$\eta = \frac{2J_1(kR\sin(\varphi))}{kR\sin(\varphi)}, \quad (3.6)$$

kde  $\eta$  určuje poměr mezi signálem v ose membrány a bodem, který je od ní odkloněn a nabývá hodnot od 0 do 1.  $J_1$  jsou Besselovy funkce 1. řádu,  $R$  je poloměr dané membrány v m,  $k$  je vlnové číslo daného kmitočtu a  $\varphi$  je úhel, pod kterým je zjišťována hodnota akustického tlaku oproti ose membrány. Výsledek pro 5 různých kmitočtů a membránu s poloměrem 8,75 cm je znázorněn na obr. 3.3.

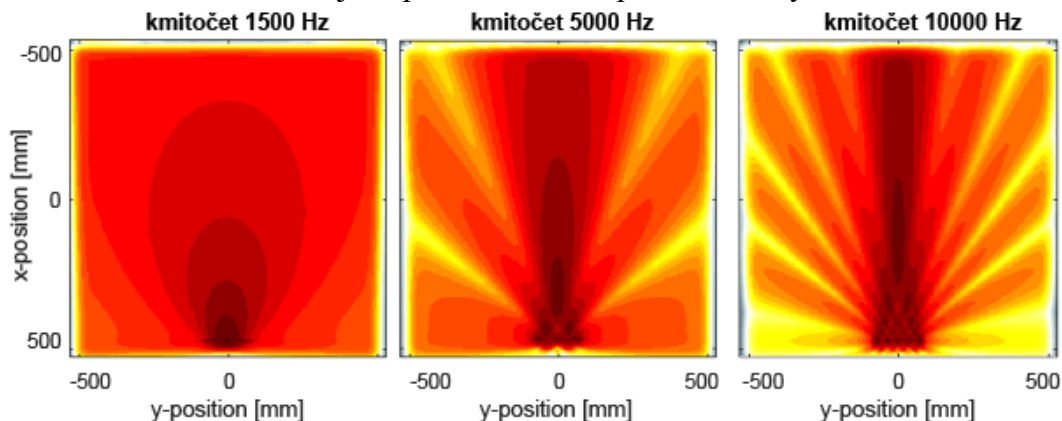


Obr. 3.3 Směrová charakteristika pro membránu s poloměrem 8,75 cm pro pět různých kmitočtů.

Obr. 3.4 vyobrazuje prostorové rozložení hladiny akustického tlaku v blízkém poli membrány o průměru 17,5 cm pro 3 různé kmitočty, jejichž vlnové délky odpovídají přibližně 23 cm, 6,8 cm a 3,44 cm. U kmitočtů, jejichž vlnová délka je několikanásobně menší než průměr membrány, je dobře viditelné nerovnoměrné rozložení hladiny



akustického tlaku. Zároveň lze dobře pozorovat zvyšující se směrovost vyzařování s rostoucím kmitočtem, které je doplněno vznikem postranních vyzařovacích laloků.



Obr. 3.4 Prostorové rozložení hladiny akustického tlaku v blízkém poli membrány

Velikost membrány má vliv na další parazitní jevy, jakými jsou vlastní módy membrány a celého měniče. Tyto vlastní rezonance pak mohou způsobit zkreslení, především na vyšších kmitočtech. Reálné membrány nedisponují nekonečnou tuhostí a tak při jejich pohybu dochází k nepatrné deformaci, přičemž v některých kmitočtech jsou k těmto deformacím membrány náchylnější. Přesné kmitočty se samozřejmě mění v závislosti na velikosti membrány a materiálu, ze kterého je vyrobena.

### 3.3 Reprodukory

Reprodukory jsou zařízení, která slouží k přeměně elektrického signálu na signál akustický. Dělí se do několika skupin podle různých kritérií.

Jednak se dělí podle způsobu vyzařování, kdy existují reproduktory přímovyzařující a nepřímovyzařující. Membrána přímovyzařujících reproduktorů je v přímém kontaktu s prostředím, do kterého vyzařuje vlnění. U nepřímovyzařujících reproduktorů je mezi membránou a prostředím vložený zvukovod, který tvaruje směrovou charakteristiku a zvyšuje účinnost daného měniče. Tento typ se používá především u výškových reproduktorů PA (Public-Address) systémů, kde je důležitý vysoký činitel směrovosti a dostatečného výkonu.

Dalším typem dělení je podle typu měniče uvádějícího membránu do pohybu na elektrodynamické, elektromagnetické, piezoelektrické a elektrostatické. S membránou elektrodynamického typu je spojena cívka, kterou protéká elektrický proud. Tato cívka je umístěna ve statickém magnetickém poli, kde při průtoku elektrického proudu dochází k pohybu. U elektromagnetického typu je součástí membrány materiál, který je přitahován magnetickým polem. Pohyb je způsoben přivedením proudu na staticky upevněný elektromagnet, který magnetickou silou rozpohybuje membránu. Reprodukory piezoelektrického typu fungují na piezoelektrickém principu. Na materiál, který má tuto vlastnost, je přivedeno napětí, které způsobí deformaci materiálu a ta uvede membránu

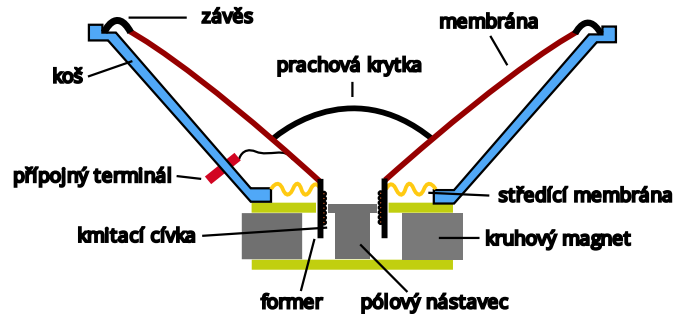
do pohybu. Tento typ se používá tam, kde je vysoká intenzita zvuku důležitější nežli kvalita samotné reprodukce. Běžné využití je u sirén a u pouličního rozhlasu. Elektrostatické reproduktory mají na povrchu membrány vodivý materiál, který je pod konstantním nábojem. Membrána je umístěna mezi dvě elektrody, na které je přiveden elektrický signál. Výsledný pohyb vzniká na základě přitahování a odpuzování nabitých desek.

Poslední rozdělení je podle kmitočtového pásma, pro které je daný reproduktor určen. Zpravidla se dělí na vysokotónové, středotónové, hlubokotónové a širokopásmové. Vysokopásmové jsou určeny pro kmitočtovou oblast 2000 – 20000 Hz, středopásmové pro 100 Hz – 2500 Hz, hlubokotónové pro 20 - 200 Hz a širokopásmové pro 100 Hz – 10000 Hz. Tyto rozsahy jsou přibližné a vždy záleží na konkrétním měniči a výrobci.

Reproduktory používané v dnešní době pro reprodukci nízkých kmitočtů jsou přímovyzářující elektrodynamické měniče, a z tohoto důvodu se bude tato práce nadále zabývat pouze tímto typem.

## 4. ELEKTRODYNAMICKÝ PŘÍMOVYZAŘUJÍCÍ REPRODUKTOR

V této kapitole byly čerpány informace z [4][6][7]. První měnič tohoto typu vzniknul v roce 1925 na základě výzkumu Echeatera W. Rice a Edwarda W. Kellonga. Podstata fungování tohoto typu se do dnešní doby příliš nezměnila - skrze cívku, která je navinutá na formeru, protéká proud, což díky svému umístění v magnetickém poli vede k pohybu, který je kolmý jak na směr protékajícího proudu, tak na směr magnetického toku. Schéma tohoto reproduktoru znázorňuje obr. 4.1. [6] [7]



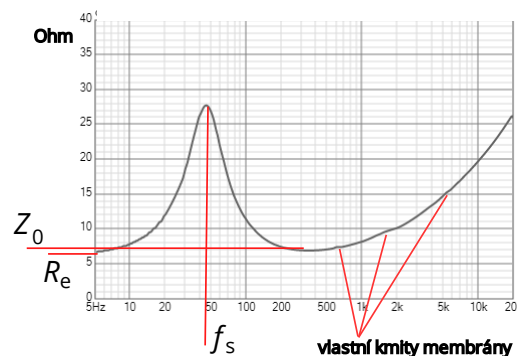
Obr. 4.1 Schéma jednotlivých částí elektrodynamickeho reproduktoru.

### 4.1 T/S parametry

T/S parametry (Thiell-Small) jsou sadou elektromechanických parametrů, které se v dnešní době používají k popisu vlastností jednotlivých měničů. Díky nim je možné předpovědět chování měniče v blízkosti jeho rezonančního kmitočtu ve většině konvenčních ozvučnic, s čímž výrobci počítají a naprostá většina jich poskytuje kompletní seznam těchto parametrů přiložených v technickém listu daného měniče.

#### 4.1.1 Stejnoseměrný odpor kmitací cívky

Stejnoseměrný odpor kmitací cívky  $R_e$  [ $\Omega$ ] se při praktickém změření impedanční charakteristiky reproduktoru odečítá na nejnižším měřeném kmitočtu viz obr. 4.2.



Obr. 4.2 Obecný tvar modulu impedanční charakteristiky reproduktoru.

#### 4.1.2 Mechanická poddajnost

Mechanická poddajnost  $C_{ms}$  [m/n] je celková poddajnost uložení membrány. Hlavní roli tedy hrají závěsné okraje a středící membrána.

#### 4.1.3 Ekvivalentní objem vzduchu

Ekvivalentní objem vzduchu  $V_{as}$  [ $m^3$ ] je objem vzduchu, jehož mechanická poddajnost by byla stejná jako mechanická poddajnost, dá se vypočítat ze vzorce (4.1) [7]

$$V_{as} = c_0^2 \cdot \rho_0 \cdot C_{ms} \cdot S_d^2, \quad (4.1)$$

kde  $c_0$  představuje rychlost zvuku v  $m \cdot s^{-1}$  a  $\rho_0$  hustotu vzduchu v  $kg \cdot m^{-3}$ .

#### 4.1.4 Celková hmotnost kmitajících částí

Celková hmotnost kmitajících částí  $M_{md}$  [kg] je součtem všech prvků, které jsou uváděny do pohybu. Jedná se o hmotnost samotné membrány a kmitací cívky.

#### 4.1.5 Rezonanční kmitočet

Rezonanční kmitočet  $F_s$  [Hz] reproduktoru umístěného ve volném poli bez ozvučnice. Při změření impedanční charakteristiky je to kmitočet, kde se nachází lokální impedanční maximum. Dá se vypočítat podle vztahu (4.2)[7]

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}}. \quad (4.2)$$

#### 4.1.6 Efektivní plocha membrány

Efektivní plocha membrány  $S_d$  [ $m^2$ ] je celková plocha membrány, která je uváděna do pohybu.

#### 4.1.7 Mechanický odpor

Mechanický odpor  $R_{md}$  [ $N \cdot s/m^5$ ] vyjadřuje, k jak velkým ztrátám dochází vlivem mechanického pohybu membrány.

#### 4.1.8 Bl faktor

Bl faktor [Tm] Vznikne vynásobením délky aktivního vodiče kmitací cívky s intenzitou magnetického pole v mezeře, kde se tato cívka nachází, a udává jakou silou protékající proud působí na měnič. Hodnota Bl faktoru je převodní konstanta gyrátoru při použití náhradního elektrického schématu.

#### 4.1.9 Mechanický, elektrický a celkový činitel jakosti

Mechanický  $Q_{ms}$ , elektrický  $Q_{es}$  a celkový  $Q_{ts}$  činitel jakosti jsou bezrozměrné veličiny, které vyjadřují, kolik energie je uloženo v rezonátoru kmitočtu po ukončení jeho vybuzení, v tomto případě se všechny týkají kmitočtové charakteristiky v oblasti

rezonančního kmitočtu. Dají se vypočítat následujícími vzorci (4.3)(4.4)(4.5)

$$Q_{ms} = \frac{1}{R_{ms}} \cdot \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}}, \quad (4.3)$$

$$Q_{es} = \frac{R_e}{(Bl)^2} \cdot \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot F_s \cdot R_e \cdot M_{ms}}{(Bl)^2}, \quad (4.4)$$

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}. \quad (4.5)$$

#### 4.1.10 Vyzařovací impedance membrány

Vyzařovací impedance membrány  $r_{mv}$   $m_{mv}$  se dá nahradit vyzařovací impedancí pulsující polokoule, která má stejnou plochu jako membrána. Vypočítat ji lze vzorci (4.6) a (4.7).

$$r_{mv} = c_0 \rho_0 S, \quad (4.6)$$

$$m_{mv} = c_0 \frac{R}{\sqrt{2}} S, \quad (4.7)$$

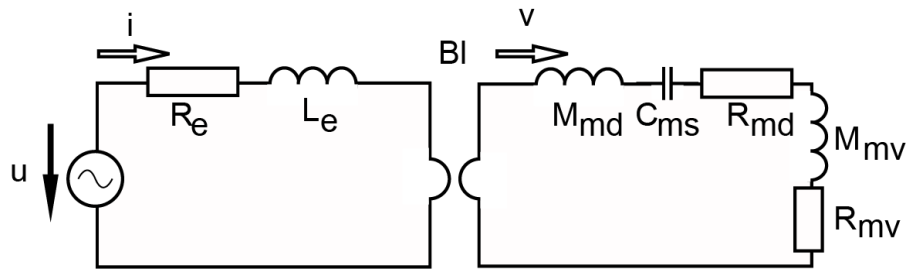
kde  $R$  je poloměr membrány v m,  $S$  je plocha membrány v m<sup>2</sup>,  $\rho_0$  je hustota vzduchu v kg. m<sup>3</sup> a  $c_0$  rychlost zvuku ve vzduchu v m. s<sup>-1</sup>.

#### 4.1.11 Náhradní elektrické schéma

Pokud jsou známy výše uvedené parametry reproduktoru, je možné vytvořit náhradní elektrické schéma viz o. 4.3. Využívá se zde 1. elektromechanické analogie, kdy se mechanickým veličinám přiřadí veličiny elektrické, konkrétně napětí se přiřadí síla a proud rychlost. Převod elektrické energie na pohybovou se chová jako mechanický gyrátor s převodní konstantou  $Bl$ .

- Síla -> elektrické napětí
- Rychlost -> elektrický proud
- Hmotnost -> indukčnost
- Poddajnost -> kapacita
- Mechanický odpor -> elektrický odpor

Takto vytvořené elektrické schéma znázorňuje obr. 4.3.



Obr. 4.3 Náhradní elektrické schéma elektrodynamického reproduktoru.

## 4.2 Reproduktorová ozvučnice

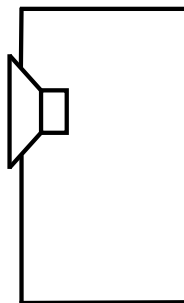
Protože reproduktorová membrána v pohybu se na vlnových délkách větších než je průměr membrány chová jako dipól, je primární funkcí reproduktorové ozvučnice to, aby od sebe tyto signály byly odděleny, jinak by docházelo k jejich vzájemnému odečítání.

Co se týká nároků na materiál, ze kterého je ozvučnice vyrobena, ve většině případů je požadavkem, aby měl vysokou hustotu a tuhost a aby nebyl náchylný na vlastní vibrace. Často se pro výrobu používá překližka MDF, což je pravděpodobně nejčastěji používaný materiál pro výrobu v současnosti, ale výjimkou nejsou ani reproduktorové ozvučnice odlité z betonu nebo z kovu.

Volba velikosti, ale i konstrukčního typu, má zásadní vliv na frekvenční odezvu v oblasti nízkých kmitočtů, protože vzduch uvnitř ozvučnice se chová jako pružina, s určitou tuhostí, která ovlivňuje odezvu celého systému včetně změny rezonančního kmitočtu.

### 4.2.1 Uzavřená ozvučnice

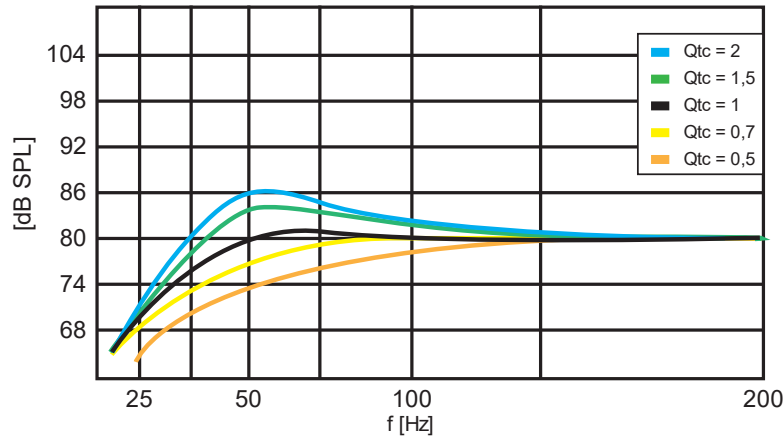
Jedná se o nejsnadnější typ ozvučnice. Veškerá akustická energie, která je vyzářena zadní stranou membrány, je v ideálním případě pohlcena a přeměněna na teplo. Tento typ ozvučnice se chová jako horní propust se strmostí 12 dB na oktávu pod rezonančním kmitočtem celé akustické soustavy.[6] Zjednodušené schéma uzavřené ozvučnice je znázorněno na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Schéma uzavřené ozvučnice.

Důležitým parametrem, kterým hotový reproduktorový box disponuje, je činitel jakosti měniče a ozvučnice  $Q_{ts}$ , který popisuje chování celého boxu v oblasti

rezonančního kmitočtu. Většinou nabývá hodnot od 0 do 2 s tím, že efekt na kmitočtovou odezvu znázorňuje obr. 4.5.



Obr. 4.5 Vyobrazení vlivu celkového činitele jakosti  $Q_{tc}$  na kmitočtovou odezvu v oblasti rezonančního kmitočtu.

Hodnota tohoto činitele se dá odhadnout vzorcem (4.8) [8]

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{\frac{V_{as}}{V_c} + 1}, \quad (4.8)$$

kde  $V_c$  vyjadřuje celkový objem dané ozvučnice v  $m^3$ . Rezonanční kmitočet celé soustavy se vyřeší vzorcem (4.9)[8].

$$F_c = F_s \cdot \sqrt{\frac{V_{as}}{V_c} + 1}. \quad (4.9)$$

V zásadě platí, že čím menší ozvučnice, tím výše se posouvá rezonanční kmitočet a zároveň tím vyšší je pak hodnota  $Q_{tc}$ .

Vliv na tuto hodnotu má i tlumivá výplň ozvučnice, která zamezuje stojatému vlnění uvnitř boxu, kdy platí, že čím více tlumení, tím nižší hodnota  $Q_{tc}$ . [6]

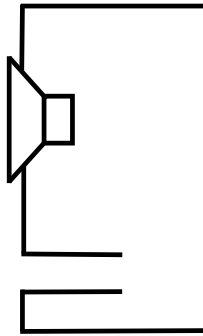
#### 4.2.2 Ozvučnice typu Bass-Reflex

Ozvučnice s bassreflexovým nátrubkem se v dnešní době hojně využívá při konstrukci nízkofrekvenčních reproduktorů – subwooferů. Pod rezonančním kmitočtem celého reproboxu má na rozdíl od uzavřené ozvučnice větší strmost. [6]

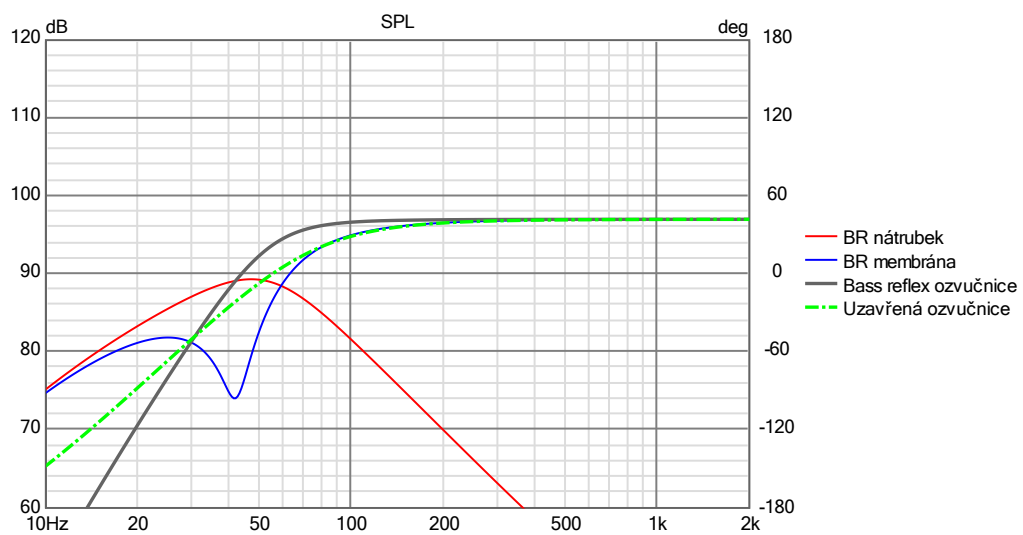
Je charakteristická přidáním nátrubku, který umožňuje využití energie vyzářené zadní stranou membrány. Nátrubek přidává akustickou zátěž, která do náhradního elektrického schématu přidává prvky hmotnosti a poddajnosti, které lze změnou jeho průměru a délky ladit. Schéma bassreflexové ozvučnice vyobrazuje obr. 4.6.

V rezonančním kmitočtu je primárním zdrojem zvuku rezonující sloupec vzduchu v bassreflexovém nátrubku. Nevýhodou této ozvučnice je, že pod rezonančním kmitočtem není membrána utlumována stlačeným vzduchem v uzavřeném prostoru a při

extrémně nízkých frekvencích hrozí poškození měniče kvůli přílišné výchylce. Rozdíl mezi uzavřenou a bassreflexovou ozvučnicí v kmitočtové odezvě znázorňuje obr. 4.7.



Obr. 4.6 Schéma bassreflexové ozvučnice.



Obr 4.7 Porovnání kmitočtové odezvy bassreflexové a uzavřené ozvučnice.

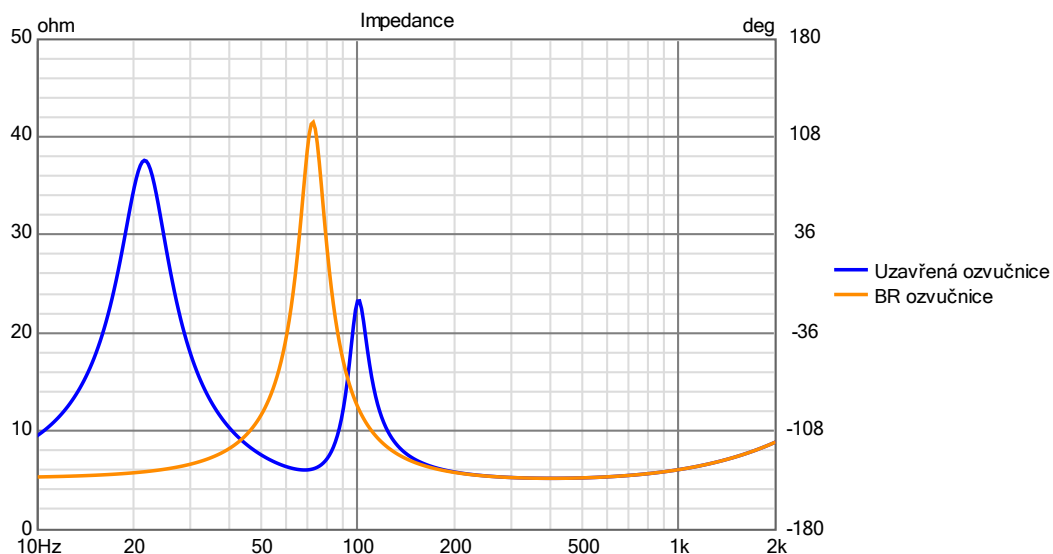
Zároveň je na tomto obrázku vyobrazeno, jak se v oblasti rezonančního kmitočtu sníží výchylka membrány a hlavním zdrojem akustické energie se stane nátrubek.

Při návrhu této ozvučnice se musí zároveň počítat s rychlostí proudění vzduchu v nátrubku. Pokud je průřez nátrubku příliš malý, můžou se v něm začít tvořit rušivé turbulence (angl. *chuffing*). V takovém případě je nutné nátrubek zkrátit, což vede ke změně rezonančního kmitočtu, nebo naopak prodloužit a zároveň změnit plochu průřezu. Právě velká finální délka nátrubku může být problémová, protože nemusí být snadné ho celý poskládat do ozvučnice

Přidání bassreflexového nátrubku do celého akustického obvodu má také ten následek, že v místě rezonančního kmitočtu není na impedanční charakteristice lokální maximum, ale lokální minimum mezi dvěma nově vytvořenými vrcholy. Porovnání



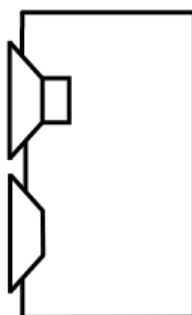
impedančních charakteristik pro bassreflexovou a uzavřenou ozvučnici, kdy jsou obě naladěné na stejný rezonanční kmitočet ukazuje obr. 4.8.



Obr. 4.8 Porovnání impedančních charakteristik mezi bassreflexovou a uzavřenou ozvučnicí.

### 4.2.3 Ozvučnice s pasivním zářičem

Pasivní zářič u této ozvučnice nahrazuje sloupec vzduchu. Jedná se v podstatě o reproduktorové měniče, které nemají cívku a magnet a jsou tvořeny pouze zavěšenými membránami. Jeho výhodou je, že se dá realizovat na podstatně menších ozvučnicích. Oproti bassreflexové ozvučnici má tu výhodu, že eliminuje riziko příliš vysokého proudění vzduchu a zároveň nezabírá žádný prostor uvnitř ozvučnice. Schéma ozvučnice s pasivním zářičem znázorňuje obr. 4.9.



Obr. 4.9 Schéma ozvučnice s pasivním zářičem.

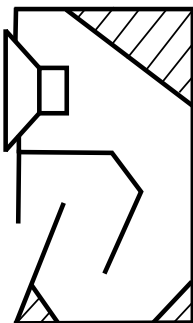
### 4.2.4 Ozvučnice typu Transmission Line

Tyto ozvučnice nefungují na principu vnitřních rezonancí, ale na principu zvukovodu, který má za úkol zpozdít vlnu ze zadní části membrány tak, aby doputovala do místa před membránou opět ve fázi.

Pokud se v ozvučnici nenachází žádné tlumení, chová se tato ozvučnice jako polouzavřená trubice a vzniká zde stojaté vlnění o kmitočtu, jehož vlnová délka je

čtyřnásobkem délky celého zvukovodu (a jeho celočíselných násobků – vyšších harmonických), což způsobuje značné zvlnění kmitočtové charakteristiky v těchto oblastech. [6]

Další nevýhodou je potřebná délka zvukovodu, která může přesáhnout 2 m. Tento problém se řeší poskládáním zvukovodu uvnitř ozvučnice. Schéma Transmission-Line ozvučnice je uvedeno na obr. 4.10.



Obr. 4.10 Schéma Transmission-Line ozvučnice

### 4.3 Nízkofrekvenční basové reproduktory – Subwoofery

Z důvodů popsaných v kapitole 3.2 se slyšitelné spektrum kmitočtů nevyzařuje pouze jedním měničem, ale je rozděleno do více pásem, z nichž každé má svůj dedikovaný měnič. V současnosti jsou asi nejběžnějším typem dvoupásmové reproduktorové soustavy. Díky současným pokrokům v oblasti materiálů a návrhu samotných měničů jsou schopny rozsahu od 60 Hz do 20 kHz, kdy dělicí kmitočet mezi středobasovým a výškovým měničem bývá umístěn v oblasti 1500 Hz – 5000 Hz. Zároveň středobasový měnič bývá umístěn v ozvučnici s bassreflexovým nátrubkem, což způsobí rozšíření reprodukovatelného pásma do nízkých kmitočtů. Typický příklad takto zkonstruovaného reproduktoru vidíme na obr. 4.12.



Obr. 4.11 Příklad dvoupásmového reproduktoru – Focal Chora 806 [9]

V oblastech, kde je kladen důraz na čistou reprodukci co nejširšího poslechového pásma, bývá často soustava doplněna o reproduktor, jehož účelem je reprodukce kmitočtů pod 100 Hz. Používají se membrány o velkých rozměrech, které mohou v extrémních případech mít průměr 80 cm, příklad takového reproduktoru lze spatřit na obr. 4.12.



Obr. 4.12 Příklad reproduktoru s 32" měničem – Funktion One F132. [10]

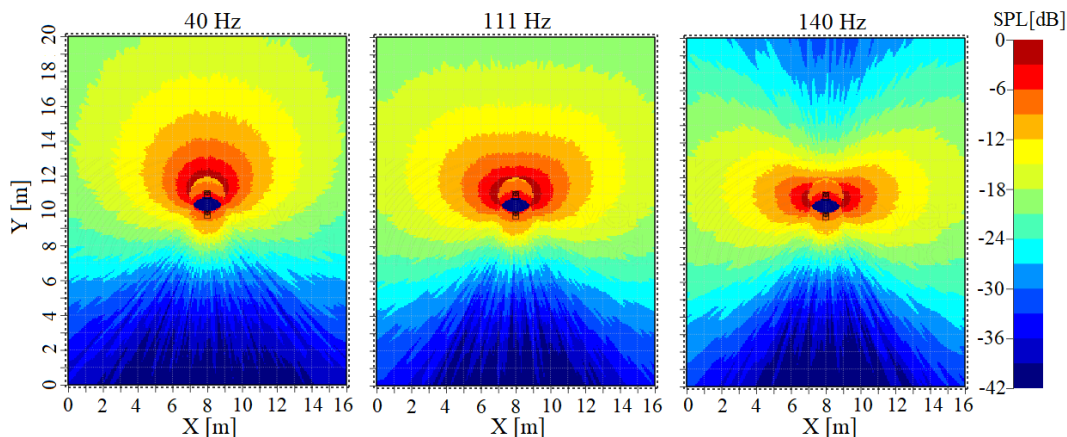
## 4.4 Směrové konfigurace basových souprav

Z důvodů popsaných v kapitole 3 má směrová charakteristika každého basového měniče kulovou charakteristiku, chová se tedy jako zářič 0. řádu. To nemusí být ve všech případech žádoucí. Například při ozvučení koncertu, kdy se basové reproduktory často umísťují mezi pódium a obecenstvo. Vysoká hladina nízkých kmitočtů v prvních řadách může být pro posluchače žádoucí, ale stejná intenzita bude i v místě účinkujících umělců, pro které to může mít rušivý efekt.

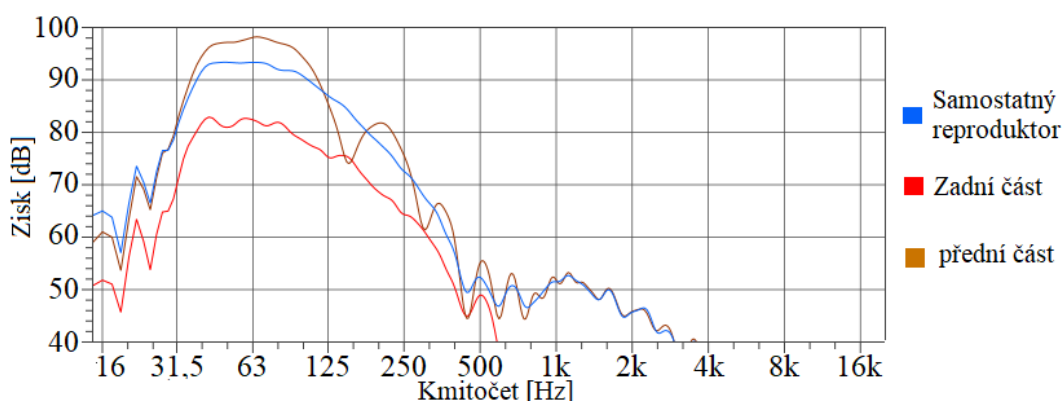
Z toho důvodu se používá několik konfigurací, které využívá více reproduktorů a které využívají vlastností zářičů popsaných v kapitole 3.1, kterými se dosahuje směrové vyzařovací charakteristiky na nízkých kmitočtech.

### 4.4.1 Gradientní konfigurace

Při této konfiguraci se používají dva basové reproduktory umístěné za sebou. Signál, který hraje ze zadního reproduktoru, má obrácenou polaritu, a navíc je zpožděn o dobu, kterou k němu trvá zvuku dorazit od předního reproduktoru. Výhoda této konfigurace spočívá v tom, že za reproduktory vždy dochází k odečtu signálů. V přední části dochází ke sčítání, které je kmitočtově závislé. To je způsobeno tím, že fázový posun, se kterým dorazí zadní zvuková vlna k přednímu reproduktoru, není konstantní pro všechny kmitočty a vzniká tak hřebenový filtr [11]. Změnu směrové charakteristiky směrem k vyšším kmitočtům znázorňuje obr. 4.13, jehož simulace proběhla ve výpočetním programu MAPP XT. Obr. 4.14 vyobrazuje porovnání kmitočtových charakteristik této konfigurace v místě 4,5 m před a za akustickým středem soustavy spolu s kmitočtovou odezvou samotného reproduktoru.



Obr. 4.13 Vývoj směrové charakteristiky gradientní basové konfigurace.



Obr. 4.14 Porovnání kmitočtové odezvy pro samotný reproduktor s přední částí konfigurace a se zadní částí konfigurace

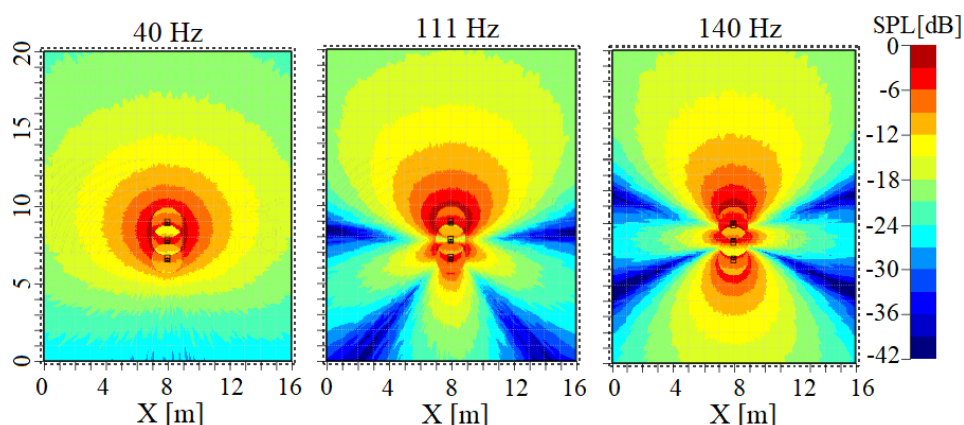
Je dobře vidět hřebenový filtr, který vzniká v přední části, kdy dochází k pravidelnému sčítání a odečítání signálů. Pro tuto konfiguraci byly zdroje umístěny 1,15 m od sebe, což odpovídá  $\frac{1}{4}$  vlnové délky kmitočtu 74 Hz. Dvojnásobek tohoto kmitočtu odpovídá prvnímu minimu. Teoreticky, pokud by mezní kmitočet pro tuto soustavu byl 100 Hz, nebyl by to příliš problém. Další možností, jak by se tento negativní efekt dal potlačit, by bylo umístit reproduktory blíže k sobě, s menší dobou zpoždění, což by posunulo první minimum do vyšších kmitočtů. Tato změna by ale měla za následek horší sčítání signálu v nižších oblastech, záleží tedy především na podmínkách použití.

#### 4.4.2 End-Fire konfigurace

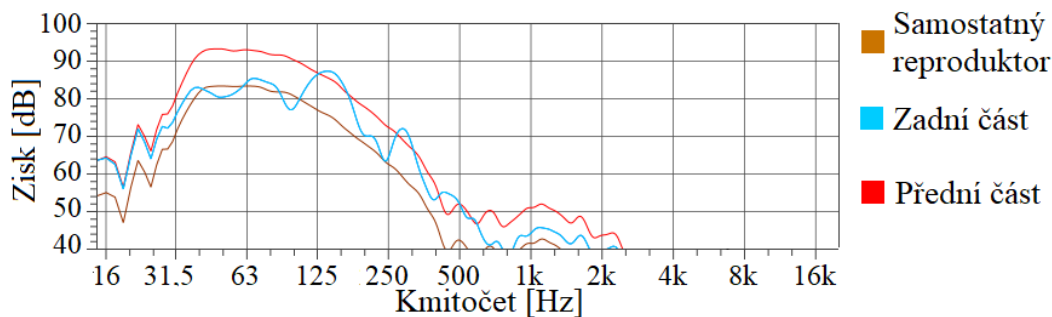
U této konfigurace se dají použít dva reproduktory, ale je vhodnější jejich větší počet s doporučením alespoň 4 kusů. U této konfigurace jde o stabilní sčítání v přední oblasti, na rozdíl od gradientní konfigurace, kdy jde o stabilní odečet v zadní oblasti. Reproduktory jsou umístěny v řadě za sebou a signály mají stejnou polaritu. Důležité je zpoždění, kdy jako první hrají reproduktory nejvíce vzadu a jak zvuk putuje prostorem, postupně se k němu přidávají ostatní reproduktory, které jsou vždy zpožděné o dobu, kterou trvá zvuku ze zadního reproduktoru doputovat k jejich membráně. Výsledkem je,

že v přední části dorazí signál ze všech jednotek současně, tedy ve fázi, a v zadní části jednotlivé signály přicházejí s rozdílnými zpožděními. Nepochází tak sice k přímému odečtu, ale ani k součtu [11]. Obr. 4.15 ukazuje vývoj směrové charakteristiky pro end-fire konfiguraci a obr. 4.16 ukazuje kmitočtovou odezvu.

Pro tento konkrétní příklad byl zvolen rozestup mezi reproduktory stejný jako v příkladu gradientní konfigurace. Na kmitočtové charakteristice je dobře vidět, že rozdíl mezi přední a zadní částí není tak drastický, jako v příkladu gradientní konfigurace, ale zato v přední části dochází ke stabilnímu zesílení signálu napříč celým spektrem.



Obr. 4.15 Vývoj směrové charakteristiky pro End-Fire basovou konfiguraci.

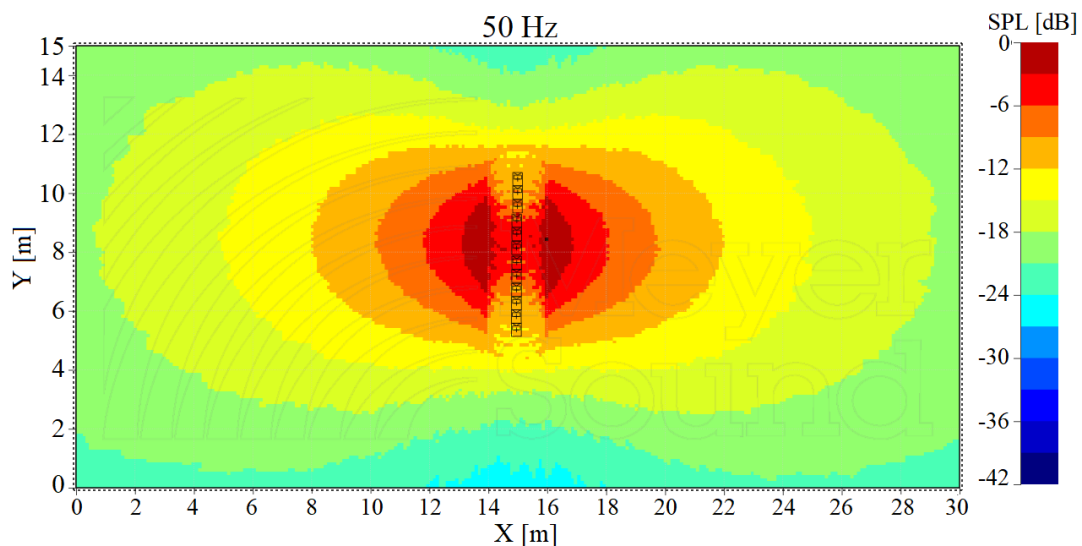


Obr. 4.16 Porovnání kmitočtové odezvy pro samotný reproduktor, v přední části konfigurace a v zadní části konfigurace

#### 4.4.3 TM (Thomas Mundorf) konfigurace

Tato konfigurace je pojmenována po zvukovém inženýrovi, který ji poprvé použil, jehož jméno je Thomas Mundorf. Pro tuto konfiguraci je nutné použít více reproduktorů. Je neobvyklá tím, že vznikla za účelem umístění přímo nad podium, které bylo umístěno uprostřed obecnstva. Reprodukory jsou umístěny nad sebou a všechny hrají ve stejné fázi bez vzájemného zpoždění. To má za následek, že při pohledu shora se pořád jedná v podstatě o bodový zdroj zvuku s kulovou charakteristikou, ale při pohledu z boku vzniká osmičková charakteristika. Je to způsobeno tím, že v této ose je zdroj zvuku srovnatelný s vlnovou délkou a dochází k podobnému efektu, který nám ukazuje obr.

4.17. Prostorově má pak celá směrová charakteristika tvar toroidu. Nevýhodou je nutnost velkého množství reproduktorů, protože celková výška musí být několik metrů. Zároveň je potřeba konstrukce, která je schopná toto množství reproduktorů unést [11]. Obr. 4.17 vyobrazuje příklad TM konfigurace pro kmitočet 50 Hz při bočním pohledu.



Obr. 4.17 Směrová charakteristika TM konfigurace při pohledu z boku.

## 5. NÁVRH BASOVÉHO REPRODUKTORU SE SMĚROVOU VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKOU

Ze směrových konfigurací basových reproduktorů dosahuje nejvyšší směrovosti gradientní konfigurace. V rámci jediného reproduktorového boxu by bylo možné toto uspořádání vytvořit. V zásadě by se jednalo o box se dvěma oddělenými reproduktory, kdy by každý z nich měl vlastní oddělenou ozvučnici. Toto ale není příliš praktické, protože v rámci tohoto boxu by musela být zároveň implementována zpoždovací linka pro zadní reproduktor a dva výkonové zesilovače, protože každý z reproduktorů produkuje jiný signál, čímž podstatně narůstá jak konstrukční tak finanční náročnost.

Byl proto zvolen návrh ozvučnice, která bude využívat princip gradientního uspořádání basových reproduktorů ve spojení s praktickým fungováním transmission-line ozvučnice. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že primární účel u zvukovodu transmission-line bývá rozšířit kmitočtové pásmo do nižších kmitočtů, které by samotný měnič nezvládl reprodukovat a rezonancí tak tyto kmitočty zesílit. U tohoto návrhu je zvolen reproduktor, který má sám od sebe dostatečný rozsah, a proto účel zvukovodu nebude tyto kmitočty zesilovat, ale pouze zpožďovat. Teoreticky by tak zpožděná zvuková vlna hrála roli zadního reproduktoru z gradientního uspořádání.

Délka výsledné ozvučnice je zvolena tak, aby gradientní uspořádání reproduktorů ve stejné vzdálenosti působilo se ziskem alespoň 3 dB na kmitočtu 110 Hz a zároveň aby nedocházelo k odečtu vlnění od 35 Hz.

Při použití vzorců z kapitoly 2.1.1 lze zjistit, že vlnění se sčítají se ziskem od 6 dB do 3 dB, pokud je mezi nimi vzájemný posun  $0^\circ - 90^\circ$  a  $270^\circ - 360^\circ$ . Zároveň druhá strana membrány generuje vlnění, které je posunuto o  $180^\circ$ . Pokud je toto vlnění oproti původnímu zpožděno o dalších  $180^\circ$ , vzniká dokonalý součet a zisk 6 dB a při posunu o dalších  $90^\circ$  dosahuje zvolené hranice +3 dB. Z toho vyplývá, že celkový fázový posun daného vlnění nesmí být více než  $270^\circ$ . Pokud je tedy za horní hranici brán kmitočt 110 Hz, jehož vlnová délka je 3,127 m, fázový posun  $270^\circ$  pro něj odpovídá vzdálenosti 2,345 m. Protože do přední části před ozvučnicí musí zvuková vlna putovat dvounásobek délky ozvučnice, vyplývá z toho, že daná ozvučnice nesmí být delší nežli 1,173 m.

Zároveň pokud je brána jako spodní hranice 35 Hz, s rozdílem, že není cílem 3 dB zisk, ale aby nedocházelo k žádnému odečtu, je potřeba aby fázový posun dvou vlnění o tomto kmitočtu byl alespoň  $240^\circ$ . Vlnová délka tohoto kmitočtu je 9,829 m. Zadní membrána generuje vlnění o  $180^\circ$  posunuté, a proto, aby nedocházelo k odečtu v přední

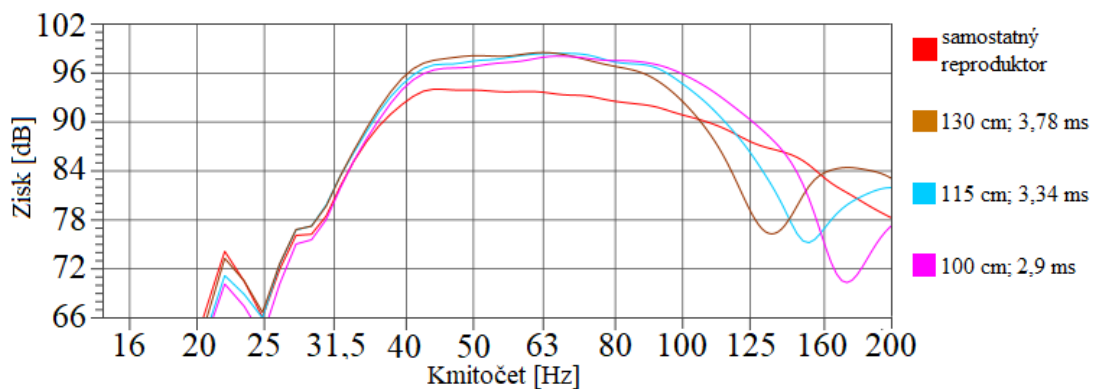
části, musí být toto vlnění posunuto alespoň o dalších  $80^\circ$ , což vychází na celkovou délku trasy 2,184 m, tudíž délka ozvučnice musí být alespoň 1,09 m.

Při maximální délce ozvučnice přibližně 117 cm a minimální délce ozvučnice přibližně 109 cm byla zvolena výsledná délka ozvučnice 115 cm.

Při této vzdálenosti s patřičným zpožděním má gradientní konfigurace basových reproduktorů přijatelnou horní hranici přibližně 110 Hz a na nízkých kmitočtech stále dochází k součtu vlnění, viz obr. 5.1.

Jako průměr měniče bylo zvoleno 15". Důvod je ten, že měniče s touto velikostí membrány jsou již schopné reprodukce nízkých kmitočtů, ale stále jsou ještě relativně cenově dostupné.

Protože výpočty ve 3D prostoru jsou velmi výpočetně náročné, byly nejprve provedeny výpočty pouze ve 2D prostoru. V síti bodů byla vytvořena ozvučnice o délce 115 cm se zdrojem tlaku v přední části, který má průměr 30 cm. Stěny ozvučnice mají 2,5 cm. Membrána byla vytvořena dvěma tlakovými zdroji, z nichž jeden má obrácenou polaritu signálu.

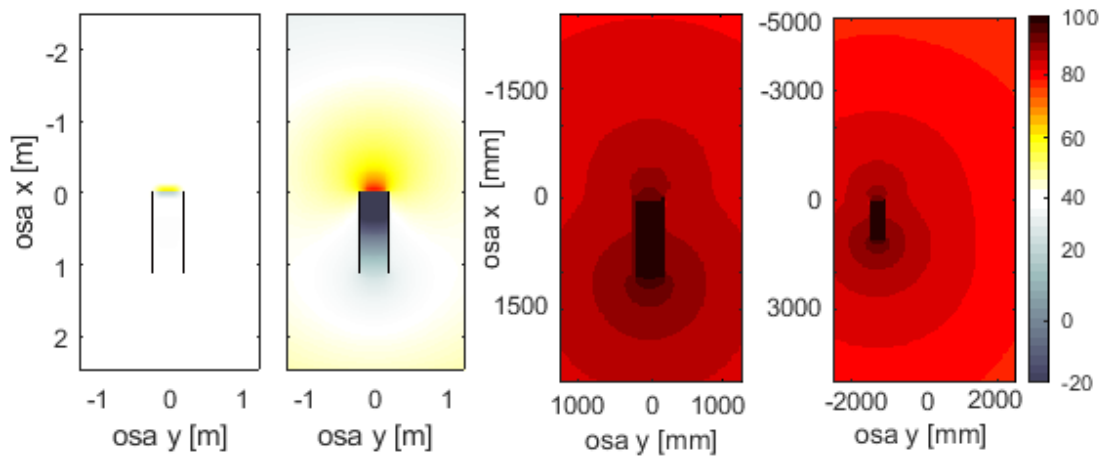


Obr. 5.1 Porovnání kmitočtových charakteristik pro různé vzdálenosti a zpoždění pro gradientní uspořádání basových reproduktorů.

Obr. 5.2 zobrazuje vytvořený 2D model ozvučnice s vložením dvou zdrojů s obrácenou polaritou v přední části. Následuje snímek z průběhu simulace, která se vykresluje jako zpomalená animace. Po skončení simulace K-wave ukáže finální rozložení akustického tlaku RMS, které je převedeno do dB(SPL). Poslední část obrázku



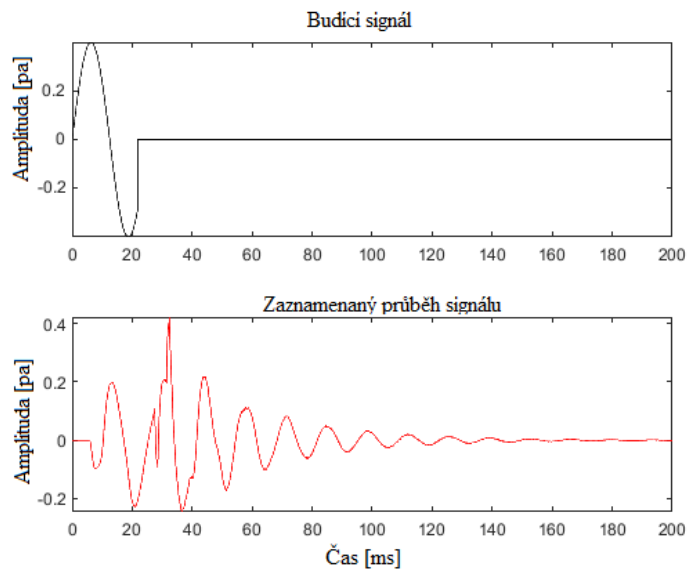
znázorňuje výpočet rozložení hladiny akustického tlaku pro stejnou konfiguraci, ale s větší výpočetní plochou. Pro tento snímek musel být spuštěn nový výpočet.



Obr. 5.2 Ukázka průběhu simulace s vykreslením výsledného rozložení hladiny akustického tlaku pro 80 Hz.

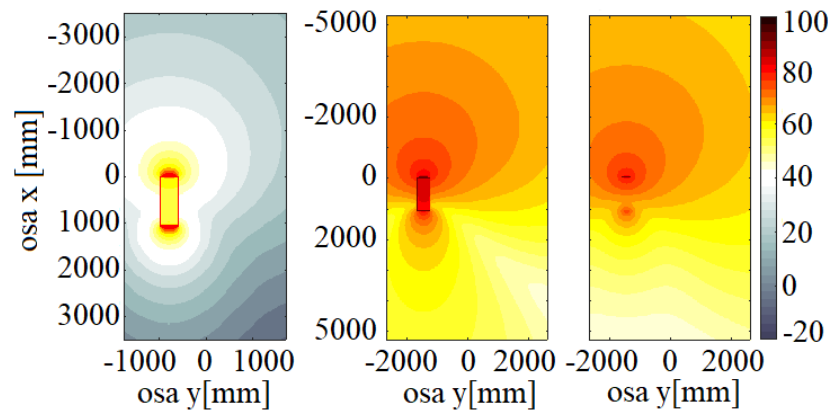
Je dobře vidět, že zvuk, který ozvučnici opouští v zadní části má podstatně větší amplitudu nežli zvuk vytvořený membránou v přední části. Tento model v sobě nezahrnoval žádné tlumení, což způsobilo vznik stojatého vlnění a zesílení signálu. Tento fakt byl ověřen na výpočtu, kdy byla ozvučnice pouze vybudována a výsledný signál byl zaznamenán, viz obr. 5.3.

Na tomto obrázku lze dobře pozorovat, jak po ukončení budicího signálu začne sloupec vzduchu rezonovat o takovém kmitočtu, jehož  $\frac{1}{4}$  vlnové délky odpovídá délce ozvučnice.



Obr. 5.3 Porovnání budicího signálu a signálu nahraným před ústím ozvučnice.

Dalším krokem bylo vytvoření takového modelu, který představoval čistě gradientní uspořádání měničů, z důvodu ověření předpokládaného tvaru výsledné směrové charakteristiky. Model zahrnuje ozvučnici o délce 115 cm a dva měniče se stejnou amplitudou signálu s opačnou polaritou, z nichž je zadní zpožděný o 3,34 ms, což je doba, kterou zvuku trvá urazit vzdálenost 115 cm. Zároveň byl proveden výpočet pouze pro zdroje zvuku umístěné ve volném poli bez vložené ozvučnice a výpočet ve 3D pro tuto konfiguraci, viz obr. 5.4.

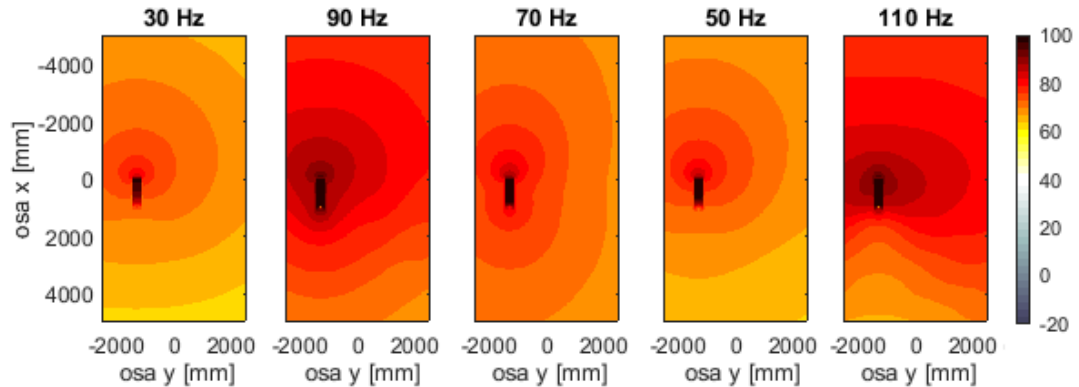


Obr. 5.4 Porovnání gradientní konfigurace zdrojů ve 3D, ve 2D a ve 2D bez ozvučnice pro 40 Hz [dB].

Rozdíl mezi konfiguracemi ve 2D je způsoben tím, že bez vložené překážky nedochází k žádným odrazům od ozvučnice, a navíc při jejím vložení musí docházet k jejímu obtékání. Rozdíl mezi 3D a 2D výpočtem vzniká z již výše zmíněného rozdílu v úbytku hladiny akustického tlaku se vzdáleností a tím, že ve 3D dochází k dalšímu obtékání zvukovou vlnou horní a spodní stranou a nejen pouze z boků.

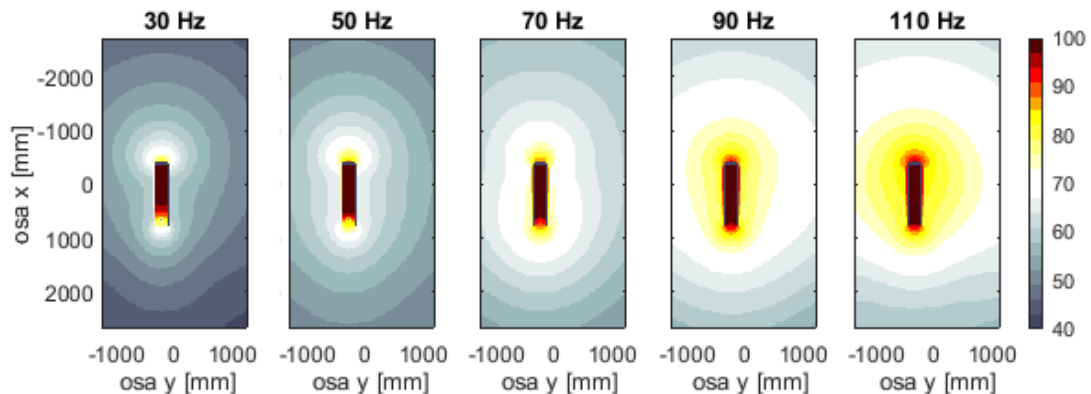
Následně byl vytvořen model, jehož součástí byla absorpční vložka. Bohužel, při tradičním zadávání absorpčních koeficientů, které K-wave umožňuje, vznikla nestabilita celkových výpočtů a tyto výsledky jsou nepoužitelné. Místo toho byl vložen bod, jehož rychlost zvuku je nastavena na pouhých  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Výsledkem je, že veškerá zvuková energie, která do tohoto bodu doputuje, jej nestihne během celé délky výpočtu opustit.

Výsledkem je absolutní pohlcení energie v tomto bodě po dobu výpočtu. Výsledky pro takto upravený model vyobrazuje obr. 5.5.



Obr. 5.5 Porovnání změn ve směrových charakteristikách po vložení absorbéru pro různé kmitočty při 2D výpočtu [dB].

Lze vidět, že dojde k výraznému tvarování směrové charakteristiky. Podobným způsobem byl vytvořen 3D model, u něhož byla vypočítána směrová charakteristika ve vodorovné rovině. Výsledky pro tento model zobrazuje obr. 5.6.



Obr. 5.6 Porovnání změn ve směrových charakteristikách po vložení absorbéru pro různé kmitočty při 3D výpočtu [dB].

Pokud bude brán jako akustický střed soustavy střed ozvučnice, tak i při 70 Hz, kdy tvar směrové charakteristiky vyšel jako nejméně směrový, je rozdíl v hladině akustického tlaku ve vzdálenosti 2 m před měničem a 2 m za ústím ozvučnice přibližně 4 dB, což je poměrně velký rozdíl. Zvláště pokud je bráno v potaz to, že u reálného modelu půjde poměr intenzit mezi jednotlivými vlněními regulovat množstvím a materiálem, který je použitý k tlumení stojatého vlnění.

### 5.1.1 Vytvoření zmenšeného modelu ozvučnice

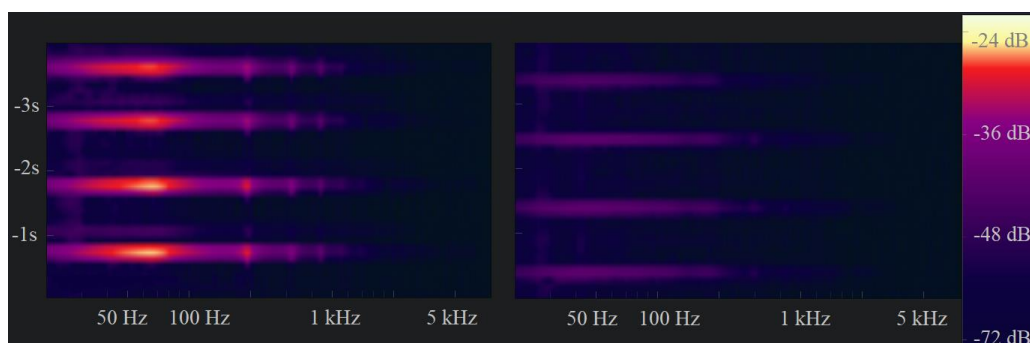
Z důvodu velké časové náročnosti výpočtu 3D modelu, která byla více než 24 hodin, byl v mezích vytvořen zjednodušený zmenšený model za použití malého 5“ středobasového měniče Dayton DS135-8. Ozvučnice byla vytvořena z PVC potrubí o

tloušťce stěny 15 mm, vnitřním průměru 125 mm a délce 135 cm. Fotografie tohoto testovacího prototypu vyobrazuje obr. 5.7



Obr. 5.7 Náhled vytvořeného zmenšeného modelu.

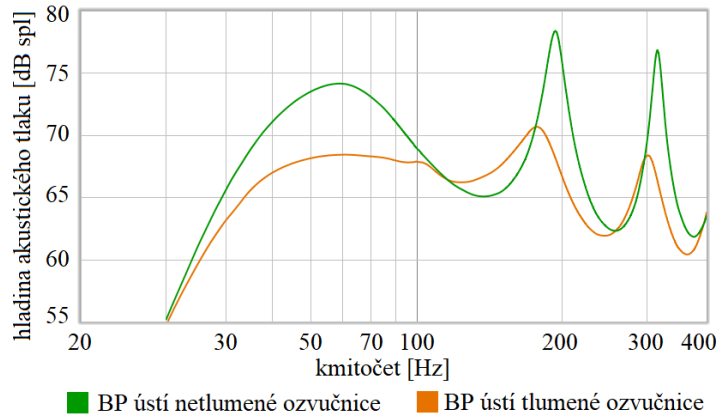
K tomuto modelu byl vytvořen jednoduchý úderník na principu kyvadla, který umožňoval opakované údery neměnnou silou do membrány reproduktoru, čímž došlo k vybuzení vzduchového sloupce. Za pomoci mikrofону, který byl umístěn u ústí ozvučnice byl následně vygenerován spektrogram. Poté bylo do konce ozvučnice vloženo tlumení v podobě PU pěny o tloušťce přibližně 16 cm a celý proces byl zopakován. Porovnání dvou takto vygenerovaných spektrogramů znázorňuje obr. 5.8.



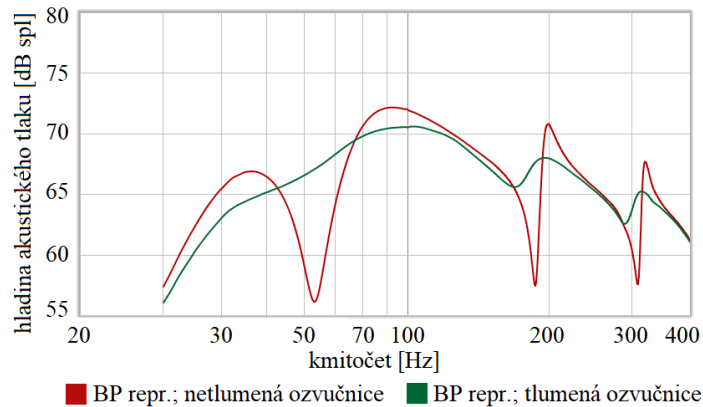
Obr. 5.8 Porovnání spektrogramů pořízených u ústí netlumené a tlumené ozvučnice.

Tento empirický pokus dobře ukázal, že při vložení tlumícího materiálu dojde k výraznému potlačení stojatého vlnění a tím způsobeného zesilování úzkých pásem kmitočtů. Dále na tomto modelu proběhlo měření kmitočtové charakteristiky v blízkém

poli před reproduktorem a v blízkém poli u ústí ozvučnice. Grafy naměřených hodnot můžeme porovnat na obr. 5.9 a obr. 5.10.



Obr. 5.9 Porovnání kmitočtové charakteristiky u ústí zmenšeného modelu ozvučnice před a po zatlumení.

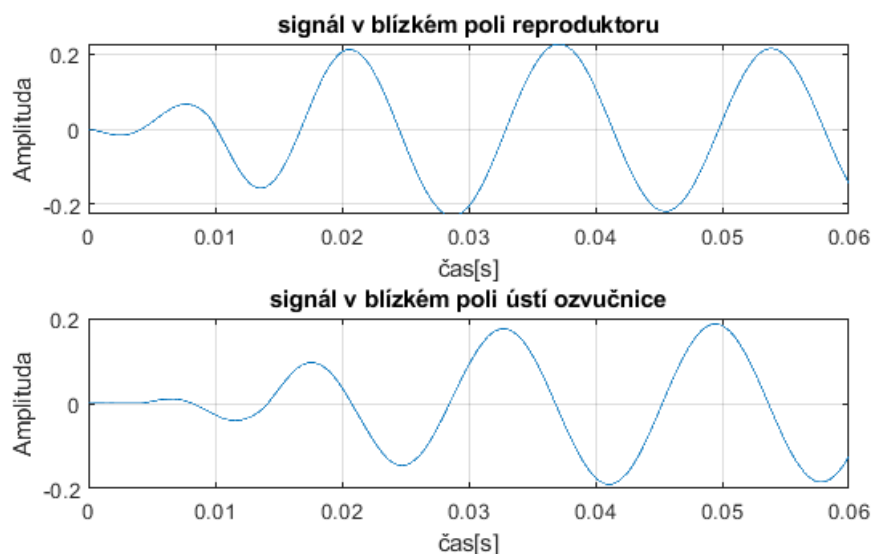


Obr. 5.10 Porovnání kmitočtové charakteristiky v blízkém poli před reproduktorem před a po zatlumení.

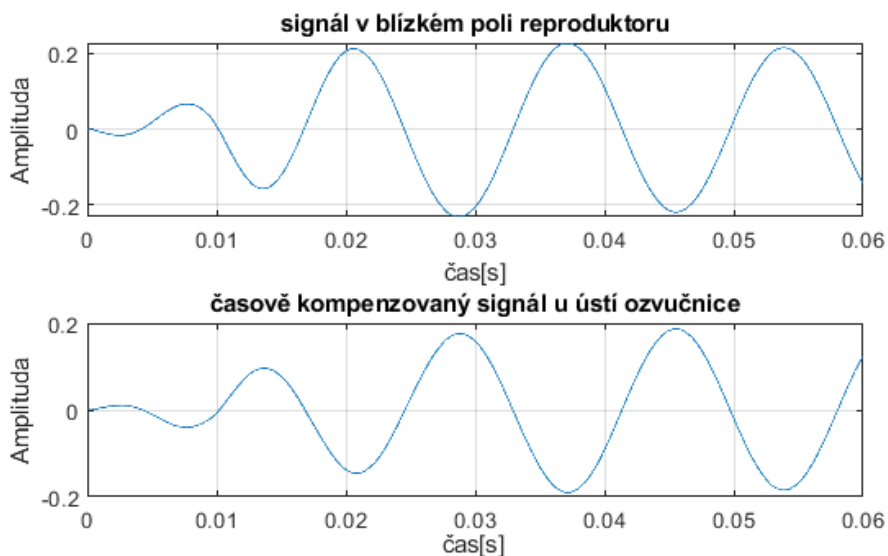
Měření bylo provedeno pomocí zvukové karty Focusrite Scarlett 2i2 3rd gen, spolu s kondenzátorovým mikrofonom MXL 991. Zpracování signálu proběhlo v programu REW. Na obou grafech je možné vidět, že přidání i relativně malého množství tlumícího materiálu do konce ozvučnice má dramatický vliv na chování celé reprosoustavy, a to nejen na kmitočtovou charakteristiku, ale i na umístění rezonančních kmitočtů, které se při tlumení posouvají do nižších hodnot.

Dalším krokem bylo ověření, zdali zvukový signál u ústí ozvučnice skutečně odpovídá zpožděnému signálu s otočenou polaritou v porovnání se zvukovým signálem před měničem. Měření proběhlo za pomoci dvou mikrofónů MXL 991 a zvukové karty Focusrite Scarlett 2i2 3rd gen. Porovnání signálů proběhlo odečtem v programu MATLAB. Toto porovnání vyobrazuje obr. 5.11. Zároveň za pomoci příkazu finddelay bylo ověřeno, že časové zpoždění mezi signálem z přední části ozvučnice a její zadní částí jsou necelé 4 ms, což je doba, kterou trvá zvukovému vlnění urazit 1,35 m, což je délka

zmenšené ozvučnice. Porovnání fází znázorňuje obr. 5.12, kde je signál u ústí časově kompenzován a lze tak dobře vidět, že signály mají vzájemně obrácenou polaritu.



Obr. 5.11 Porovnání zvukového vlnění nahraného v blízkém poli před reproduktorem a v blízkém poli u ústí ozvučnice.



Obr. 5.12 Porovnání signálů s kompenzací časového zpoždění způsobeného délkou ozvučnice.

Bohužel nemohlo být provedeno porovnání pro více tlumivých materiálů z důvodu jejich absence. Stejně tak nemohla být změřena směrová charakteristika tohoto modelu, protože pro změření těchto vlnových délek je potřeba velkého prostoru bez odrazových ploch, a to v dané době nebylo možné.

## 6. VYTVOŘENÍ OZVUČNICE VE SKUTEČNÉ VELIKOSTI

Na základě kroků uvedených v předchozí kapitole byl vytvořen prototyp směrového basového reproduktoru s ozvučnicí, jejíž parametry splňují podmínky v této kapitole stanovené. Jako materiál pro vytvoření této ozvučnice byla zvolena MDF o tloušťce 18 mm. Výjimkou je přední stěna ozvučnice, u které byla zvolena tloušťka 38 mm. Toto zesílení přední stěny bylo zvoleno s ohledem na vyšší hmotnost reproduktorového měniče, který bude v této desce umístěn. Přesný výkres jednotlivých dílů ozvučnice je přiložen v příloze C.

Jako reproduktorový měnič, který byl vybrán ke konstrukci reproduktoru v plné velikosti, byl vybrán Dayton Ultimax UM 15-22 (vyobrazen na obr. 6.1). Jedná se o reproduktor s 15“ membránou, který je schopný produkovat požadované pásmo kmitočtů, tedy přibližně od 35 Hz do 120 Hz. Zároveň je konstruován tak, že jeho závěs umožňuje značnou výchylku membrány bez toho, aby začalo vznikat harmonické zkreslení nebo aby došlo k jeho poškození při vyšších hlasitostech reprodukováného signálu v důsledku přílišné výchylky membrány. Tím, že se jedná o otevřený typ ozvučnice, byla maximální výchylka membrány jeden z hlavních parametrů výběru, protože narozdíl od uzavřených typů ozvučnic není u otevřené ozvučnice výchylka membrány tlumena vnitřním objemem vzduchu, který se u těchto ozvučnic chová jako pružina, která tento pohyb tlumí. Kompletní kmitočtová a impedanční charakteristika tohoto měniče spolu s výpisem jeho TS parametrů je přiložena v příloze D.



Obr. 6.1 Basový měnič Dayton Audio UM15-22.

Po sestavení ozvučnice do ní byl měnič nainstalován. Výsledný reproduktorový box je zobrazen na obr. 6.2. Reproduktorový box je konstruován jako pasivní, to znamená, že výkonový zesilovač je umístěn mimo ozvučnici. To umožňuje vhodnější volbu

zesilovače, jelikož u výkonnějších reproduktorů se jedná o značně rozšířenou a výhodnější variantu zapojení.



Obr. 6.2 Prototyp basového reproduktorového boxu se směrovou vyzařovací charakteristikou.

## 6.1 Měření v blízkém poli

Stejně jako v případě zmenšeného modelu ozvučnice bylo nejprve provedeno měření v blízkém poli reproduktorové membrány a u ústí zvukovodu ozvučnice.

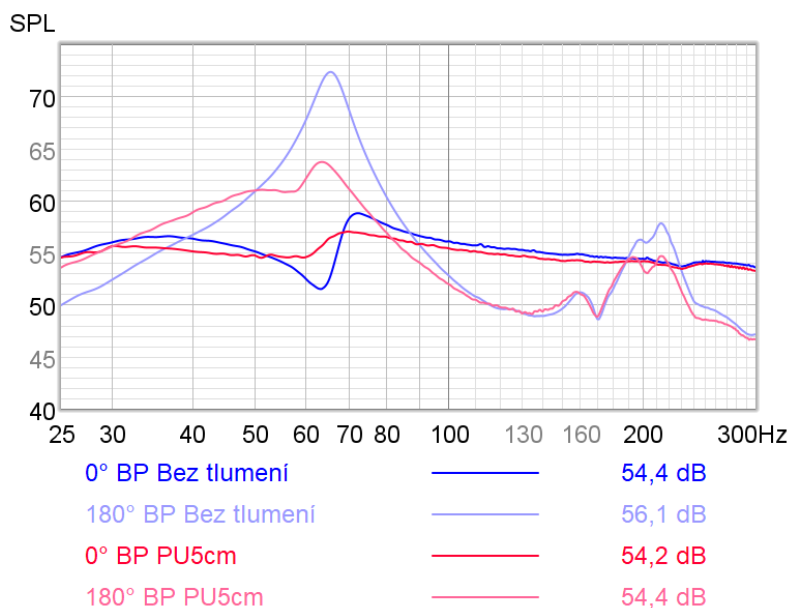
Měření bylo provedeno za použití zvukové karty Focusrite Scarlett 2i2 2nd gen, měřicího mikrofону s kulovou charakteristikou Audix TM-1 a počítačového programu REW. Jako výkonový zesilovač byl použit Mackie FRS-1700.

Nejprve bylo provedeno měření v blízkém poli bez vložení jakéhokoliv tlumení. Výsledek tohoto měření znázorňuje obr. 6.3. Lze dobře pozorovat, že podobně jako u zmenšeného modelu vzniká rezonance v důsledku stojatého vlnění v polouzavřené trubici na kmitočtu, jehož  $\frac{1}{4}$  vlnové délky odpovídá délce ozvučnice a na jeho lichém násobku. Stejně jako u zmenšeného modelu taktéž dochází ke snížení výchylky membrány v okolí rezonančního kmitočtu. Zvlnění v okolí druhého rezonančního kmitočtu (v okolí 200 Hz) je způsobeno vnitřními rozměry ozvučnice. Další varianta, která je znázorněna na obr. 6.3 ukazuje měření na stejných pozicích, pouze s rozdílem, že do ústí ozvučnice bylo vloženo 5 cm polyuretanové pěny. Lze dobře pozorovat, že dochází k mírnému zatlumení rezonancí na obou rezonančních kmitočtech, kdy se s vyšším tlumením oba z těchto kmitočtů posouvají do nižších pásem.

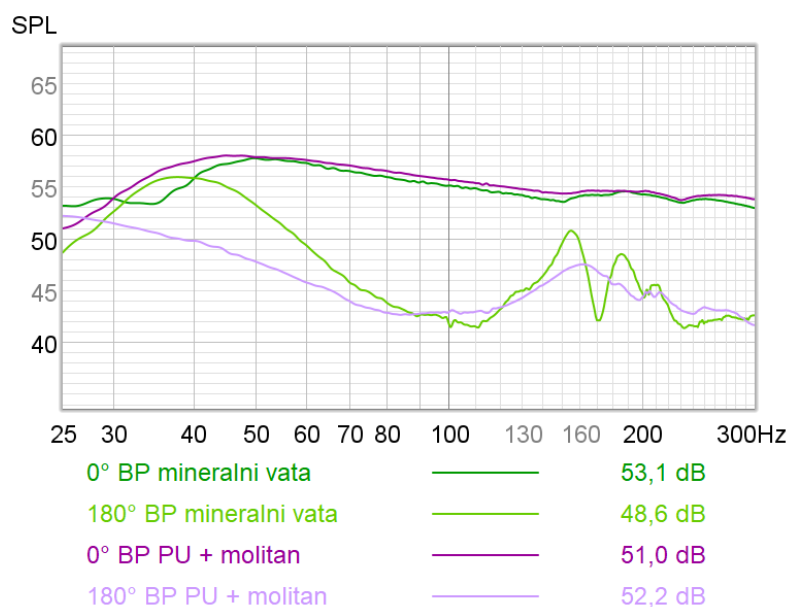
Dalším krokem bylo vložení většího množství tlumícího materiálu, z důvodu zesílení útlumu vznikuvšího stojatého vlnění. Byla použita 15 cm silná vrstva polyuretanové



pěny doplněná o 4 cm pojeného molitanu v jedné variantě a 10 cm minerální vlny ve variantě druhé. Měření v blízkém poli obou těchto variant znázorňuje obr. 6.4. Je patrné, že dochází k důraznému omezení vzniku rezonance, a zároveň k jejímu výraznému posunutí do nižších kmitočtů, konkrétně na polohu 38 Hz v případě tlumení minerální vlnou a méně než 25 Hz v případě tlumení polyuretanovou pěnou a molitanem. Kombinace pěny a molitanu se tak z těchto provedených konfigurací jeví jako nejefektivnější tlumící medium.



Obr. 6.3 Měření kmitočtové charakteristiky v blízkém poli membrány a ústí netlumené a mírně tlumené ozvučnice.

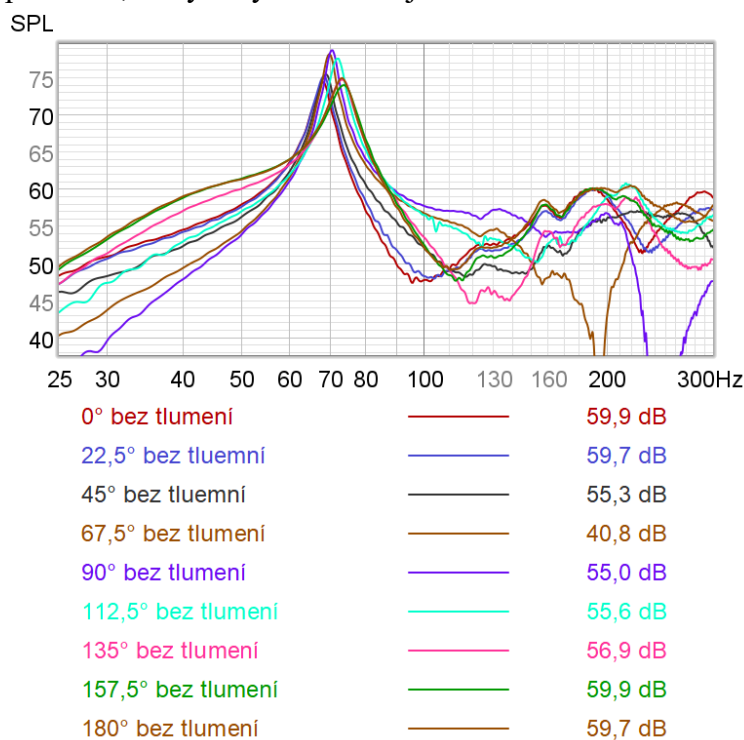


Obr. 6.4 Měření kmitočtové charakteristiky v blízkém poli membrány a ústí tlumeného minerální vatou a PU pěnou.

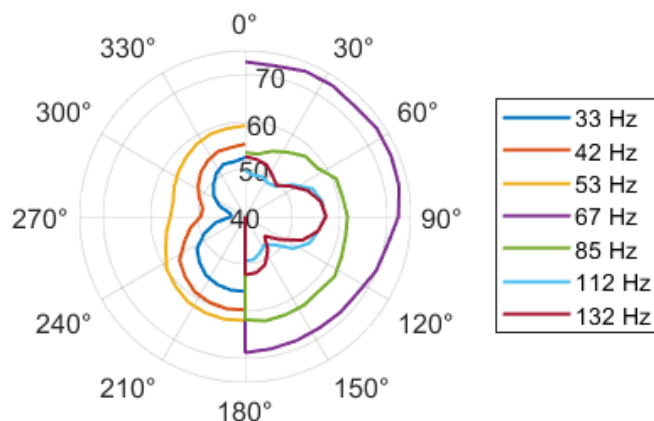
## 6.2 Měření ve vzdáleném poli

Posledním krokem bylo provedení měření kmitočtové a směrové charakteristiky ve volném poli. Měřicí řetězec byl v tomto případě stejný jako v případě kmitočtové charakteristiky v blízkém poli. Měření bylo prováděno na sportovním stadionu v dostatečné vzdálenosti od nejbližších odrazových ploch. Reprodukční box byl umístěn na zemi, kdy jednotlivé polohy mikrofonu byly taktéž těsně nad zemí. Tímto způsobem byl eliminován rušivý vliv potenciálních odrazů od země na výsledky měření. Vzdálenost mikrofonu od akustického středu reproduktorového boxu byla zvolena 3 m, kdy byla provedena měření pro 17 různých úhlů umístěných na půlkružnici kolem reproduktorového boxu, kdy krok mezi jednotlivými měřeními činil 11,25°.

Jako první varianta byla změřena varianta bez vloženého tlumení. Kmitočtová charakteristika pro každé liché měření je zobrazena na obr. 6.5. Dále byla odečtena hladina akustického tlaku z každého měření pro 7 různých kmitočtů. Tyto hodnoty byly následně vykresleny do grafu směrové charakteristiky na obr. 6.6. Z grafu směrových charakteristik je zajímavé zjištění, že pod rezonančním kmitočtem má reproduktorový box osmičkovou směrovou charakteristiku směřující před a za reproduktorový box, v okolí rezonančního kmitočtu se jeho charakteristika blíží kulové charakteristice a nad ním se opět tvaruje do osmičkové charakteristiky, avšak nyní namířenu do stran, doplněnou o postranní laloky. Toto tvarování směrové charakteristiky je způsobeno zčásti změnou poměru intenzit zvukového vlnění pocházejícího z membrány a z ústí ozvučnice a z části fázovým posunem, který díky vzniku stojatého vlnění nastává.

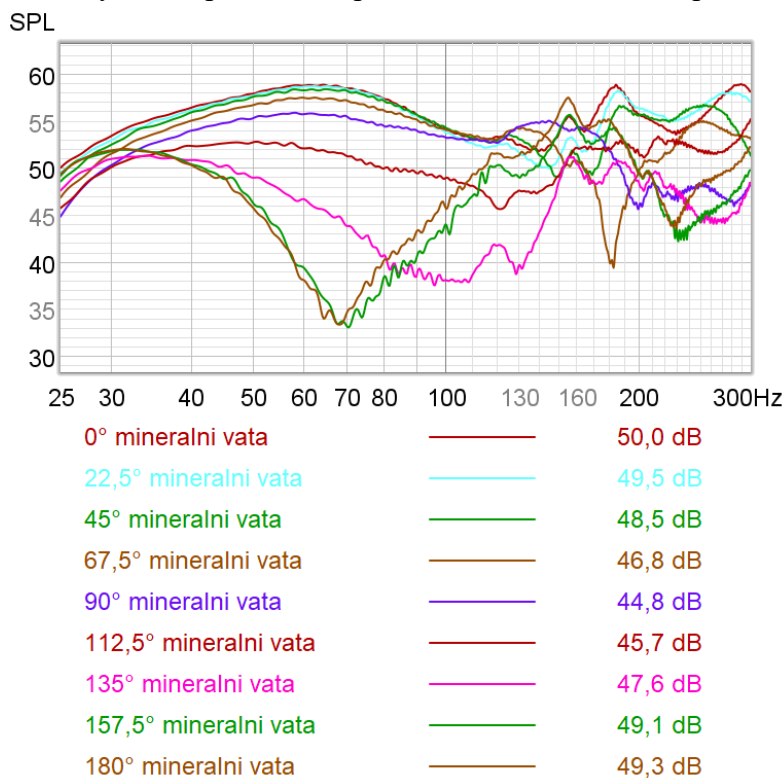


Obr. 6.5 měření kmitočtové charakteristiky pro netlumenou ozvučnici ve vzdáleném poli.

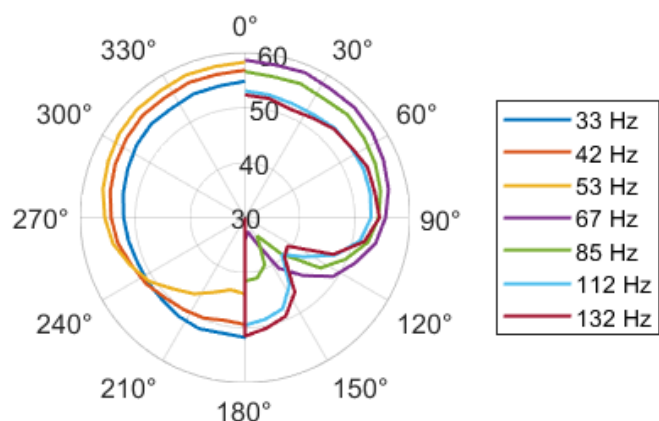


Obr. 6.6 Směrová charakteristika pro 7 různých kmitočtů netlumené ozvučnice.

Další měřenou variantou byla ta, kde bylo do ústí ozvučnice vloženo tlumení v podobě minerální vlny. Obr. 6.7 zobrazuje kmitočtovou závislost ve stejných bodech jako v případě měření netlumené ozvučnice, obr. 6.8 zobrazuje tvar výsledné směrové charakteristiky. Z obou grafů je dobře čitelné, že dochází oproti netlumené ozvučnici ke znatelnému tvarování směrové charakteristiky, která přechází ze subkardioidní charakteristiky na nejnižších kmitočtech (33 Hz, 42 Hz) přes kardioidní charakteristiku (53 Hz, 67 Hz, 85 Hz) až po hyperkardioidní charakteristiku (více než 85 Hz). Dá se tedy potvrdit, že v celém požadovaném pásmu 35 Hz do 110 Hz má reproduktorový box směrové vyzařování, kdy rozdíl před a za reproduktorem činí od 4 dB po 25 dB.

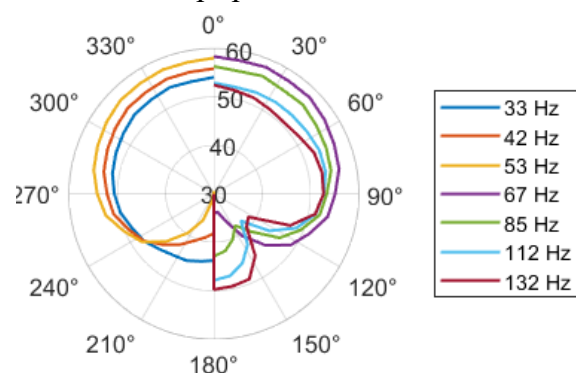


Obr. 6.7 měření kmitočtové charakteristiky pro ozvučnici tlumenou minerální vlnou.

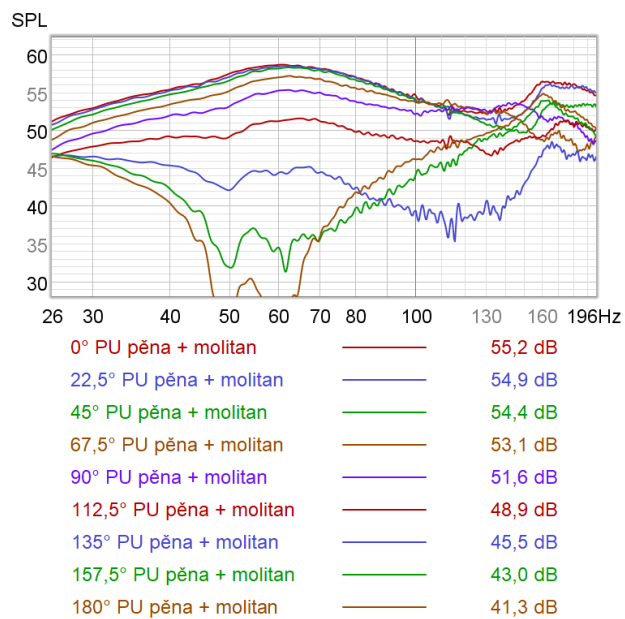


Obr. 6.8 Směrová charakteristika pro 7 různých kmitočtů ozvučnice tlumené minerální vatou.

Poslední měřenou variantou byla ozvučnice tlumená kombinací polyuretanové pěny a pojeného molitanu, která se při změření kmitočtové charakteristiky v blízkém poli ukázala jako nejefektivnější při potlačení vzniku stojatého vlnění. Obr. 6.10 zobrazuje výsledky měření kmitočtové charakteristiky pod jednotlivými úhly od směřování reproduktorového boxu, obr. 6.9 znázorňuje směrovou charakteristiku pro 7 různých kmitočtů. Je patrné, že oproti tlumení minerální vatou došlo k rozšíření kmitočtového pásma, v němž dochází ke vzniku čisté kardioidní charakteristiky a k celkovému navýšení směrovosti vyzařování reproduktorového boxu v celém požadovaném pásmu od 35 Hz do 110 Hz, kdy rozdíl mezi přední a zadní částí nabývá od 6 dB po 32 dB. K rozdílu většímu než 12 dB dochází v pásmu od 35 Hz do 85 Hz. Kmitočtová charakteristika tak má kardioidní tvar přes většinu požadovaného pásma, kdy se na nižší hranici začíná formovat do subkardiody a na vyšší hranici do tvaru hyperkardiody, ovšem při zachování znatelné směrovosti i v hraničních případech.



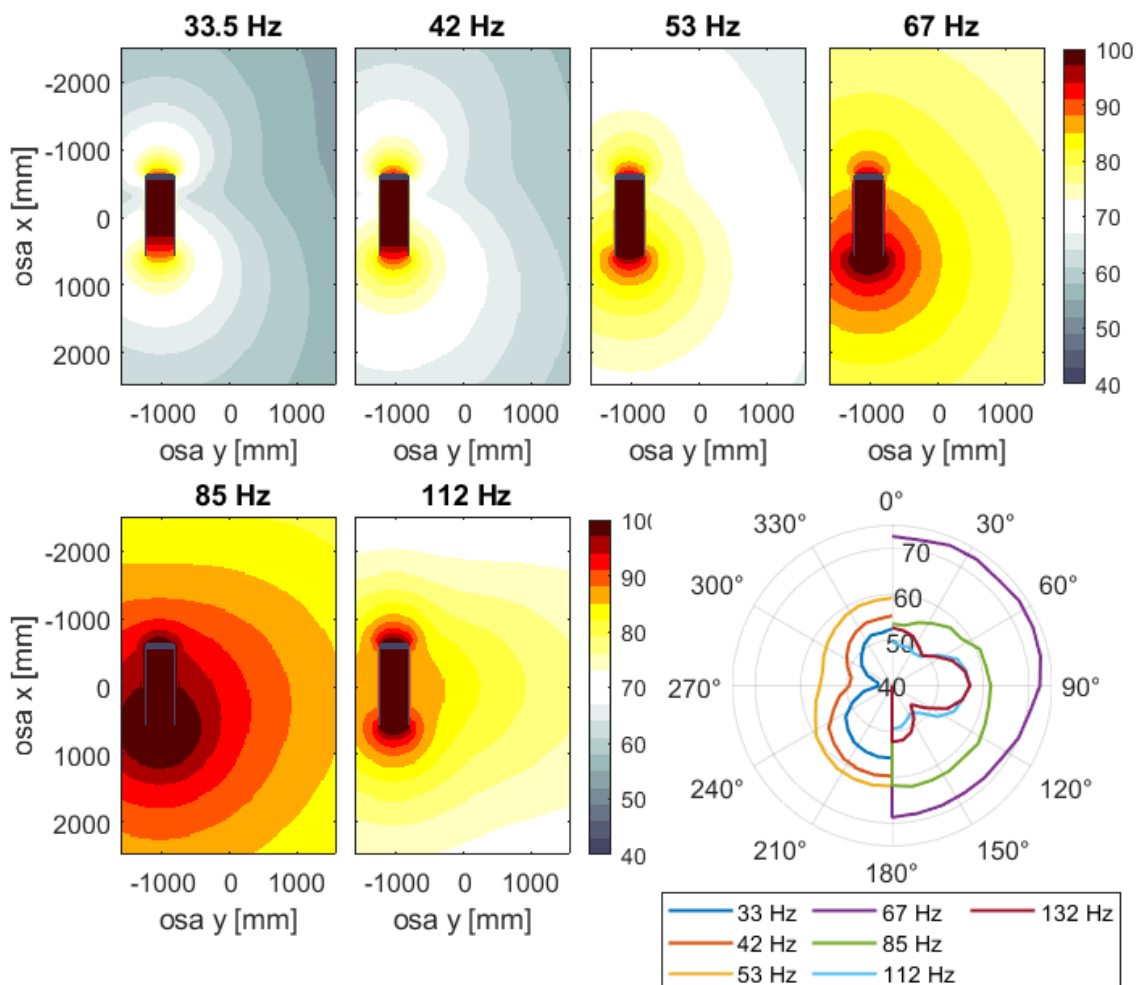
Obr. 6.9 Směrová charakteristika pro 7 různých kmitočtů ozvučnice tlumené kombinací polyuretanové pěny a molitanu.



Obr. 6.10 Měření kmitočtové charakteristiky pro ozvučnici tlumenou kombinací polyuretanové pěny a pojeného molitanu.

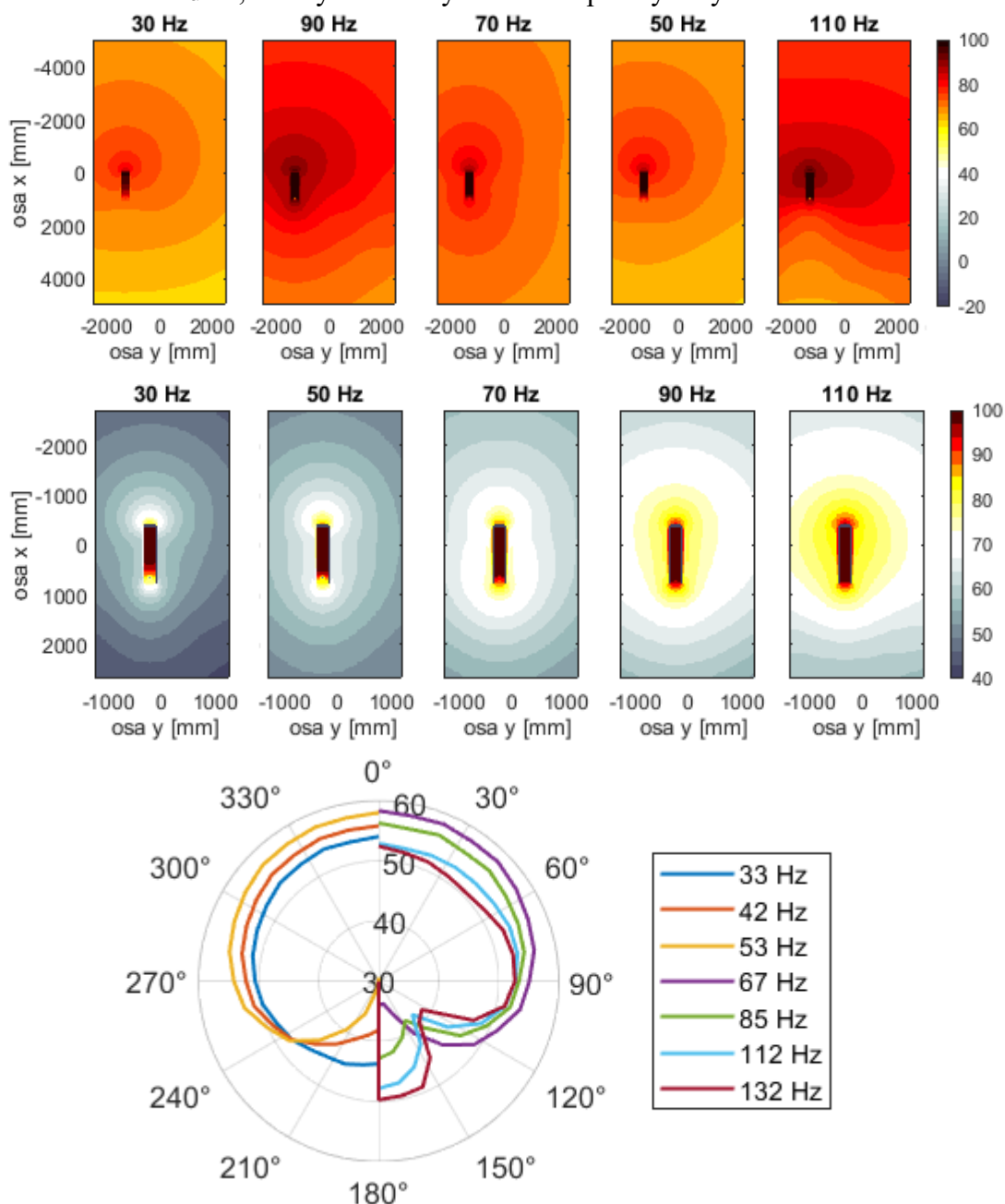
## 7. POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ S VÝSLEDKY SIMULACÍ

Na závěr proběhlo porovnání výsledků simulací se skutečnými naměřenými hodnotami. Ve variantě bez vloženého tlumení se výsledky výpočtů poměrně shodují se skutečnými naměřenými hodnotami. Toto porovnání zobrazuje o. 7.1. Je patrné, že tvar vypočítaných a naměřených směrových charakteristik se shoduje. Mezi skutečnými a vypočítanými hodnotami jsou ovšem rozdíly, především mezi rozdílem hladin akustických tlaků pod úhly, kde nabývají minimálních hodnot a pod úhly, kde nabývají maximálních hodnot. Zatím co ve skutečnosti jsou tyto rozdíly přesahující 9 dB, ve vypočtených případech jsou pouze kolem 4 dB. To může být způsobeno tím, že zdroj zvukového vlnění má předem danou intenzitu signálu, který bude produkovat. V reálném případě se intenzita signálu produkovaného membránou liší v závislosti na míře vnitřních rezonancí ve zvukovodu.



Obr. 7.1 Porovnání vypočítaných a naměřených směrových charakteristik pro ozvučnici bez vložení tlumícího materiálu.

V případě, kdy byl vložen tlumící materiál, jsou mezi výsledky poměrně znatelné rozdíly, viz o. 7.2. V tomto případě se s realitou více shodují výsledky z výpočtů prováděných ve 2D, nežli ve 3D. Tyto rozdíly mezi výpočty a skutečnými naměřenými hodnotami budou pravděpodobně způsobeny neschopností algoritmu počítat s tlumícím materiálem porézního charakteru, kdy bylo tlumení nahrazeno materiálem s nastavenými nereálnými vlastnostmi (tak jak je popsáno v kapitole 5). To mohlo způsobit odchylky matematického modelu, což by teoreticky vedlo k nepřesným výsledkům.



Obr. 7.2 Porovnání vypočítaných a naměřených směrových charakteristik pro ozvučnici s vloženým tlumícím materiálem.

## ZÁVĚR

Byl úspěšně vytvořen návrh ozvučnice, která by měla být efektivní v reprodukci kmitočtů od 35 Hz do 110 Hz. Tato ozvučnice funguje na principu gradientního uspořádání zkombinovaného s ozvučnicí typu transmission-line, čímž dosahuje směrové charakteristiky na nízkých kmitočtech. Virtuální model této ozvučnice byl vytvořen a vyzkoušen za pomoci metody FDTD v programu MATLAB za pomoci sady nástrojů K-wave.

Paralelně s probíhajícími výpočty byla vytvořena zmenšená verze ozvučnice, kde byla změřena kmitočtová charakteristika v blízkém poli před membránou reproduktoru a v blízkém poli u ústí zvukovodu. Dále bylo provedeno porovnání fázových posunů mezi oběma signály. Tyto naměřené hodnoty podporují teoretickou funkčnost tohoto konceptu.

Po potvrzení teorie na praktickém modelu byla vytvořena ozvučnice ve velikosti odpovídající běžnému použití, která byla osazena 15“ reproduktorem určeným k reprodukci nízkých kmitočtů. U tohoto modelu bylo následně provedeno měření v blízkém poli, kde byly pozorovány podobné vlastnosti jako u zmenšeného modelu, tedy vznik rezonancí v důsledku stojatého vlnění a jejich efektivní potlačení vložením absorpčního materiálu do ústí ozvučnice.

V poslední fázi bylo provedeno měření ve vzdálenosti 3 m od akustického středu ozvučnice. Toto měření potvrdilo, že bylo dosaženo znatelné směrovosti při vložení tlumícího materiálu do ústí ozvučnice, kdy nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití kombinace polyuretanové pěny a pojeného molitanu. Při této konfiguraci bylo dosaženo rozdílu hladin akustických tlaků v přední a zadní části reproduktoru více než 12 dB v pásmu od 35 Hz do 85 Hz a více než 6 dB v pásmu od 28 Hz do 110 Hz.

Na závěr bylo provedeno porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočítanými. Bylo zjištěno, že výpočty jsou relevantní především pro situaci bez vložení tlumícího materiálu, kdy byla pozorována shoda tvaru směrových charakteristik. Bohužel pro situaci s vloženým tlumením se výsledky poměrně liší, což může být způsobeno především tím, že algoritmus nástroje k-wave neumožňuje počítat s útlumem zvukového vlnění vlivem porézních materiálů.



## LITERATURA

- [1] ScienceDirect. ScienceDirect [online]. Copyright © [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sound-velocity>.
- [2] Bies, D.A.; HANSEN C.H. (2009). *Engineering Noise Control - Theory and Practice, 4th Edition*. New York: CRC Press. ISBN 978-0-415-48707-8.
- [3] SCHIMMEL, J.: *AKP Akustika prostorů*, Studijní text k předmětu Akustika prostorů, Brno, VUT, 2019.
- [4] SCHIMMEL, J.: *EL2 Elektroakustika 2*, Studijní text k předmětu Elektroakustika 2, Brno, VUT, 2019.
- [5] KAPOOR, Rohan, Subramanian RAMASAMY, Alessandro GARDI, Ron SCHYNDEL a Roberto SABATINI. *Acoustic Sensors for Air and Surface Navigation Applications*. *Sensors [online]*. 2018, 18(2) [cit. 2021-11-30]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: [doi:10.3390/s18020499](https://doi.org/10.3390/s18020499).
- [6] DICKASON, Vance. *Loudspeaker design cookbook* Peterborough: Audio Amateur Press, 2006. ISBN 1-882580-47-8.
- [7] HILL, Geoff. *Loudspeaker modelling and design: a practical introduction*. New York: Routledge, 2019. ISBN 9780815361336.
- [8] *Sealed enclosure explained in detail and calculator - Audio Judgement. It's all about sound and audio systems | Audiojudgement.com [online]*. Dostupné z: <https://audiojudgement.com/sealed-enclosure-closed-box/>
- [9] *Chora 806 - Bookshelf loudspeaker - Focal | Focal. Homepage | Focal [online]*. Copyright © 2017 [cit. 04.12.2021]. Dostupné z: <https://www.focal.com/en/home-audio/high-fidelity-speakers/chora/chora-806>
- [10] *Funktion-One | Home [online]*. Copyright © [cit. 04.12.2021]. Dostupné z: [https://www.funktion-one.com/dl/files/F132A\\_2017.pdf](https://www.funktion-one.com/dl/files/F132A_2017.pdf)
- [11] MCCARTHY, Bob. *Sound systems: design and optimization: modern techniques and tools for sound system design and alignment. Third edition*. New York: Focal press, Taylor & Francis group, 2016. ISBN 978-0-415-73099-0.
- [12] *k-Wave: A MATLAB toolbox for the time domain simulation of acoustic wave fields [online]*. Copyright © [cit. 04.12.2021]. Dostupné z: [http://www.k-wave.org/manual/k-wave\\_user\\_manual\\_1.1.pdf](http://www.k-wave.org/manual/k-wave_user_manual_1.1.pdf)
- [13] KOWALCZYK, Konrad a Maarten VAN WALSTIJN. *Room Acoustics Simulation Using 3-D Compact Explicit FDTD Schemes*. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing [online]*. 2011, 19(1), 34-46 [cit. 2021-12-05]. ISSN 1558-7916. Dostupné z: [doi:10.1109/TASL.2010.2045179](https://doi.org/10.1109/TASL.2010.2045179)

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
BR	Bass-Reflex
EF	End-Fire
FDTD	Finite Diference Time Domain
SLF	Standart Leapfrog
RLF	Rotated Leapfrog
IDWM	Interpolated Digital Waveguide Mesh
IISO	Interpolated isotropic
IWB	Interpolated Wideband
TL	Transmission-Line
TM	Thomas Mundorf
VUT	Vysoké učení technické v Brně

## Symbolsy:

$c, c_0$	Rychlost zvuku	( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$C_{ms}$	Mechanická poddajnost	( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$d$	Vzdálenost zvukových zdrojů	( $\text{m}$ )
$f$	Kmitočet	( $\text{Hz}$ )
$F_s; f_s$	Rezonanční kmitočet	( $\text{Hz}$ )
$I$	Proud	( $\text{A}$ )
$k$	Vlnové číslo	( $\text{m}^{-1}$ )
$L_p$	Hladina akustického tlaku	( $\text{dB}$ )
$M_{ms}$	Celková hmotnost v pohybu	( $\text{kg}$ )
$p, p_0$	Akustický tlak	( $\text{Pa}$ )
$r_m$	Mezní vzdálenost od zářiče	( $\text{m}$ )
$r_{mv}$	Vyzařovací impedance membrány	( $\Omega$ )
$m_{mv}$	Vyzařovací impedance membrány	( $\Omega$ )
$Q_{ms}$	Mechanický činitel jakosti	(-)
$Q_{es}$	Elektrický činitel jakosti	(-)
$Q_{ts}$	Celkový činitel jakosti	(-)
$R$	Poloměr membrány	( $\text{m}$ )
$R_e$	Stejnoseměrný odpor cívky	( $\Omega$ )
$R_{ms}$	Mechanický odpor	( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-5}$ )
$S_d$	Ekvivalentní plocha membrány	( $\text{m}^2$ )
$t$	Teplota vzduchu	( $^{\circ}\text{C}$ )
$T$	Délka periody	( $\text{s}$ )

$T_m$	BL faktor	(T.m)
$\mathbf{u}$	Akustická rychlost částic	(m. s <sup>-1</sup> )
$U$	Napětí	(V)
$V_{as}$	Ekvivalentní objem vzduchu	(m <sup>3</sup> )
$\alpha$	Absorpční koeficient	(Np.m <sup>-1</sup> )
$\lambda$	Vlnová délka	(m)
$\eta$	Poměr akustických tlaků	(-)
$\rho$	Hustota, akustická hustota	(kg. m <sup>3</sup> )
$\rho_0$	Ambientní hustota prostředí	(kg. m <sup>3</sup> )
$\varphi_1, \varphi_2$	Úhel	(°)
$\tau$	Časové zpoždění	(s)

## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - POSTUP PRO ZÍSKÁNÍ SADY NÁSTROJŮ K-WAVE PRO MATLAB .....</b>	<b>61</b>
<b>PŘÍLOHA B - KÓD PRO 3D SIMULACE V PROGRAMU MATLAB .....</b>	<b>62</b>
<b>PŘÍLOHA C - VÝKRESY KARDIOIDNÍ BASOVÉ OZVUČNICE .....</b>	<b>66</b>
<b>PŘÍLOHA D - PARAMETRY REPRODUKTORU DAYTON AUDIO ULTIMAX UM15-22 .....</b>	<b>69</b>

## **Příloha A - Postup pro získání sady nástrojů K-wave pro MATLAB**

Na oficiálních webových stránkách tvůrců K-wave „<http://www.k-wave.org/download.php>“ je nutné provést registraci. Pod poli určenými k přihlašování se stiskne tlačítko „register“. To uživatele přenesne na stránku, kde je nutné vyplnit osobní údaje. Po jejich vyplnění a potvrzení registrace tlačítkem „register“ je uživateli zaslán potvrzovací email s jeho přihlašovacími údaji. Po použití těchto údajů k přihlášení je možné stáhnout sadu nástrojů ve formátu .zip.

Po stažení je možné provést instalaci.

- 1) Uživatel rozbalí .zip soubor a soubory přesune do příslušné složky:  
C:\Program Files\MATLAB\...používaná verze MATLABu...\toolbox\k-Wave
- 2) Přidání složky obsahující nástroj do seznamu cest v programu MATLAB.  
Zadáním příkazu „pathtool“ do příkazového řádku se otevře okno pro procházení souborů, v něm je vybrána příslušná složka a stiskem tlačítka „Add Folder...“ je sada nástrojů nainstalována.
- 3) Na závěr je potřeba provést restart programu MATLAB

## Příloha B - Kód pro 3D simulace v programu MATLAB

```
%ŠIMON SKVARIL - SEMESTRÁLNÍ PRÁCE
% !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
% TENTO KÓD POŽÍVÁ SADU NÁSTROJŮ (TOOLBOX) K-WAVE, BEZ JEHO INSTALACE
JE NEFUNKČNÍ
%!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
clearvars;
%for f=30:20:110 %cyklus který zopakuje výpočet pro více kmitočtů, nyní
je
%vypnut
%
=====
===
% simulace
%
=====
===

% create the computational grid
Nx = 216;           % počet bodů v ose x
Ny = 108;          % počet bodů v ose y
Nz = 44;           % počet bodů v ose z
dx = 0.025;        % rozlišení výpočetního pole / velikost bodů v
ose x[m]
dy = 0.025;        % rozlišení výpočetního pole / velikost bodů v
ose y[m]
dz = 0.025;        % rozlišení výpočetního pole / velikost bodů v
ose z[m]
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy, Nz, dz); %příkaz pro vytvoření
výpočetního pole na základě výše uvedených parametrů
% PRO VÝPOČTY VE 2D JE POTŘEBA VE VŠECH POLÍCH, KDE SE ZADÁVAJÍ PARAMETRY
SOUŘADNIC ODEBRAT HODNOTY PRO OSU Z
t_end=0.025;       % nastavení konce výpočtu simulace [s]

%definování zdrojového signálu
source_freq = 40;   % [Hz]
source_mag = 5;     % [Pa]

simspeed=0.1;      % rychlost simulace, maximální doporučená hodnota je
0.3,
% čím vyšší rychlost tím vyšší šance na nestabilitu
výpočtu

% nastavení vlastnosti media
% protože ke každému bodu lze přiřadit vlastní parametry, je nutné
vytvořit
% mřížku o stejných rozměrech jako mřížky vypočetní pro každou vlastnost
c0=344;           % [m/s]
rho0=1.29;        % [kg/m^3]
medium.sound_speed = c0 * ones(Nx, Ny, Nz);
medium.density = rho0 * ones(Nx, Ny, Nz);
% přiřazení referenční rychlosti zvuku
medium.sound_speed_ref = c0;
```

```

% vytvoření ozvučnice
% nejprve se vytvoří mřížka obsahující samé 0, a potom se u konkrétních
% bodů "zapne" hodnota na 1, v těchto bodech budou následně změněny
vlastnosti
% hustoty a rychlosti zvuku
    absorber_mask = zeros(Nx, Ny, Nz);
    speaker_mask=zeros(Nx, Ny, Nz);

%   odkomentováním řádku níže se přidá absorber
        %absorber_mask(135,45, Nz/2-3:Nz/2+3) = 1;

%       % přední stěna reproduktoru
speaker_mask(94,40:50, Nz/2-5:Nz/2+5) = 1;
%       % levá stěna reproduktoru
speaker_mask(94:140,40, Nz/2-5:Nz/2+5) = 1;
%       % pravá stěna reproduktoru
speaker_mask(94:140,50, Nz/2-5:Nz/2+5) = 1;
%       % spodní stěna reproduktoru
speaker_mask(94:140,40:50, Nz/2-5) = 1;
%       % horní stěna reproduktoru
speaker_mask(94:140,40:50, Nz/2+5) = 1;

%   definování zdrojů zvuku, jde o membránu generující dva signály v
%   protifázi. Jeden těsně před přední stenou ozvučnice, druhý těsně za
%   přední stěnou ozvučnice
    source.p_mask = zeros(Nx, Ny, Nz);
    source.p_mask(3+90, 11+30:19+30, Nz/2-4:Nz/2+4) = 1;
    source.p_mask(5+90, 11+30:19+30, Nz/2-4:Nz/2+4) = 1;

%   přiřazení vlastností jednotlivým bodům, které jsou součástí ozvučnice
%   a absorberu, u toho je potřeba odkomentovat jemu přiřazené řádky
    % medium.alpha_coeff = 0*ones(Nx, Ny, Nz);
    % medium.alpha_power = 0;
    % medium.alpha_coeff(absorber_mask == 1) = alfax;
    % medium.sound_speed(absorber_mask == 1) = 0.5; %[m/s]

    medium.sound_speed(speaker_mask == 1) = 8*c0;
    medium.density(speaker_mask == 1) = 800*rho0;

% vytvoření časové řady
kgrid.t_array = makeTime(kgrid, medium.sound_speed, simspeed, t_end);

%vytvoření harmonického signálu
sA = source_mag * sin(2 * pi * source_freq * kgrid.t_array);
sB = source_mag * sin(2 * pi * source_freq * kgrid.t_array+pi);
%pokud je umístěno více výpočetních signálů, je potřeba přiřadit každému
%bodů zdroje přiřadit signál zvlášť. To se udělá vytvořením matice, kdy
%každý řádek matice odpovídá jednomu bodu. K-wave přiřazuje signál
nejprve
%bodů s nejnižší souřadnicí v ose x y a z, a potom postupuje na
následující
% pole v ose x, poté v ose y a pak v ose z.

```

```

%vytvoření signální matice
signal_A=[sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;
sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;
B;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;
;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;
sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;
B;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;
;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;sA;sB;
sA;sB];

%přiřazení matice zdrojovému signálu
source.p=signal_A;

% vytvoření bodů, které budou zobrazovány při výpočtu a ve výsledcích
jako
% ozvučnice
display_mask = source.p_mask+speaker_mask;

% vytvoření mřížky senzorů, lze vytvořit i například pouze jeden bod,
ale
% protože cílem je výsledná hladina akustického tlaku v prostoru, jsou
% aktivovány všechny. Vytvoření proběhlo přes zadání protilehlých rohů
% kvádru
sensor.mask = [1, 1, 1, Nx, Ny, Nz].';

% zadání parametru, který mají body senzoru zaznamenat
sensor.record = {'p_rms'};

% přiřazení dodatečných parametrů k výpočtu.
% konkrétně, které body budou zobrazeny "předměty; jestli je PML vrstva
% zahrnuta do výpočtového prostoru, nebo jestli je až za jeho hranicí
(v
% tomto případě je až za jeho hranicí) a jestli má být PML vrstva
% vykreslena (nemá)
input_args = {'DisplayMask',display_mask, 'PMLInside', false, 'PlotPML',
false};

% spuštění simulace
sensor_data = kspaceFirstOrder3D(kgrid, medium, source, sensor,
input_args{:});

%
=====
===
% Vykreslení výsledků
%
=====
===

% přidání bodů ozvučnice do vykresleného pole tak, že je výsledkům v
těchto
% bodech přiřazena extrémně nízká hodnota (výsledky výpočtů jsou v těchto
% bodech přepsány) čímž se vykreslí jako brava nejnižší hodnoty stupnice
sensor_data.p_rms(display_mask ~= 0) = 0.001;

figure;
subplot(1,1,1);

```

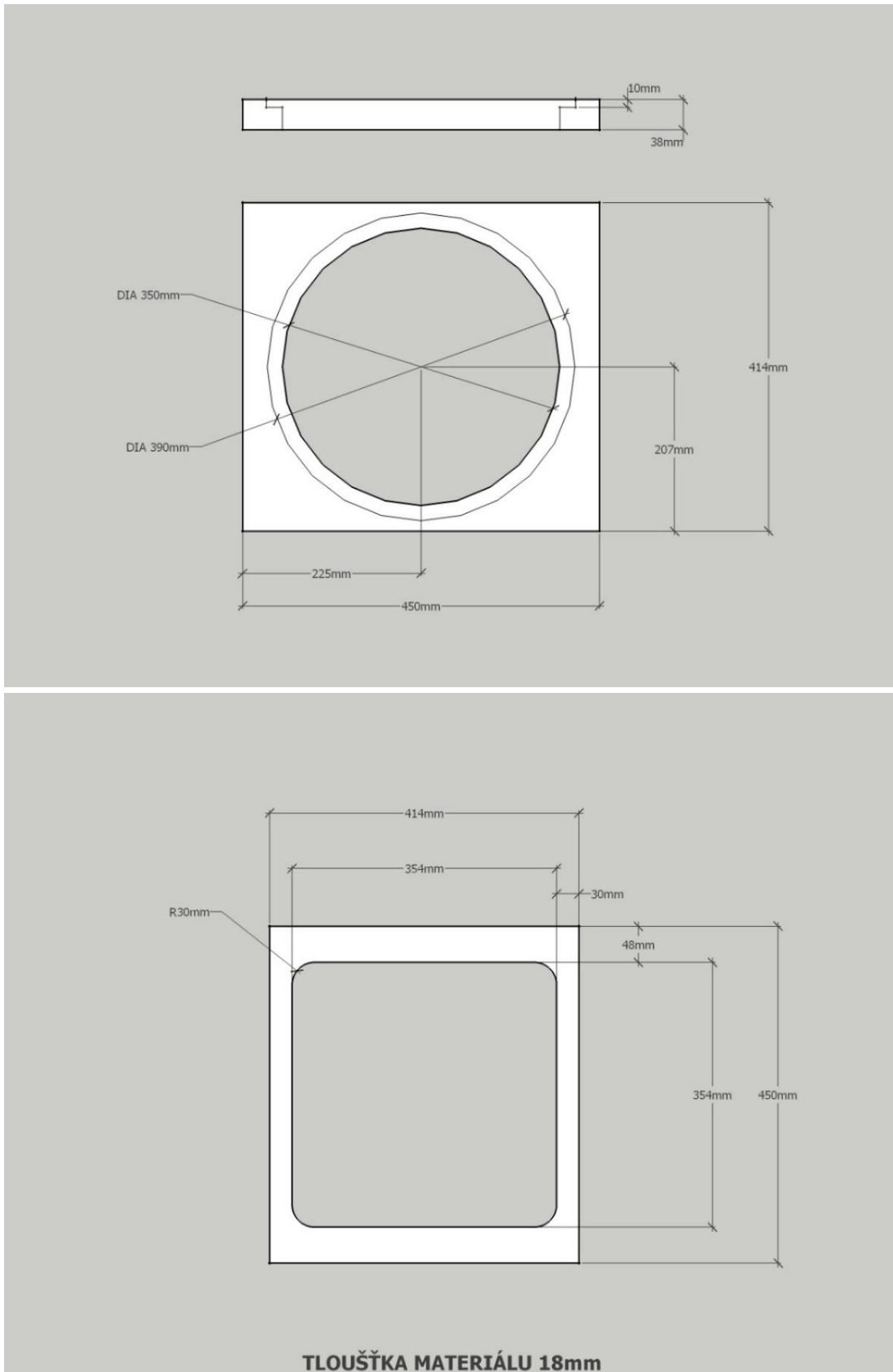


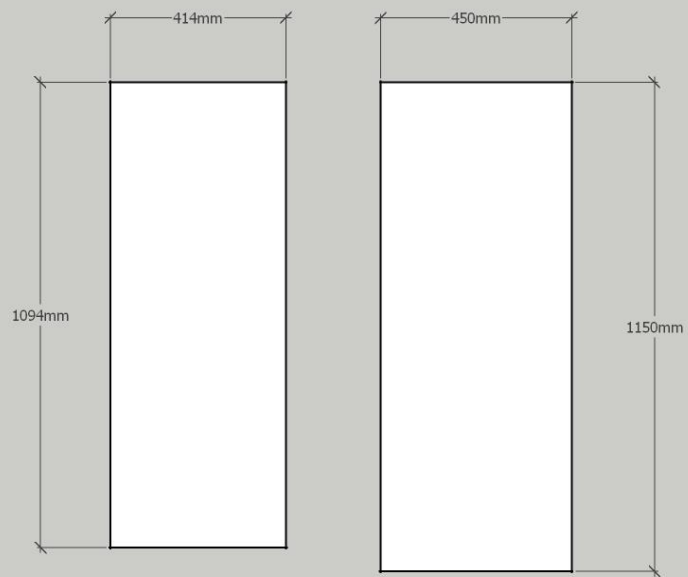
```

% výsledky jsou uloženy v Pa, proto při vykreslení probíhá jejich převod
do
% dBspl
imagesc(kgrid.y_vec * 1e3, kgrid.x_vec * 1e3,
20*log10(sensor_data.p_rms(1:Nx, 1:Ny, Nz/2)/(2*10^-5)), [40 100]);
colormap(getColorMap(20));
colorbar;
ylabel('osa x [mm]');
xlabel('osa y [mm]');
axis image;
title({
    [ num2str(source_freq) ' Hz']
});
scaleFig(1, 2);
% end

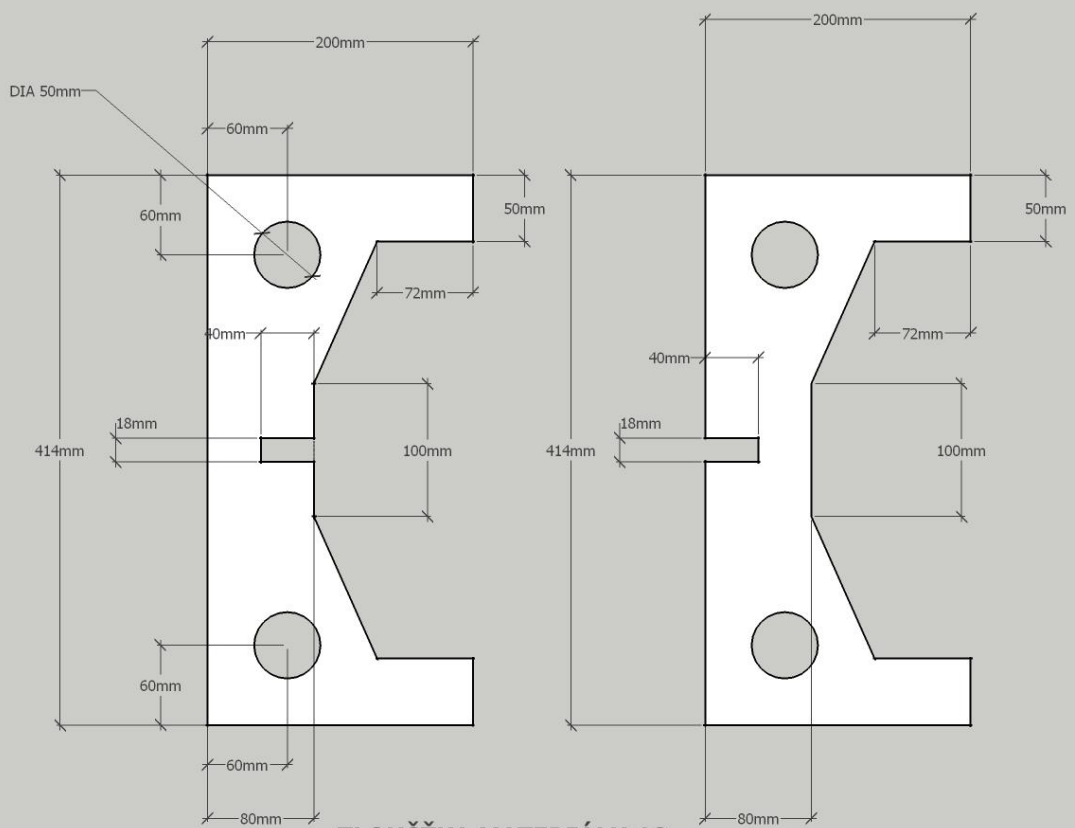
```

## Příloha C - Výkresy kardioidní basové ozvučnice

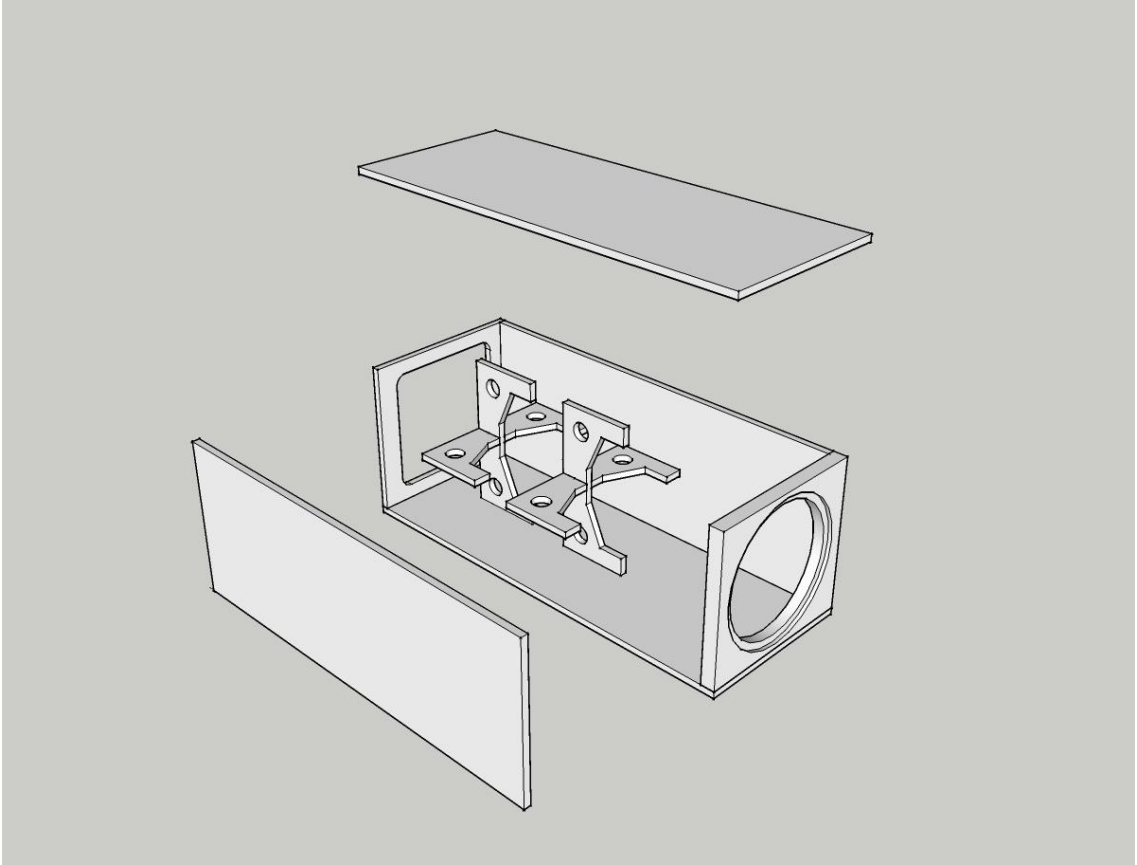




**TLOUŠŤKA MATERIÁLU 18mm**



**TLOUŠŤKA MATERIÁLU 18mm**

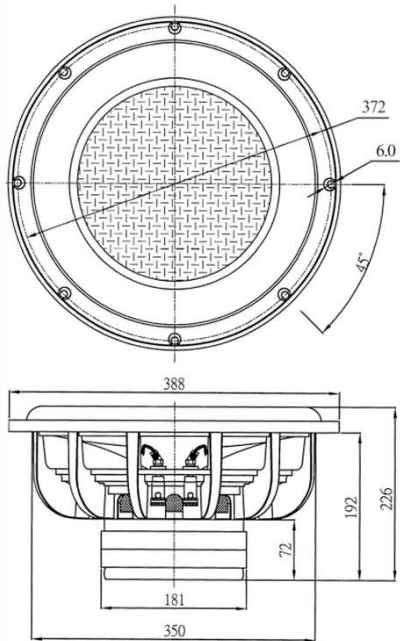


# Příloha D - Parametry reproduktoru Dayton Audio Ultimax UM15-22



UM15-22 15" Ultimax DVC Subwoofer 2 ohm Per Coil

UM15-22



PARAMETERS	
Impedance	4 ohms
Re	3.4 ohms
Le	1.31 mH
Fs	19.5 Hz
Qms	2.40
Qes	0.59
Qts	0.47
Mms	279.4 g
Cms	0.24 mm/N
Sd	814.6 cm <sup>2</sup>
Vd	1,548 cm <sup>3</sup>
BL	15.4 Tm
Vas	224.3 liters
Xmax	19 mm
VC Diameter	63.5 mm
SPL	86.5 dB @ 2.83V/1m
RMS Power Handling	800 watts
Usable Frequency Range (Hz)	15 - 1,000 Hz

- FEATURES**
- Sweeps massive amounts of air!
  - Over 1-1/2" of total cone travel
  - 800 watts RMS power handling
  - The latest in subwoofer technology
  - Dual linear stiffness spiders limit distortion and rocking modes

