

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

## Kondenzátorový mikrofon s dělenou pevnou elektrodou

**David Ringsmuth**

Vedoucí: Ing. Petr Honzík, Ph.D.  
Studijní program: Elektronika a komunikace  
Květen 2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ringsmuth** Jméno: **David** Osobní číslo: **478083**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Kondenzátorový mikrofon s dělenou pevnou elektrodou**

Název bakalářské práce anglicky:

**Condenser Microphone with Segmented Fixed Electrode**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s principy funkce kondenzátorových mikrofonů a jejich teoretickým popisem. Sestavte numerický model mikrofonu s pevnou elektrodou rozdělenou na několik částí. Studujte vliv směru příchozí vlny budícího tlaku na tvar vychylky membrány, zejména na vyšších frekvencích. Vyvoďte závěry ohledně možnosti detekce směru příchozí vlny. Proveďte a vyhodnoťte měření na vzorku takového mikrofonu, případně navrhněte úpravy.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Škvor, Z.: Elektroakustika a akustika, ČVUT, Praha, 2012
- [2] Acoustics Module User's Guide, COMSOL Multiphysics, 2022

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Honzík, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Petr Honzík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Petru Honzíkovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady, všestrannou pomoc a trpělivost při konzultacích.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 26. května 2023

## Abstrakt

Tato práce zkoumá vliv směru příchozí vlny budícího tlaku na tvar výchylky membrány kondenzátorového mikrofону s dělenou pevnou elektrodou. V první části je vytvořen numerický model ve výpočetním softwaru COMSOL Multiphysics, který je použit k výpočtu průměrné výchylky membrány nad jednotlivými elektrodami. Vliv směru příchozí vlny je poté zkoumán jako rozdíl průměrných výchylek protějších elektrod. Ve druhé části práce je nejprve sestavena měřicí aparatura, vytvořena upravená a aktualizovaná verze aplikace pro měření směrových charakteristik a následně jsou uvedeny výsledky měření směrových charakteristik kondenzátorového mikrofону.

**Klíčová slova:** Mikrofon, kondenzátorový mikrofon, směrová charakteristika, numerický model, dělená pevná elektroda

**Vedoucí:** Ing. Petr Honzík, Ph.D.

## Abstract

This thesis studies the effect of the direction of the incoming acoustic wave on the shape of the diaphragm deflection of a condenser microphone with segmented fixed electrode. In the first part, a numerical model is created using COMSOL Multiphysics software. The numerical model is used to calculate the mean deflection of the microphone diaphragm above each segment of the fixed electrode, which is then used to determine the direction of the incoming wave as a difference between the mean diaphragm deflections above opposing segments of the fixed electrode. The second part of the thesis describes the design and assembly of the measuring apparatus, programming of an updated version of the application for measuring polar patterns and presents the results of several measurements.

**Keywords:** Microphone, condenser microphone, polar patterns, numerical model, segmented fixed electrode

**Title translation:** Condenser microphone with segmented fixed electrode

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>	C.2 Zapojení	50
<b>2 Teoretická část</b>	<b>3</b>	C.3 Měření a analýza	50
2.1 Kondenzátorový mikrofon	3	C.4 Analýza/vykreslení již zpracovaných dat	53
2.1.1 Výchylka membrány	4	<b>D Datové přílohy</b>	<b>55</b>
2.1.2 Průměrná výchylka membrány	5		
2.1.3 Kondenzátorový mikrofon se čtyřmi elektrodami	5		
<b>3 Numerický model</b>	<b>7</b>		
3.1 Slabé řešení diferenciální rovnice	8		
3.2 Formulace akustických rovnic pro termoviskózní plyn	9		
3.3 Výsledky modelu	10		
3.3.1 Neuniformní buzení	10		
3.3.2 Teplota	10		
3.3.3 Akustická rychlost	13		
3.3.4 Výchylka membrány	15		
3.4 Směrnost	22		
3.4.1 Vliv velikosti vzduchové mezery na výstupní signál	23		
<b>4 Měření</b>	<b>25</b>		
4.1 Úvodní měření	25		
4.1.1 Zpracování výstupu	26		
4.2 Měření směrových charakteristik	27		
4.2.1 Měřicí sestava	28		
4.2.2 GUI a popis algoritmu	31		
4.3 Vibrometr	32		
4.4 Výsledky měření	34		
<b>5 Závěr</b>	<b>39</b>		
<b>Literatura</b>	<b>41</b>		
<b>A Schéma zapojení měřeného mikrofonu</b>	<b>43</b>		
<b>B Popis důležitých částí upraveného kódu</b>	<b>45</b>		
B.1 swept-sine	45		
B.2 Aplikace PolarRecording	45		
B.2.1 Připojení arduina	45		
B.2.2 Nastavení swept-sinu	46		
B.2.3 Měření	46		
B.2.4 Analýza	47		
B.2.5 Vykreslení směrových charakteristik	48		
<b>C Návod k měření</b>	<b>49</b>		
C.1 Software	49		

## Obrázky

1.1 Porovnání frekvenční charakteristiky vybraného kondenzátorového a dynamického mikrofonu [1] .....	1	3.19 Výchylka membrány, $f = 5623$ Hz, $\alpha = 30^\circ$ .....	18
2.1 Příklad zapojení kondenzátorového mikrofonu [3] .....	3	3.20 Výchylka membrány, $f = 5623$ Hz, $\alpha = 45^\circ$ .....	19
2.2 Výchylky vidů 1-1 a 1-2 kruhové membrány [4] .....	4	3.21 Výchylka membrány, $f = 10$ kHz, $\alpha = 0^\circ$ .....	19
2.3 Pevná dělená elektroda .....	5	3.22 Výchylka membrány, $f = 10$ kHz, $\alpha = 15^\circ$ .....	19
2.4 Označení elektrod .....	5	3.23 Výchylka membrány, $f = 10$ kHz, $\alpha = 30^\circ$ .....	20
3.1 Model mikrofonu se čtyřmi elektrodami .....	7	3.24 Výchylka membrány, $f = 10$ kHz, $\alpha = 45^\circ$ .....	20
3.2 Buzení mikrofonu, $f = 10$ kHz ..	10	3.25 Absolutní hodnota průměrné výchylky membrány .....	21
3.3 Změna teploty v mikrofonu, $f = 100$ Hz .....	11	3.26 Absolutní hodnota rozdílu průměrných výchylek membrány v závislosti na frekvenci pro různé úhly $\alpha$ .....	21
3.4 Změna teploty v mikrofonu, $f = 1000$ Hz .....	11	3.27 Absolutní hodnota rozdílu průměrných výchylek nad protějšími elektrodami v dB .....	22
3.5 Změna teploty v mikrofonu, $f = 10$ kHz .....	12	3.28 Výstupní signál pro různou tloušťku vzduchové mezery $h_g$ , $f = 1$ kHz .....	23
3.6 Modul akustické rychlosti, $f = 100$ Hz .....	13	3.29 Výstupní signál pro různou tloušťku vzduchové mezery $h_g$ , $f = 5$ kHz .....	23
3.7 Modul akustické rychlosti, $f = 1000$ Hz .....	14	4.1 Schéma zapojení - úvodní měření	25
3.8 Modu akustické rychlosti, $f = 10$ kHz .....	14	4.2 Měřený mikrofon s pevnou dělenou elektrodou .....	26
3.9 Výchylka membrány, $f = 100$ Hz, $\alpha = 0^\circ$ .....	15	4.3 Příklad zpracování signálu .....	26
3.10 Výchylka membrány, $f = 100$ Hz, $\alpha = 15^\circ$ .....	15	4.4 Signál zatížený šumem - detail	27
3.11 Výchylka membrány, $f = 100$ Hz, $\alpha = 30^\circ$ .....	16	4.5 Filtr navržený matlabem pro signál o $f = 1000$ Hz .....	27
3.12 Výchylka membrány, $f = 100$ Hz, $\alpha = 45^\circ$ .....	16	4.6 Řídící jednotka .....	29
3.13 Výchylka membrány, $f = 1000$ Hz, $\alpha = 0^\circ$ .....	16	4.7 Blokové schéma přípravku .....	29
3.14 Výchylka membrány, $f = 1000$ Hz, $\alpha = 15^\circ$ .....	17	4.8 Navržené úchyty pro 3D tisk ...	30
3.15 Výchylka membrány, $f = 1000$ Hz, $\alpha = 30^\circ$ .....	17	4.9 Měřicí sestava .....	30
3.16 Výchylka membrány, $f = 1000$ Hz, $\alpha = 45^\circ$ .....	17	4.10 Aplikace pro měření směrových charakteristik .....	31
3.17 Výchylka membrány, $f = 5623$ Hz, $\alpha = 0^\circ$ .....	18	4.11 Reálná a imaginární část výchylky membrány změřená vibrometrem	33
3.18 Výchylka membrány, $f = 5623$ Hz, $\alpha = 15^\circ$ .....	18	4.12 Měření ve studiu .....	34
		4.13 Změřená frekvenční charakteristika pro dva různé úhly	35



## Tabulky

4.14 Změřená frekvenční charakteristika pro dva různé úhly - s průměrováním . . . . .	35	3.1 Parametry numerického modelu . . .	8
4.15 Porovnání směrových charakteristik před a po zesílení výstupních signálů, $f = 500$ Hz . . .	36		
4.16 Absolutní hodnota rozdílu výstupů protějších elektrod v dB v závislosti na úhlu $\alpha$ . . . . .	36		
4.17 Schéma zapojení s měřicí aparaturou . . . . .	37		
A.1 Schéma zapojení měřeného mikrofonu . . . . .	43		
C.1 Nastavení zvukové karty Fireface UCX . . . . .	49		
C.2 Příklad zapojení - měření směrových charakteristik kondenzátorového mikrofonu . . . . .	50		
C.3 Aplikace - GUI . . . . .	51		
C.4 Přední panel - signalizační LED	52		
C.5 Vykreslená směrová charakteristika mikrofonu se čtyřmi výstupy . . . . .	52		

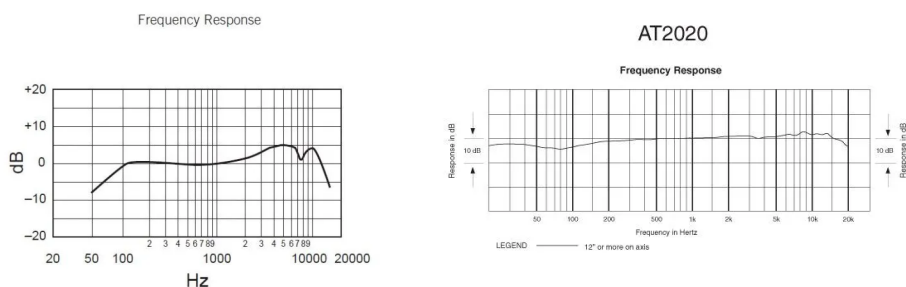


# Kapitola 1

## Úvod

Kondenzátorové mikrofony jsou nejčastěji používány k měřicím účelům a ve studiích, kde je potřeba přesněji zaznamenat zvuky o vyšších frekvencích, hlavně při nahrávání hlasu. Ve srovnání s dynamickými mikrofony mají lepší frekvenční charakteristiku, která je méně strmá na vyšších frekvencích.

Ačkoliv jsou kondenzátorové mikrofony schopné kvalitněji a přesněji nahrávat zvuk než dynamické mikrofony, mají i několik nevýhod, jako jsou například vyšší cena a méně robustní konstrukce náchylnější k poškození.



(a) Shure SM58 dynamický mikrofon (b) AT2020 kondenzátorový mikrofon

**Obrázek 1.1:** Porovnání frekvenční charakteristiky vybraného kondenzátorového a dynamického mikrofonu [1]

Tato práce se zabývá vlivem příchozí akustické vlny budícího tlaku na tvar výchylky membrány kondenzátorového mikrofonu s dělenou pevnou elektrodou. V případě, kdy je mikrofon vystaven neuniformnímu buzení lze očekávat, že výchylka membrány nebude axisymetrická. To by mělo mít za následek různé výstupní signály jednotlivých segmentů dělené pevné elektrody. Tento předpoklad je potřeba ověřit vytvořením numerického modelu a provedením měření na skutečném mikrofonu.



## Kapitola 2

### Teoretická část

#### 2.1 Kondenzátorový mikrofon

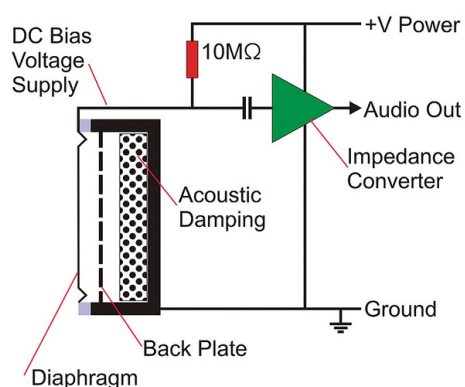
Kondenzátorový mikrofon je elektrostatický měnič, který převádí příchozí mechanické kmity na elektrický signál. Vstupní signál v podobě mechanického vlnění pohybuje vodivou membránou mikrofonu, která tvoří jednu z elektrod kondenzátorového mikrofonu. Druhá deska kondenzátoru je tvořena děrovanou pevnou elektrodou, která je připojena na polarizační napětí  $U_0$ .

V případě lineárního modelu mikrofonu, nulové změny náboje na kondenzátoru ( $dQ = 0$ ) a zanedbatelné parazitní kapacity kondenzátoru  $C_p$ , je možné pro výstupní napětí psát [2]

$$u(t) = U_0 \frac{\bar{\xi}(t)}{h_g}, \quad (2.1)$$

kde  $\bar{\xi}$  je průměrná výchylka membrány a  $h_g$  je vzdálenost mezi deskami kondenzátoru. Toto výstupní napětí je dále zesíleno předzesilovačem.

DC-biased Capacitor Microphone Capsule



Obrázek 2.1: Příklad zapojení kondenzátorového mikrofonu [3]

### 2.1.1 Výchylka membrány

Fázor výchylky kruhové membrány  $\xi$  mikrofonu je možné popsat vlnovou rovnicí [4] ve tvaru

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial \varphi^2} + k_M^2 \xi = 0 \quad (2.2)$$

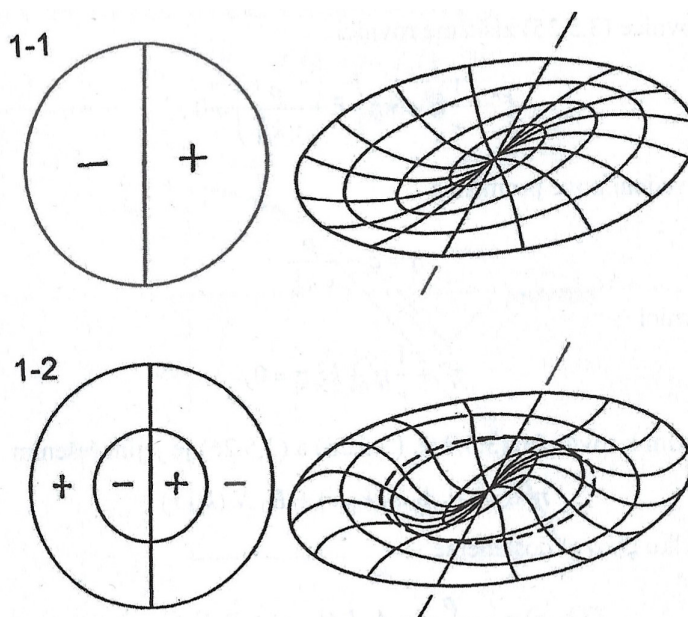
kde  $k_M$  je vlnové číslo  $k_M = \omega/c_M = 2\pi f/\sqrt{\frac{T}{m_1}}$ ,  $f$  je frekvence příčné vlny šířící se na membráně,  $T$  je mechanické napětí membrány,  $m_1 = \rho_m * h_m$  je plošná hustota membrány,  $\rho_m$  je hustota materiálu membrány a  $h_m$  je tloušťka membrány. Další úpravou a použitím následujících podmínek

- podmínka omezenosti  $|\xi(0, \varphi)| < \infty$ ,
- hraniční podmínka  $\xi(R, \varphi) = 0$  a
- podmínka periodičnosti  $\xi(r, \varphi) = \xi(r, \varphi + 2\pi)$

lze získat charakteristickou funkci [4] popisující volné kmity membrány

$$\xi_{n,i}(r, \varphi) = A_{n,i} J_n(k_{M,n,i} r) [C_{n,i} \cos(n\varphi) + D_{n,i} \sin(n\varphi)], \quad (2.3)$$

kde  $A_{n,i}$ ,  $C_{n,i}$  a  $D_{n,i}$  jsou konstanty a  $J_n$  je Besselova funkce  $n$ -tého řádu. Jednotlivé vidy jsou označeny indexy  $(n, i)$ , kde  $n$  je počet uzlových čar tvořených úsečkami a  $i$  je počet uzlových čar tvořených soustřednými kružnicemi [4].



**Obrázek 2.2:** Výchylky vidů 1-1 a 1-2 kruhové membrány [4]

Při uvažování vynucených kmitů už rovnice 2.2 nebude mít nulovou pravou stranu a bude mít tvar [4]

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial \varphi^2} + k_M^2 \xi = -\frac{p}{T}, \quad (2.4)$$

kde  $p$  je změna tlaku budící membránu.

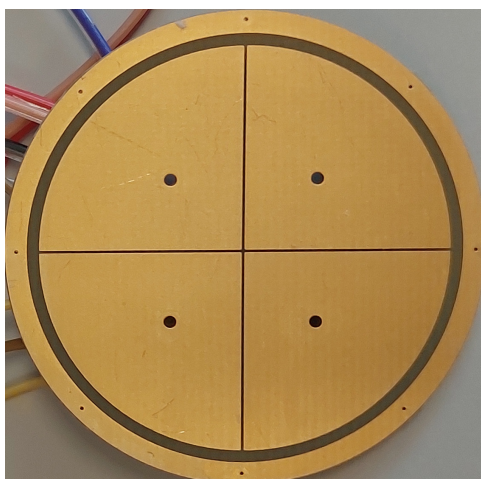
### ■ 2.1.2 Průměrná výchylka membrány

Aby bylo možné získat výstupní napětí mikrofonu, je potřeba nejprve vypočítat průměrnou výchylku membrány, kterou je potom možné dosadit do vztahu 2.1. Průměrnou výchylku lze spočítat jako integrál okamžité výchylky membrány  $\xi$  přes plochu  $S$  vydělený velikostí plochy  $S$ ,

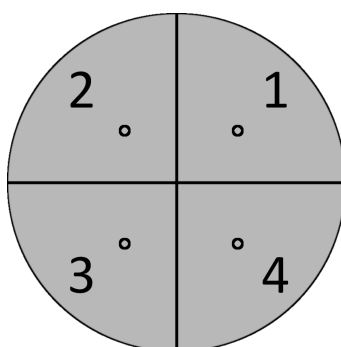
$$\bar{\xi} = \frac{1}{S} \iint_S \xi(r, \varphi) dS. \quad (2.5)$$

### ■ 2.1.3 Kondenzátorový mikrofon se čtyřmi elektrodami

Tato práce se zabývá mikrofonem, jehož pevná elektroda je rozdělena na čtyři elektrody. Průměrnou výchylku je potřeba počítat zvlášť pro každou elektrodu, plocha  $S$  použitá v rovnici 2.5 bude tedy čtvrtina kruhu vždy nad danou elektrodou.



Obrázek 2.3: Pevná dělená elektroda



Obrázek 2.4: Označení elektrod





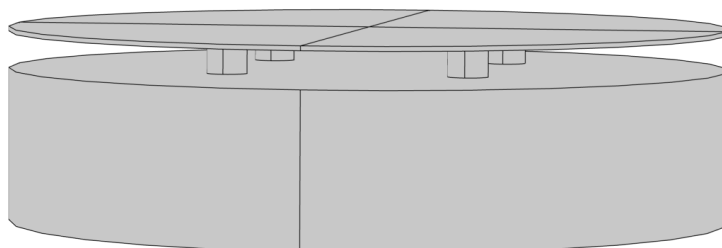
## Kapitola 3

### Numerický model

Numerický model kondenzátorového mikrofonu byl vytvořen ve výpočetním softwaru COMSOL Multiphysics. Tento model byl postupně buzen z různých směrů daných úhlem  $\alpha$ . Neuniformní buzení je dáno rozdílem tlaků na obou stranách membrány

$$p(x, y) = p_g(x, y) - p_{\text{inc}} e^{-jk_0(\sin(\alpha)x + \cos(\alpha)y)}, \quad (3.1)$$

kde  $p_g(x, y)$  je tlak ve vzduchové mezeře mikrofonu,  $p_{\text{inc}} = 1$  Pa je amplituda buzení,  $\alpha$  úhel příchozí akustické vlny a  $k_0 = \omega/c$  je vlnové číslo,  $\omega$  je úhlová frekvence a  $c$  je adiabatická rychlost zvuku.



**Obrázek 3.1:** Model mikrofonu se čtyřmi elektrodami

V tabulce 3.1 jsou uvedeny rozměry mikrofonu a parametry použité při popisu termoviskózního plynu.

**Tabulka 3.1:** Parametry numerického modelu

Parametr	Hodnota	Popis
$R_m$	18 mm	Poloměr membrány
$h_m$	25 $\mu\text{m}$	Tloušťka membrány
$h_g$	230 $\mu\text{m}$	Tloušťka vzduchové mezery
$h_d$	7,6 mm	Tloušťka zadní dutiny
$R_t$	1 mm	Poloměr díry v pevné elektrodě
$l_t$	1,6 mm	Délka trubičky
$\rho_m$	1944 $\text{kg}/\text{m}^3$	Hustota membrány
$T_m$	116,27 N/m	Mechanické napětí membrány
$c$	345,9 m/s	Adiabatická rychlost zvuku
$\gamma$	1,4	Poissonova konstanta pro adiabatický děj
$\hat{\beta}$	340,52 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Změna tlaku vůči změně teploty
$\rho_0$	1,18 $\text{kg}/\text{m}^3$	Hustota vzduchu
$c_p$	1010 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Měrná tepelná kapacita při konst. tlaku
$\mu$	$1,83 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	Smyková dynamická viskozita
$\lambda_h$	$24,3 \cdot 10^{-5} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Tepelná vodivost
$T_0$	296,15 K	Statická teplota
$\eta$	0,7098 $\text{Pa} \cdot \text{s}$	Objemová dynamická viskozita

### 3.1 Slabé řešení diferenciální rovnice

V kartézských souřadnicích má rovnice pro fázor výchylky 2.2 tvar

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + k_M^2 \xi + \frac{p}{T} = 0. \quad (3.2)$$

Pro vytvoření numerického modelu bylo potřeba nahradit silné řešení rovnice 3.2 jejím integrálním tvarem. Ten je možné získat pomocí Galerkinovy variační metody [5]. Integrací rovnice 3.2 na oblasti  $\Omega$  lze získat rovnici

$$\int_{\Omega} \left( \mathbf{w} \Delta \xi + \mathbf{w} k_M^2 \xi + \mathbf{w} \frac{p}{T} \right) d\Omega = 0, \quad (3.3)$$

kde  $\mathbf{w}$  je testovací funkce,  $\Delta$  je Laplaceův operátor a  $\nabla$  je nabla operátor. Rovnici je dále potřeba upravit metodou per partes na tvar

$$\int_{\Gamma} \mathbf{w} \nabla \xi \mathbf{n} d\Omega - \int_{\Omega} \nabla \mathbf{w} \nabla \xi d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w} k_M^2 \xi d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w} \frac{p}{T} d\Omega = 0, \quad (3.4)$$

kde  $\Gamma$  je okraj oblasti  $\Omega$ . Jelikož je výchylka na okraji membrány nulová, první člen v 3.4 vypadne a výsledný tvar rovnice lze zapsat jako

$$\int_{\Omega} \left[ -\frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} + k_M^2 \xi w + \frac{p}{T} w \right] d\Omega = 0. \quad (3.5)$$

## 3.2 Formulace akustických rovnic pro termoviskózní plyn

Pro vytvoření numerického modelu mikrofону bylo také třeba popsat chování termoviskózního plynu uvnitř mikrofónu. Využitím rovnic popisujících zachování hmotnosti, zachování hybnosti, zachování energie a Navier-Stokesovy rovnice lze získat rovnice popisující akustickou rychlost  $\mathbf{v}$  a akustickou změnu teploty  $\tau$  [6, 7]

$$\omega^2 \mathbf{v} + B \mathbf{grad} \operatorname{div} \mathbf{v} + C \mathbf{rot} \operatorname{rot} \mathbf{v} - D \mathbf{grad} \tau = 0, \quad (3.6)$$

$$j\omega\tau + Q \operatorname{div} \mathbf{grad} \tau - R \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (3.7)$$

kde  $B = c^2/\gamma + j\omega c l'_v$ ,  $C = -j\omega c l'_v$ ,  $D = j\omega \hat{\beta}/\rho_0$ ,  $Q = -\gamma l_h c$ ,  $R = -(\gamma - 1)/(\gamma \hat{\beta} \rho_0 c^2)$ ,  $\hat{\beta} = \partial \mathbf{P}/\partial \mathbf{T}|_{\rho_0}$ ,  $c$  je adiabatická rychlost zvuku a  $\gamma$  je Poissonova konstanta. Charakteristické viskózní délky jsou  $l'_v = \mu/(\rho_0 c)$ ,  $l_v = (\eta + 4\mu/3)/(\rho_0 c)$  a  $l_h = \lambda_h/(\rho_0 c c_p)$ , kde  $\mu$  je smyková dynamická viskozita,  $\eta$  je objemová dynamická viskozita a  $c_p$  je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [6, 7]. Akustický tlak uvnitř mikrofónu je pak možné získat z vypočtené změny teploty a akustické rychlosti pomocí vztahu

$$p_g = \beta\tau - \frac{\rho_0 c^2}{j\omega\gamma} \operatorname{div} \mathbf{v}. \quad (3.8)$$

Slabé řešení rovnic 3.6 a 3.7 lze získat opět pomocí Galerkinovy variační metody za předpokladu, že platí následující Dirichletovy okrajové podmínky

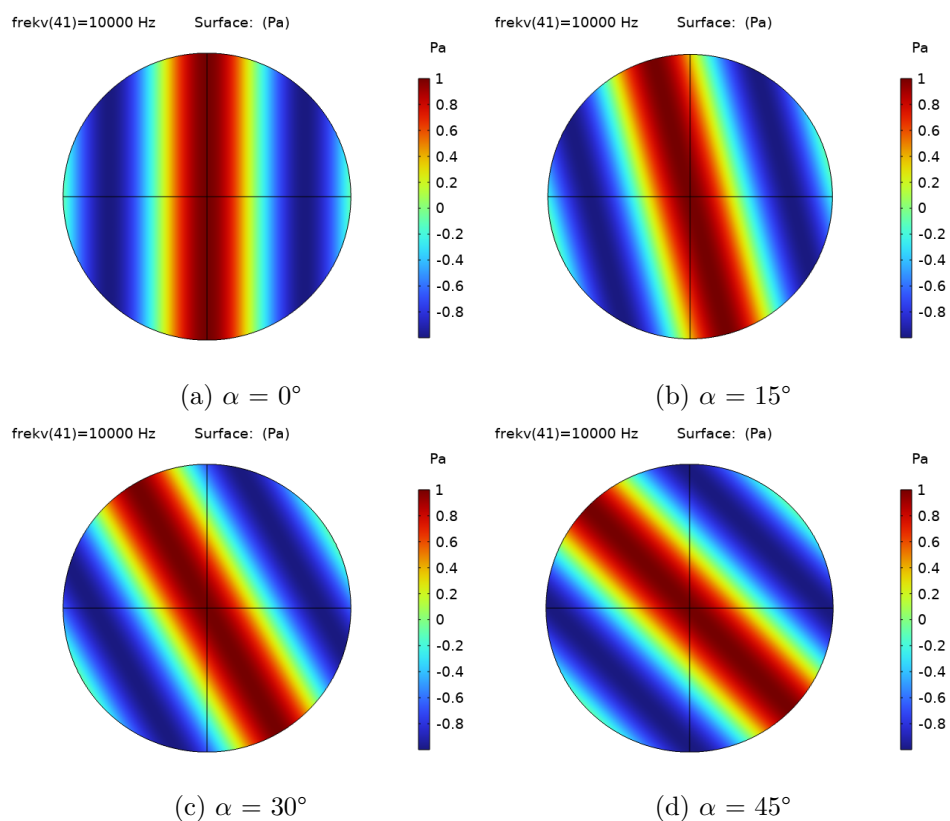
- $\mathbf{v} = 0$  a  $\tau = 0$  na stěnách mikrofónu a
- $v_z = j\omega\xi$ ,  $v_x = 0$  a  $v_y = 0$  na membráně.

Výsledné rovnice pro implementaci do výpočetního softwaru COMSOL Multiphysics byly dodány vedoucím práce.

## 3.3 Výsledky modelu

### 3.3.1 Neuniformní buzení

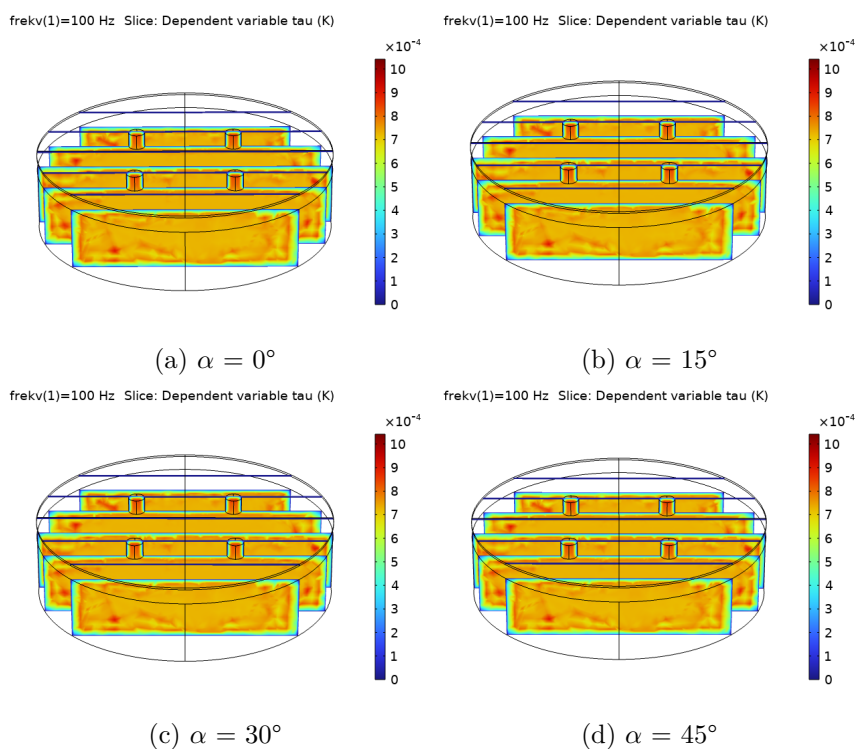
Na obrázku 3.2 je zobrazena příchozí vlna budícího tlaku pro čtyři úhly, která je popsána rovnicí 3.1.



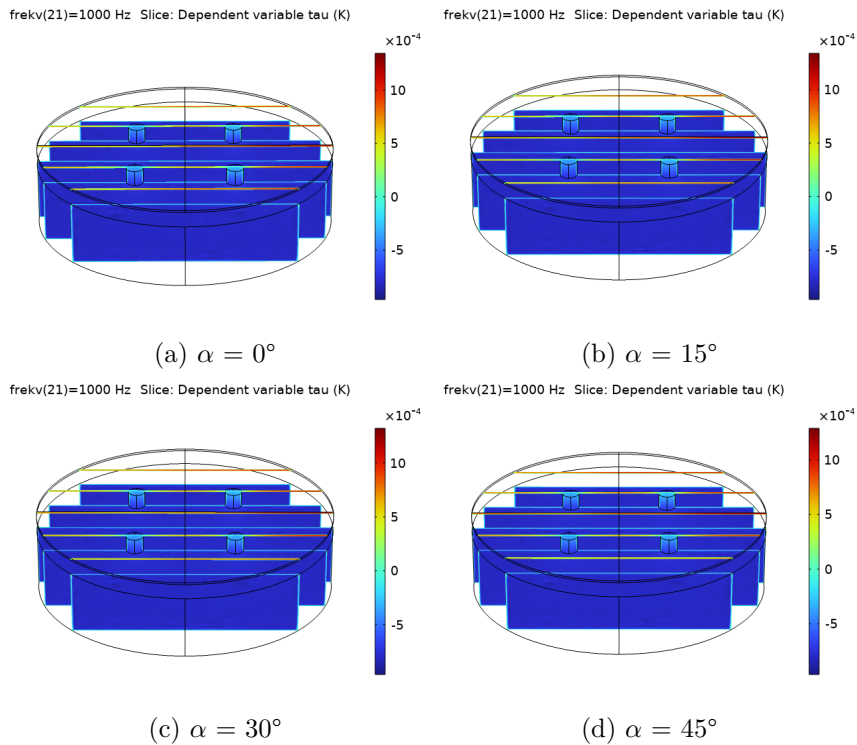
**Obrázek 3.2:** Buzení mikrofonu,  $f = 10$  kHz

### 3.3.2 Teplota

Na obrázcích 3.3, 3.4 a 3.5 je zobrazena změna teploty uvnitř mikrofonu pro tři vybrané frekvence způsobená vlivem buzení membrány mikrofonu. K největším změnám dochází v dírách v pevné elektrodě a ve vzduchové mezeře mezi membránou a pevnou elektrodou.

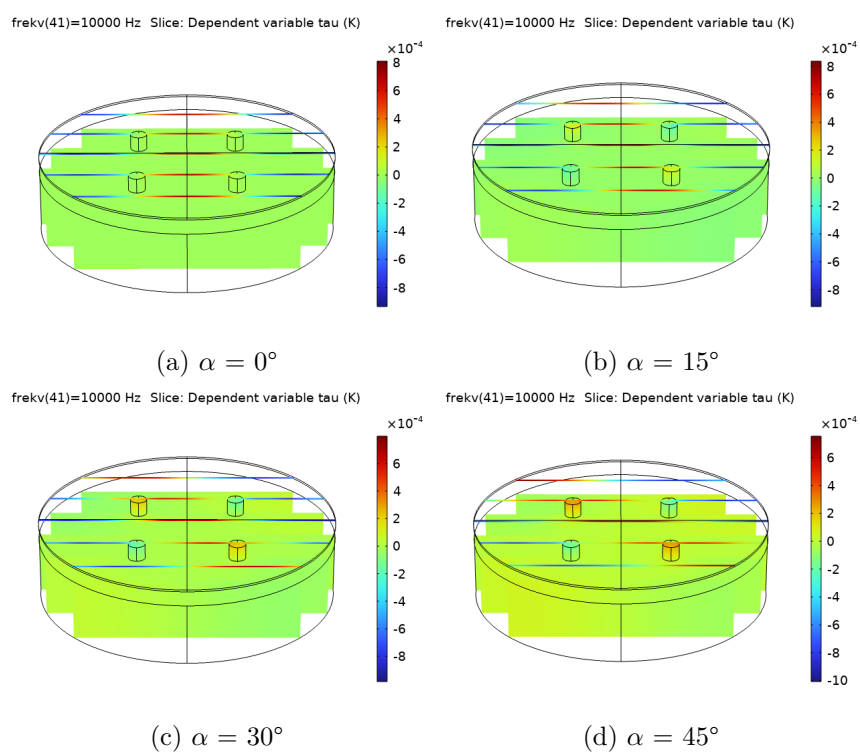


**Obrázek 3.3:** Změna teploty v mikrofonu,  $f = 100$  Hz



**Obrázek 3.4:** Změna teploty v mikrofonu,  $f = 1000$  Hz

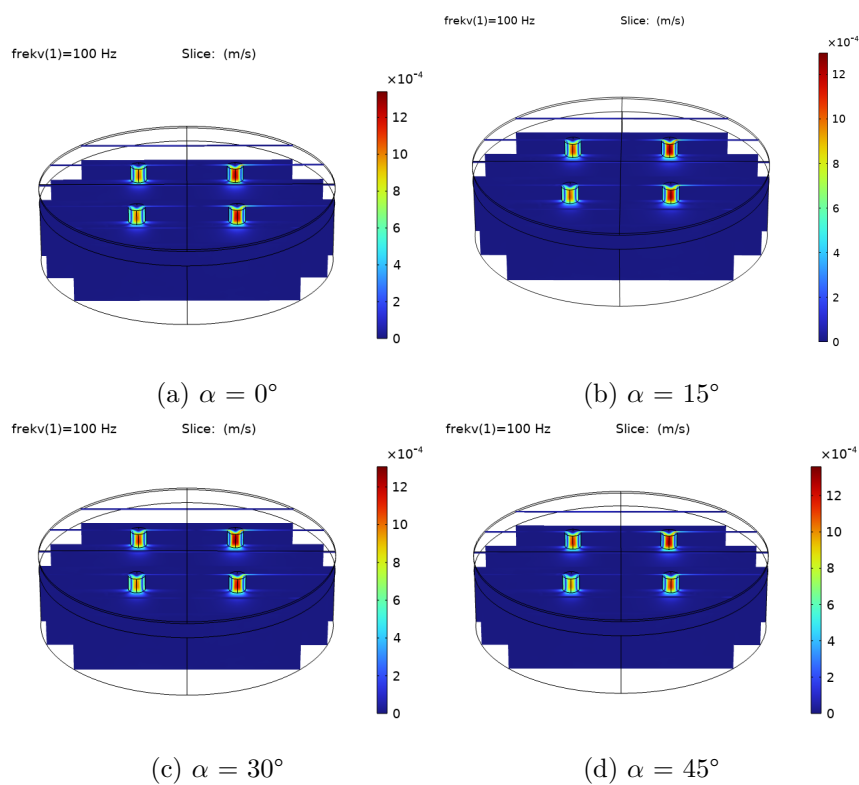
### 3. Numerický model



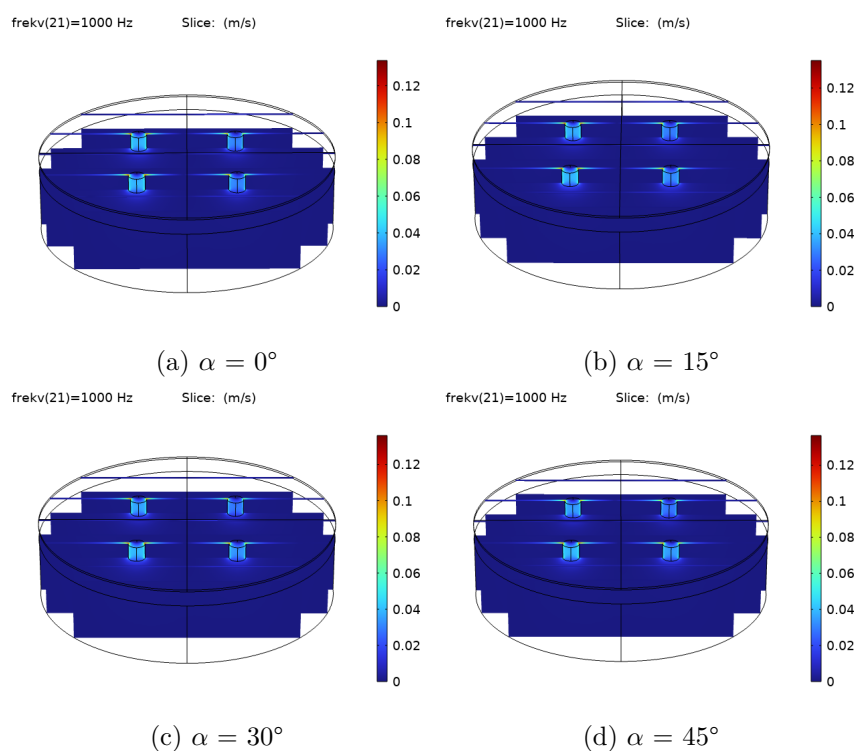
**Obrázek 3.5:** Změna teploty v mikrofonu,  $f = 10$  kHz

### 3.3.3 Akustická rychlost

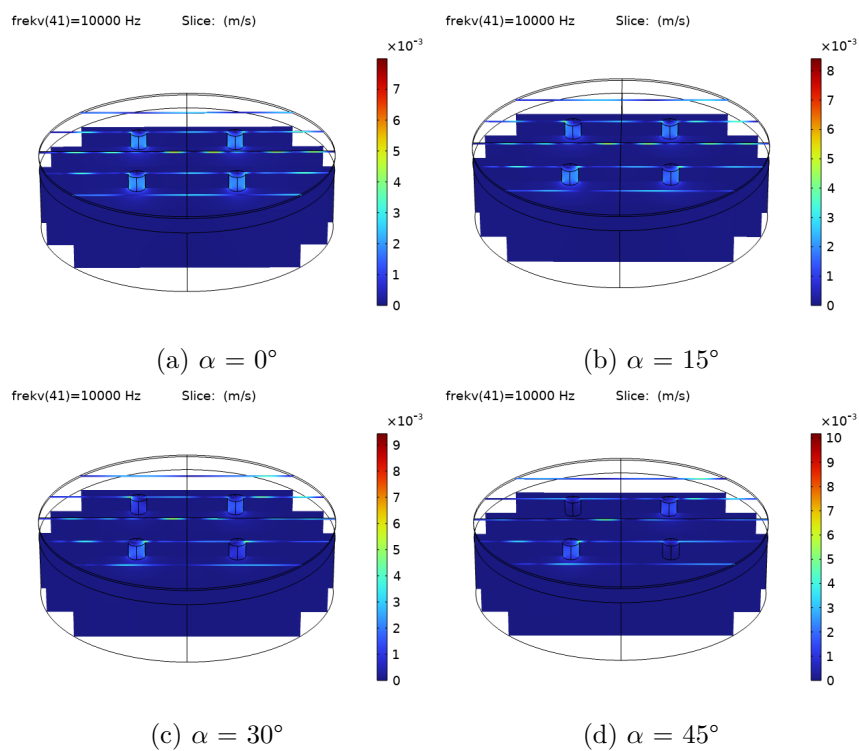
Na obrázcích 3.6, 3.7 a 3.8 je zobrazen modul akustické rychlosti částic uvnitř mikrofonu. Modul rychlosti nabývá nejvyšších hodnot opět v dírách v pevné elektrodě a ve vzduchové mezeře.



**Obrázek 3.6:** Modul akustické rychlosti,  $f = 100$  Hz



**Obrázek 3.7:** Modu akustické rychlosti,  $f = 1000$  Hz

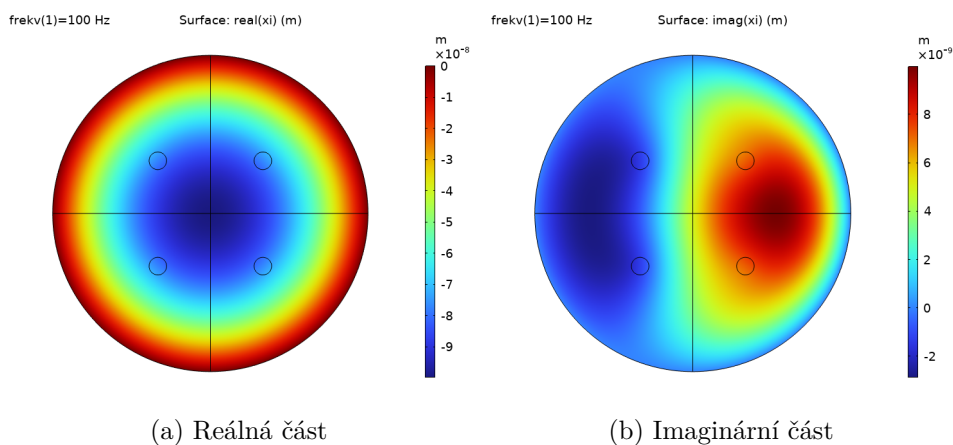


**Obrázek 3.8:** Modu akustické rychlosti,  $f = 10$  kHz

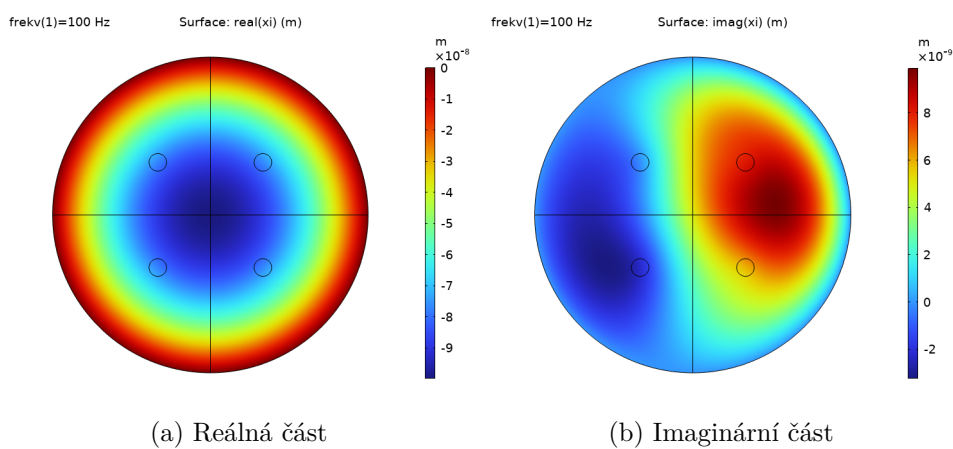


### 3.3.4 Výchylka membrány

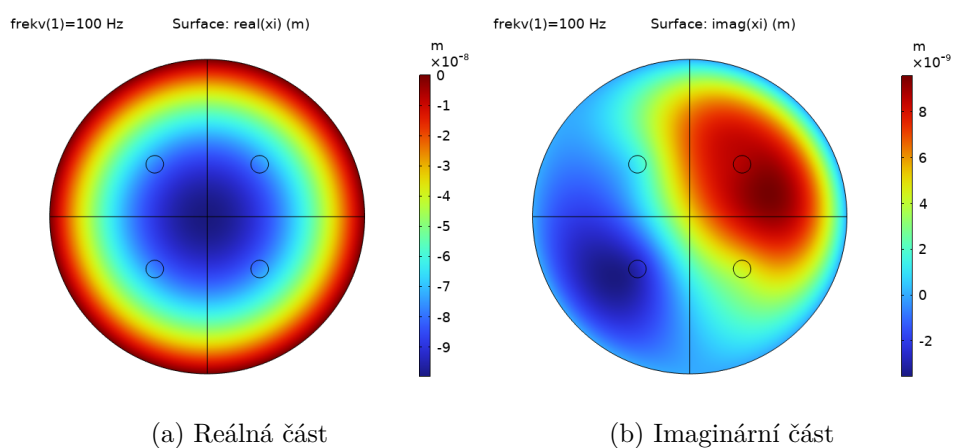
Hlavním výstupem numerického modelu je vypočítaná výchylka membrány. Na obrázcích 3.9 až 3.24 jsou zobrazeny reálné a imaginární části výchylky membrány pro čtyři úhly příchozí akustické vlny a několik vybraných frekvencí. Z těchto obrázků je vidět, že výchylka membrány v případě neuniformního buzení není axisymetrická.



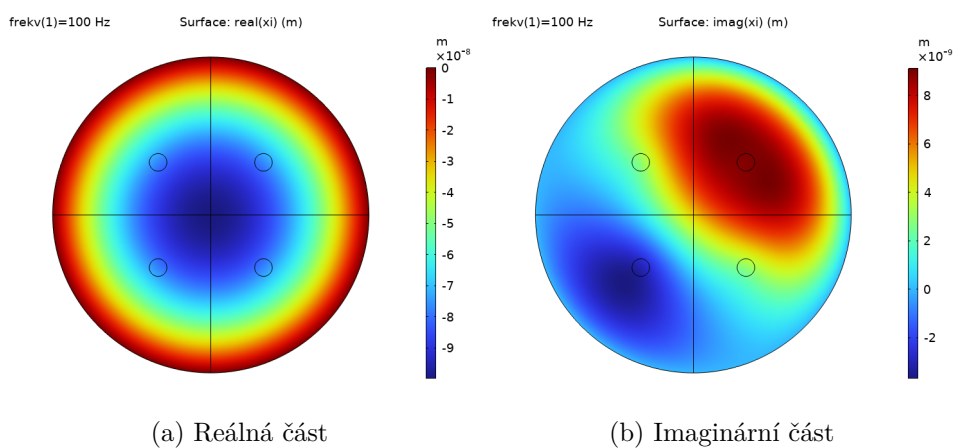
**Obrázek 3.9:** Výchylka membrány,  $f = 100$  Hz,  $\alpha = 0^\circ$



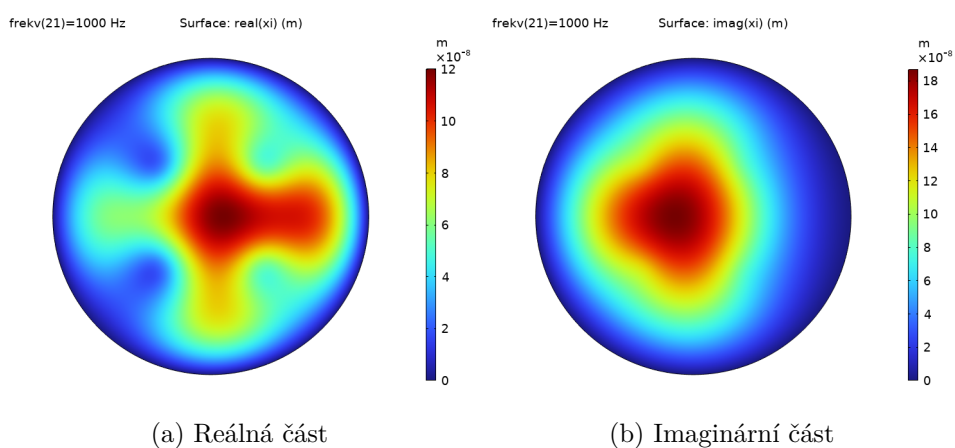
**Obrázek 3.10:** Výchylka membrány,  $f = 100$  Hz,  $\alpha = 15^\circ$



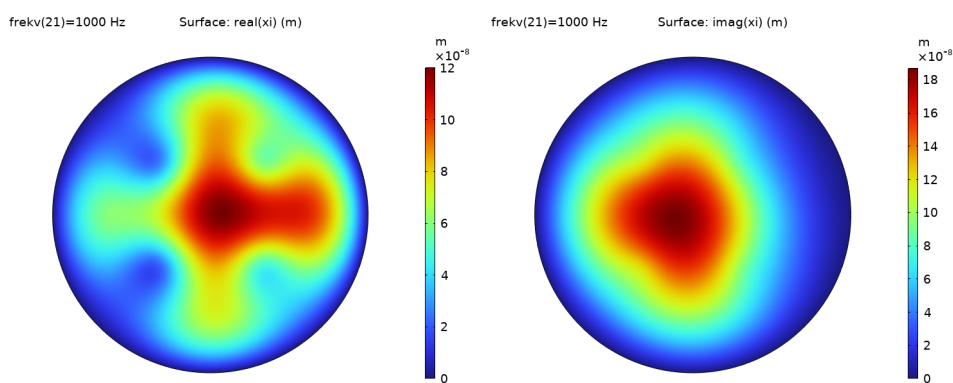
**Obrázek 3.11:** Výchylka membrány,  $f = 100$  Hz,  $\alpha = 30^\circ$



**Obrázek 3.12:** Výchylka membrány,  $f = 100$  Hz,  $\alpha = 45^\circ$

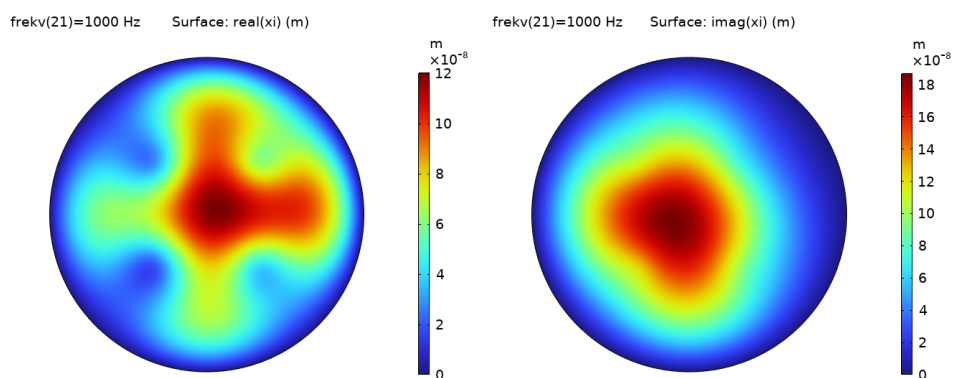


**Obrázek 3.13:** Výchylka membrány,  $f = 1000$  Hz,  $\alpha = 0^\circ$



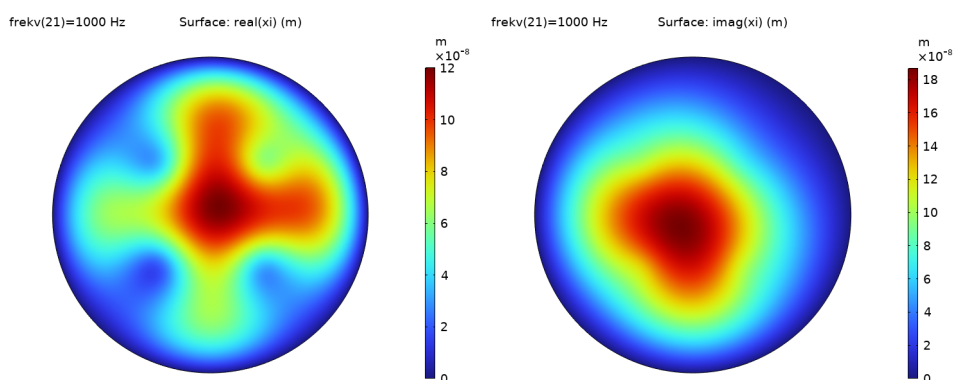
(a) Reálná část

(b) Imaginární část

**Obrázek 3.14:** Výchylka membrány,  $f = 1000$  Hz,  $\alpha = 15^\circ$ 

(a) Reálná část

(b) Imaginární část

**Obrázek 3.15:** Výchylka membrány,  $f = 1000$  Hz,  $\alpha = 30^\circ$ 

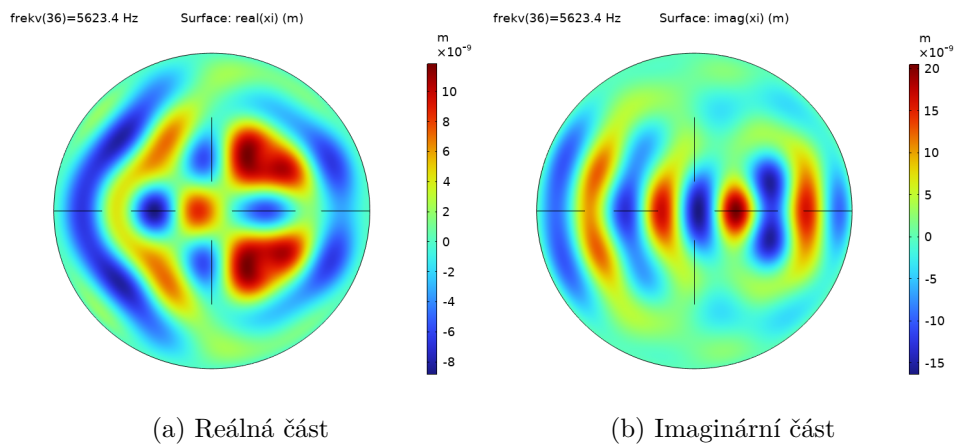
(a) Reálná část

(b) Imaginární část

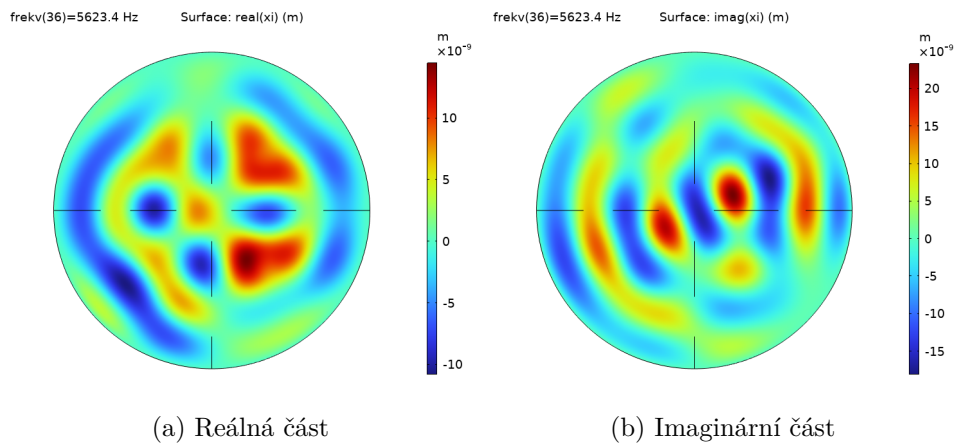
**Obrázek 3.16:** Výchylka membrány,  $f = 1000$  Hz,  $\alpha = 45^\circ$ 

Na vyšších frekvencích je vidět vliv děr v pevné elektrodě na výchylku

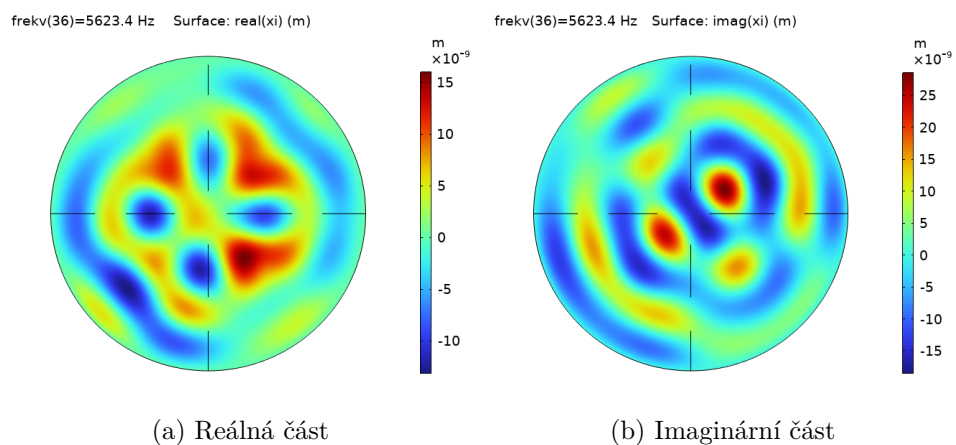
membrány.



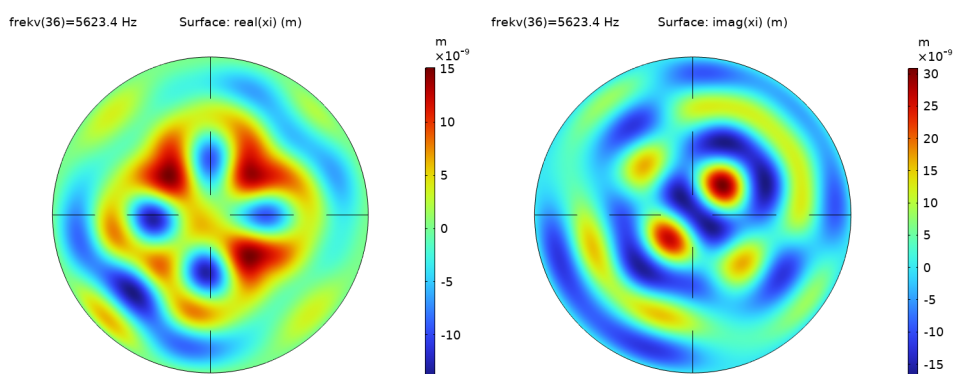
**Obrázek 3.17:** Výchylka membrány,  $f = 5623 \text{ Hz}$ ,  $\alpha = 0^\circ$



**Obrázek 3.18:** Výchylka membrány,  $f = 5623 \text{ Hz}$ ,  $\alpha = 15^\circ$



**Obrázek 3.19:** Výchylka membrány,  $f = 5623 \text{ Hz}$ ,  $\alpha = 30^\circ$

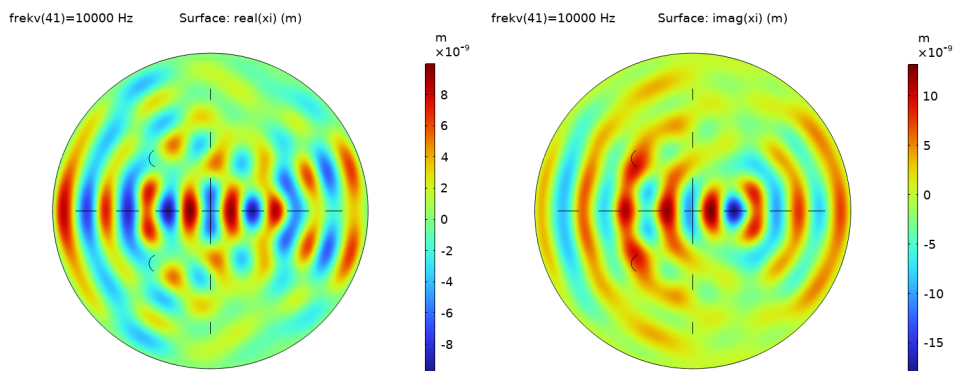


(a) Reálná část

(b) Imaginární část

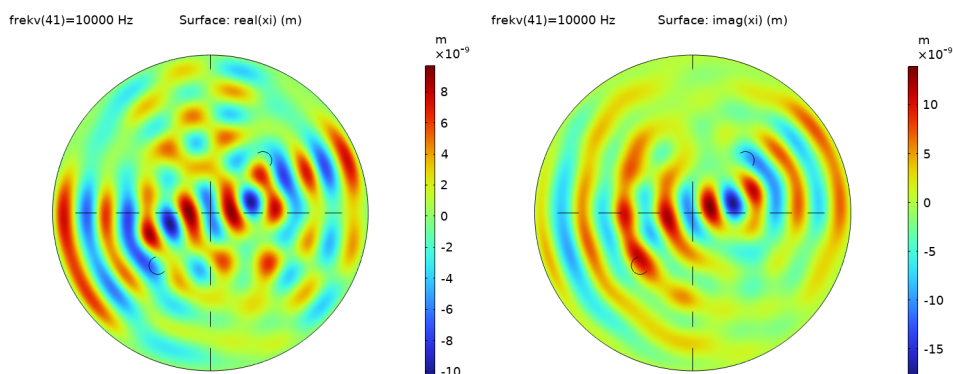
**Obrázek 3.20:** Výchylka membrány,  $f = 5623 \text{ Hz}$ ,  $\alpha = 45^\circ$ 

Nad rezonanční frekvencí se už projevují také vyšší módy kmitů membrány mikrofonu.



(a) Reálná část

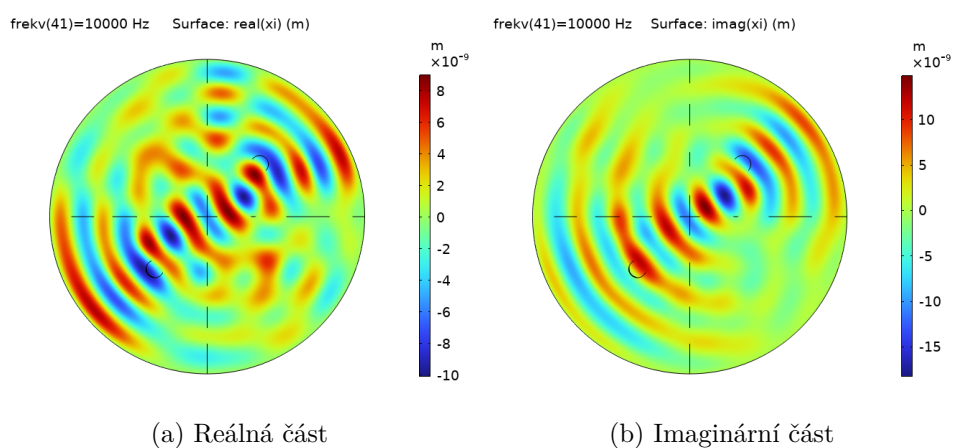
(b) Imaginární část

**Obrázek 3.21:** Výchylka membrány,  $f = 10 \text{ kHz}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ 

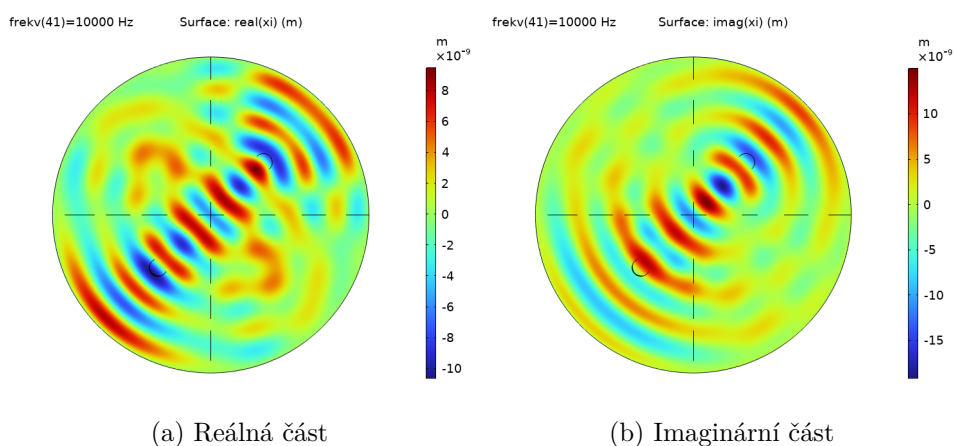
(a) Reálná část

(b) Imaginární část

**Obrázek 3.22:** Výchylka membrány,  $f = 10 \text{ kHz}$ ,  $\alpha = 15^\circ$



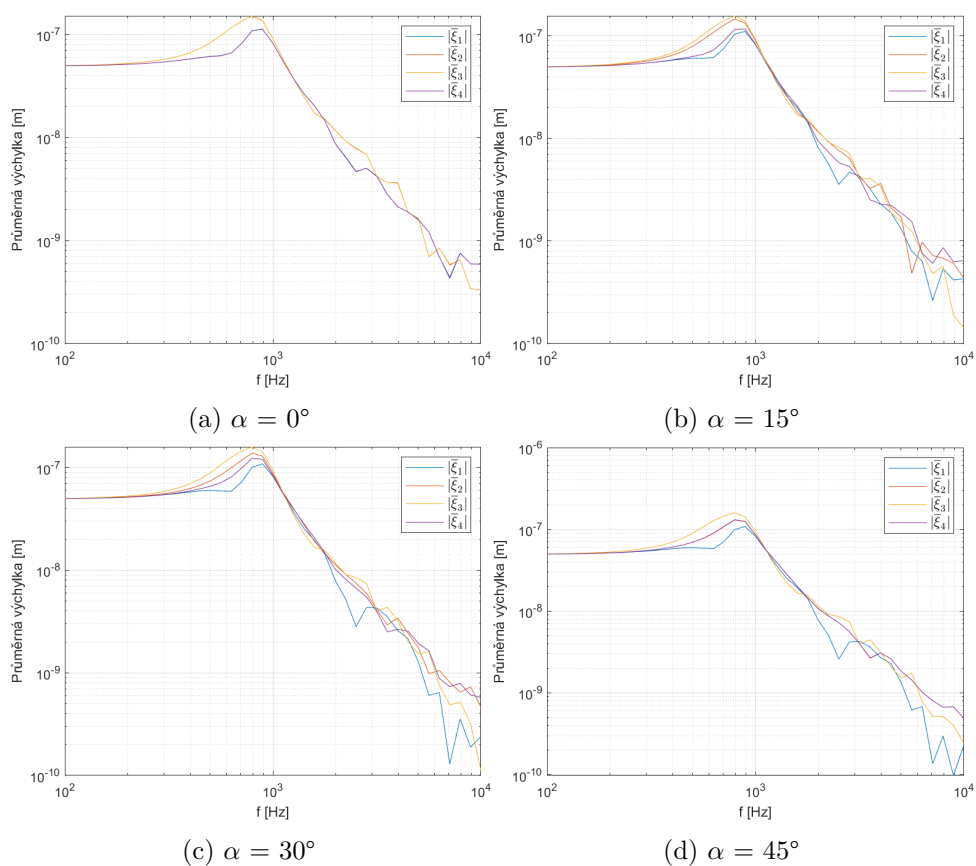
**Obrázek 3.23:** Výchylka membrány,  $f = 10$  kHz,  $\alpha = 30^\circ$



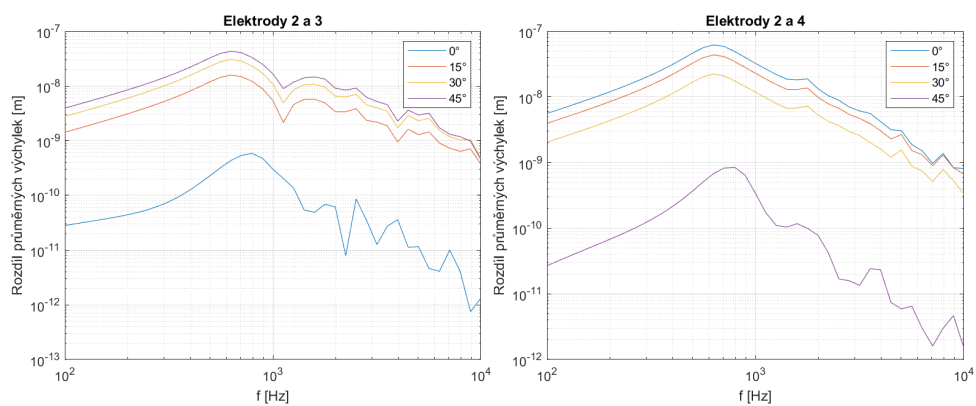
**Obrázek 3.24:** Výchylka membrány,  $f = 10$  kHz,  $\alpha = 45^\circ$

Ačkoliv výchylka membrány není axisymetrická, je možné si všimnout jisté symetrie mezi výstupními signály elektrod. Například pro úhel  $\alpha = 0^\circ$  je výchylka membrány nad elektrodami 1 a 3 a nad elektrodami 2 a 4 symetrická a pro  $\alpha = 45^\circ$  je výchylka membrány nad dvěma protějšími elektrodami 2 a 4 symetrická.

Dalším důležitým výstupem numerického modelu je průměrná výchylka membrány nad jednotlivými elektrodami, ze které by bylo možné určit výstupní napětí. Její absolutní hodnota je zobrazena na obrázku 3.25, absolutní hodnota rozdílu průměrných výchylek je zobrazena na obrázku 3.26.



Obrázek 3.25: Absolutní hodnota průměrné výchylky membrány



(a) rozdíl průměrných výchylek nad sousedními elektrodami

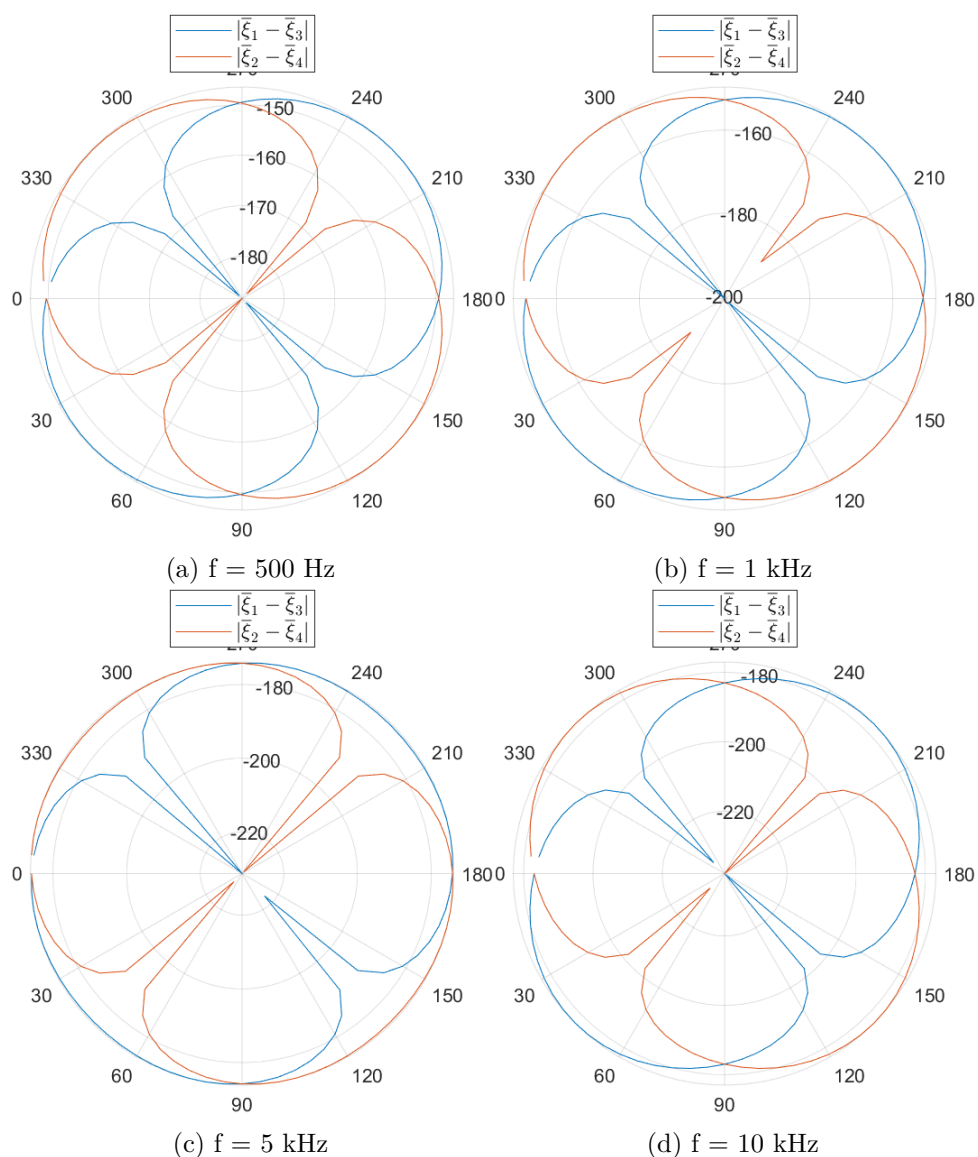
(b) rozdíl průměrných výchylek nad protějšími elektrodami

Obrázek 3.26: Absolutní hodnota rozdílu průměrných výchylek membrány v závislosti na frekvenci pro různé úhly  $\alpha$

### 3.4 Směrnost

Pro zkoumání směru příchozí akustické vlny je potřeba porovnat průměrné výchylky membrány nad jednotlivými elektrodami. Z obrázků 3.25 a 3.26 je vidět, že rozdíl mezi výstupy protějších elektrod kolmých na směr příchozí vlny je závislý na úhlu  $\alpha$ .

Na obrázku 3.27 je pro několik vybraných frekvencí zobrazena závislost výstupního signálu (absolutní hodnota rozdílu průměrných výchylek protějších elektrod) na úhlu  $\alpha$ .

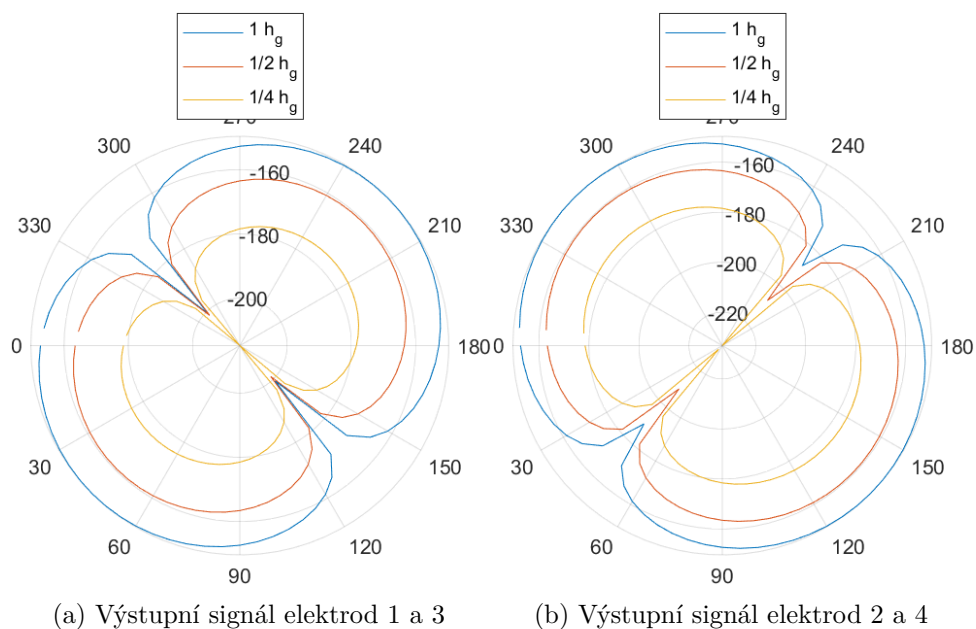


**Obrázek 3.27:** Absolutní hodnota rozdílu průměrných výchylek nad protějšími elektrodami v dB

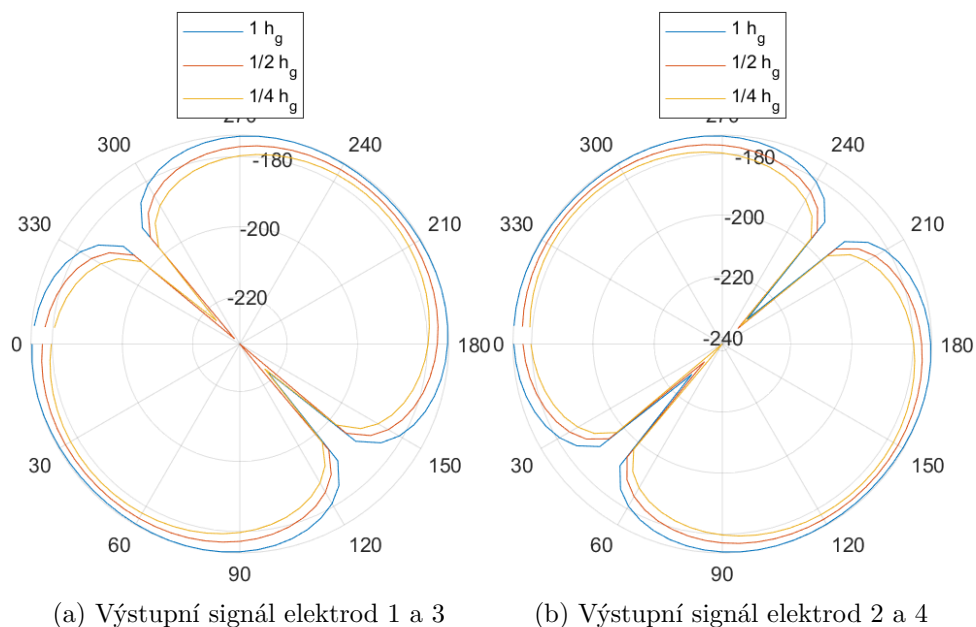


### 3.4.1 Vliv velikosti vzduchové mezery na výstupní signál

Na obrázcích 3.28 a 3.29 je zobrazen vliv tloušťky vzduchové mezery mikrofonu  $h_g$  na výstupní signál mikrofonu pro dvě různé frekvence. Zmenšení vzduchové mezery má za následek snížení úrovně výstupního signálu.



**Obrázek 3.28:** Výstupní signál pro různou tloušťku vzduchové mezery  $h_g$ ,  $f = 1$  kHz



**Obrázek 3.29:** Výstupní signál pro různou tloušťku vzduchové mezery  $h_g$ ,  $f = 5$  kHz

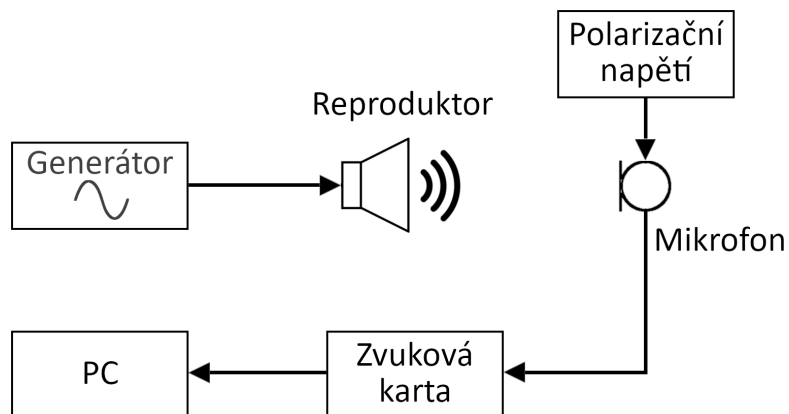


## Kapitola 4

### Měření

#### 4.1 Úvodní měření

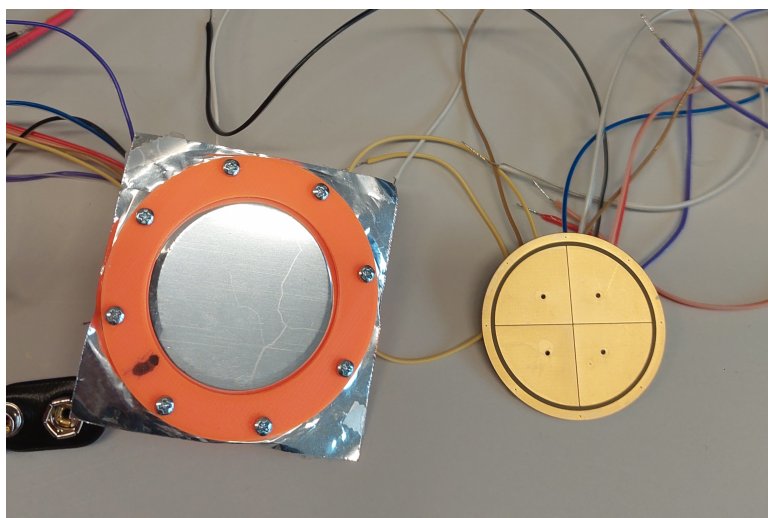
Na mikrofonu bylo provedeno nejprve úvodní měření <sup>1</sup>. Měřen byl výstupní signál jednotlivých elektrod mikrofonu pro 3 frekvence 200 Hz, 500 Hz a 1000 Hz a pro čtyři úhly natočení mikrofonu 0° až 45°. Uspořádání pracoviště je blokově znázorněno na obrázku 4.1. Mikrofon byl připojen na stejnosměrné polarizační napětí  $U_0 = 163$  V, výstupní signál byl zpracován jako normované napětí nabývající hodnot od -1 do 1.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení - úvodní měření

Jelikož po sestavení mikrofonu není vidět pozice jednotlivých elektrod, bylo před začátkem měření nutné určit natočení mikrofonu vůči zdroji buzení. Výchozí pozice byla nalezena tak, že mikrofon byl postupně otáčen, dokud rozdíl mezi sousedními elektrodami nenabyl minima (viz obrázek 3.27).

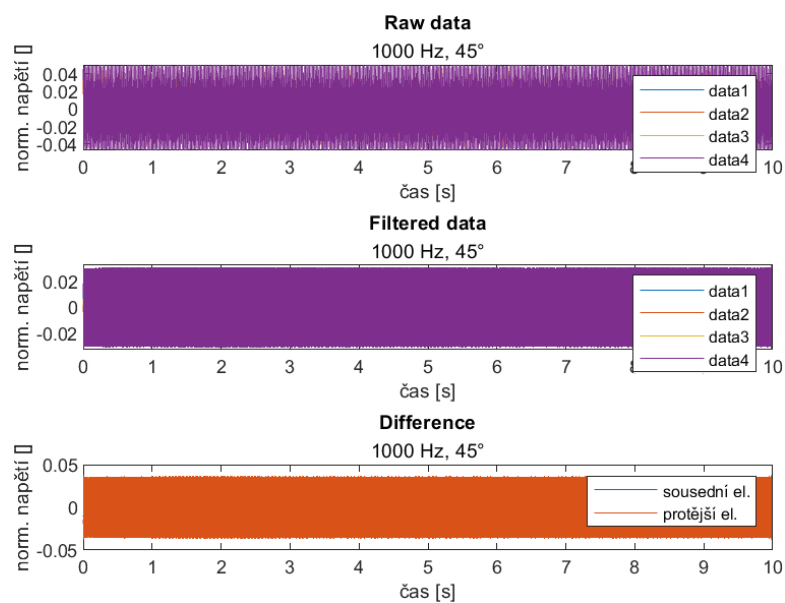
<sup>1</sup>Měřený mikrofon byl dodán vedoucím práce.



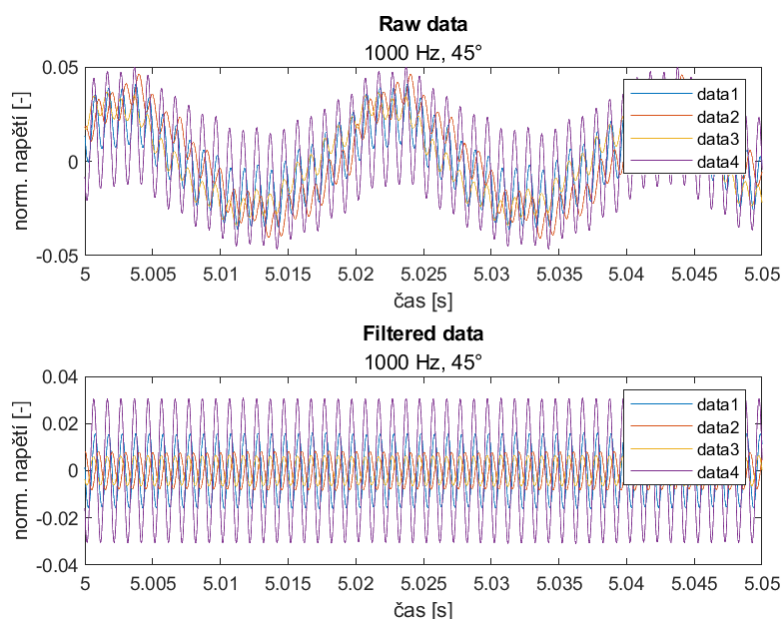
**Obrázek 4.2:** Měřený mikrofon s pevnou dělenou elektrodou

#### 4.1.1 Zpracování výstupu

Výstupní signál z jednotlivých elektrod mikrofonu byl zpracován pomocí matlabu, viz obrázek 4.3. Změřený signál byl zatížen šumem, největší vliv měla síťová frekvence 50 Hz a její násobky, jak je dobře vidět na obrázku 4.4. Před dalším zpracováním byly signály odfiltrovány filtrem pásmová propust.

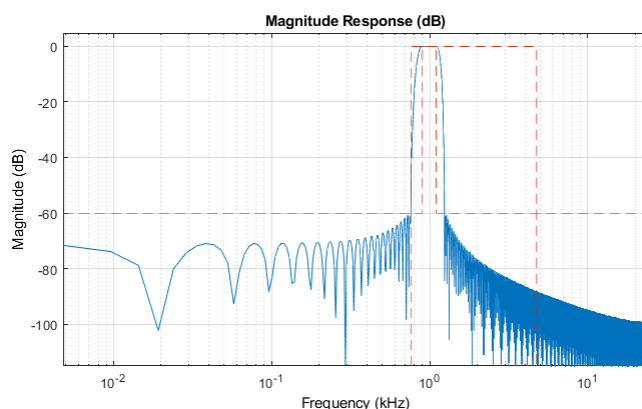


**Obrázek 4.3:** Příklad zpracování signálu



Obrázek 4.4: Signál zatížený šumem - detail

Filtr byl navržen automaticky matlabem pro každou měřenou frekvenci pomocí funkce `bandpass`, které byly zadány následující parametry: Nezpracovaný signál, horní a dolní mezní frekvence  $f_{c1}$  a  $f_{c2}$  a vzorkovací frekvence  $f_s$ . Frekvenční charakteristika filtru navrženého pro signál o frekvenci 1000 Hz s použitými parametry  $f_{c1} = 900$  Hz,  $f_{c2} = 1100$  Hz a  $f_s = 44$  kHz je zobrazena na obrázku 4.5.

Obrázek 4.5: Filtr navržený matlabem pro signál o  $f = 1000$  Hz

## 4.2 Měření směrových charakteristik

Měření bylo provedeno podle postupu uvedeného v [8] a [9]. Jelikož měřicí aparatura již není k dispozici, bylo potřeba ji znovu vyrobit. Dále bylo potřeba upravit matlabovský kód [8] tak, aby byl kompatibilní s novější verzí matlabu.

Pro měření směrových charakteristik mikrofonu byl použit signál swept-sine, který je možné popsat vztahem [10, 11]

$$x(t) = \sin \left\{ 2\pi f_1 L \left[ \exp \left( \frac{t}{L} \right) \right] \right\}, \quad (4.1)$$

kde  $f_1$  je počáteční frekvence a  $L$  je míra růstu frekvence, kterou je možné vypočítat jako

$$L = \frac{1}{f_1} \text{round} \left[ \frac{\hat{T} f_1}{\ln \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} \right],$$

kde  $\hat{T}$  je přibližná doba trvání signálu  $x(t)$ ,  $f_2$  je konečná frekvence a **round** je funkce zaokrouhlující na nejbližší celé číslo. Inverzní spektrum vygenerovaného swept-sine signálu použité pro výpočet frekvenční charakteristiky změřeného signálu je možné analyticky získat pomocí vztahu [10, 11]

$$\tilde{X}(f) = 2\sqrt{\frac{f}{L}} \exp \left\{ -j2\pi f L \left[ 1 - \ln \left( \frac{f}{f_1} \right) \right] + j\frac{\pi}{4} \right\}. \quad (4.2)$$

#### 4.2.1 Měřicí sestava

Hlavní část měřicí sestavy tvoří krokový motor NEMA17, který při měření otáčí s mikrofonem vždy o požadovaný úhel. Motor je řízen driverem DRV8825 přes Arduino UNO, napájen je ze stejnosměrného napětí 12V. Arduino, driver a zdroj stejnosměrného napětí jsou umístěny v plastové krabičce, která má kromě dvou konektorů (připojení motoru k driveru a připojení arduina k počítači) ještě dvě červené LED umístěné v čele krabičky. Pravá LED signalizuje, zda-li je driver v režimu spánku, zatímco levá LED signalizuje bezchybný stav driveru. Jelikož levá LED může svítit pouze v případě, kdy driver není přepnut do režimu spánku (probíhá měření), můžou nastat jen následující stavy<sup>2</sup>:

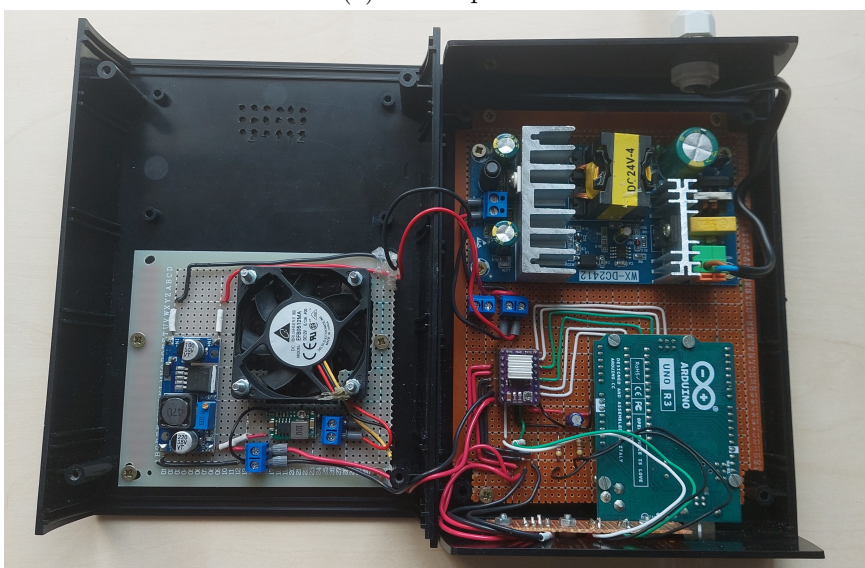
- Obě LED svítí - probíhá měření,
- Pravá LED svítí, ale levá LED nesvítí - driver hlásí chybu<sup>3</sup> během měření,
- Ani jedna LED nesvítí - driver je v režimu spánku, měření neprobíhá.

<sup>2</sup>Za předpokladu, že vše funguje.

<sup>3</sup>Nejčastěji se jedná o přehřátí driveru.



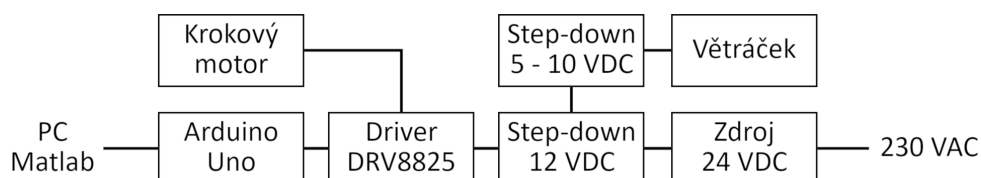
(a) Přední panel



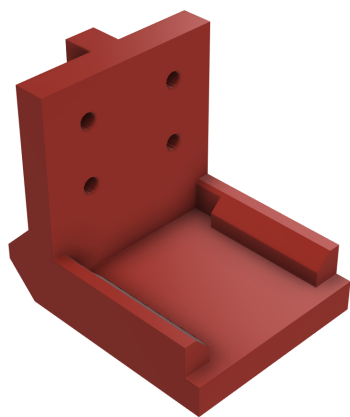
(b) Zapojení

**Obrázek 4.6:** Řídicí jednotka

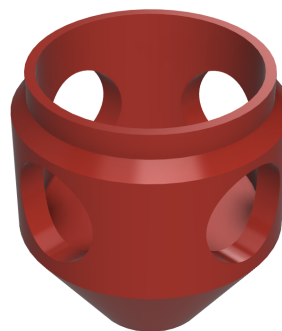
Driver byl původně napájen ze zdroje stejnosměrného napětí 24 V, což způsobovalo jeho přehřátí ještě před dokončením měření. Z tohoto důvodu byl dovnitř krabíčky přidělán větráček, step-down měnič s LM2596, umožňující napájet driver z 12 V a step-down měnič modul [12] pro napájení větráčku. Větráček byl během všech měření odpojen, jelikož byl při vyšších otáčkách hlasitý a mohl tak způsobovat rušení. Snížení napájecího napětí se ukázalo jako dostatečná úprava pro zabránění přehřátí driveru během měření.

**Obrázek 4.7:** Blokové schéma přípravku

Pro přichycení krokového motoru ke stojanu a měřeného mikrofonu k motoru byly s využitím softwaru Autodesk Fusion 360 navrženy a vyrobeny speciální úchyty.



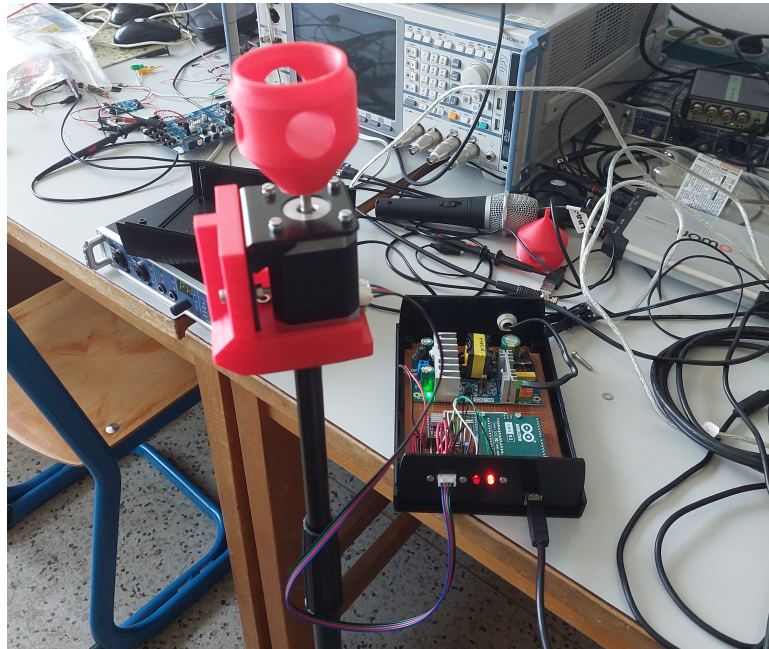
(a) Úchyt krokového motoru



(b) Úchyt mikrofonu

**Obrázek 4.8:** Navržené úchyty pro 3D tisk

Na obrázku 4.9 je vidět sestavená první verze měřicí aparatury, bez přidělaného větráčku a step-down měniče.

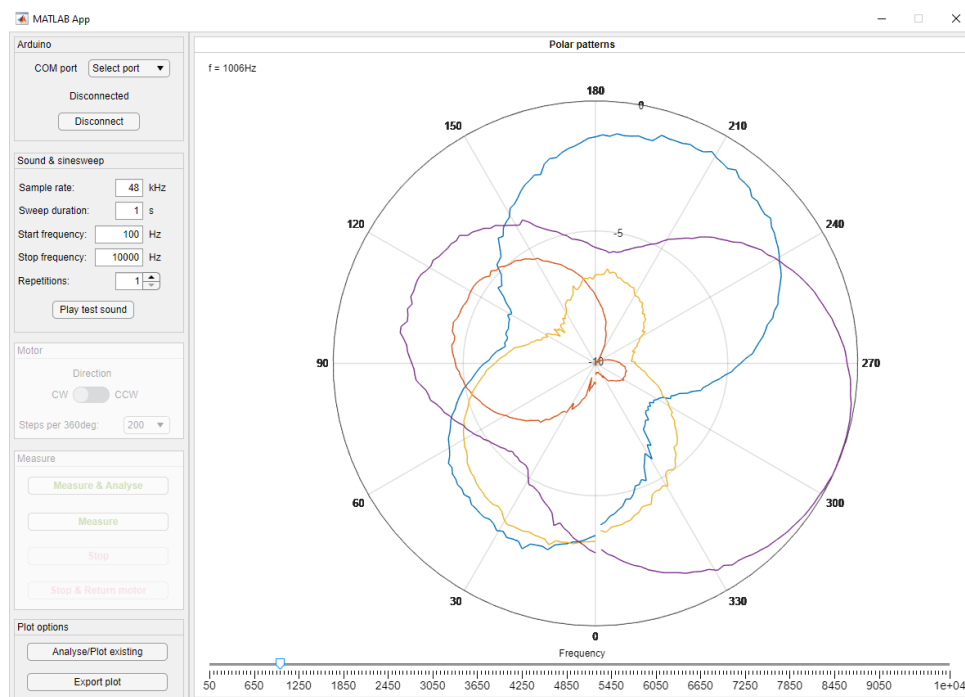


**Obrázek 4.9:** Měřicí sestava



### 4.2.2 GUI a popis algoritmu

Aplikace vytvořená pro měření směrových charakteristik mikrofonů [8] není zcela kompatibilní s nejnovější verzí matlabu. Z tohoto důvodu bylo potřeba v aplikaci provést rozsáhlé úpravy. Jako nejjednodušší varianta se ukázalo vytvoření nového zjednodušeného GUI v matlabu s využitím funkčních částí původního kódu.



Obrázek 4.10: Aplikace pro měření směrových charakteristik

Jednou z výhod této nové aplikace je možnost provést měření, analýzu a vykreslit směrovou charakteristiku stiskem jednoho tlačítka. Dále aplikace nevyžaduje nahrávat výstupní signál mikrofonu externím softwarem, vše probíhá v matlabu. Z důvodu nedostatku času nebylo zatím možné implementovat některé důležité funkce, jako např. výběr a nastavení zvukové karty. Tyto změny je potřeba provádět přímo úpravou kódu.

Tato aplikace vyžaduje několik toolboxů pro její správné fungování, mimo jiné *MATLAB Support Package for Arduino Hardware* pro komunikaci matlabu s arduinem a *Audio Toolbox* pro přehrávání a nahrávání zvuku současně.

Upravený algoritmus je možné zjednodušeně popsat v následujících krocích. *Nastavení:*

- Připojení arduina
- Nastavení swept-sinu
- Výběr směru otáčení a počtu kroků na jednu otočku
- Spuštění měření
- Vygenerování swept-sinu a jeho inverzního spektra

*Měření:*

- Několicí násobné přehrání swept-sinu v každém kroku měření (podle nastavení)
- Záznam přehrávaného swept-sinu do jednoho souboru
- Uložení informace o počtu nahraných vzorků v daném kroku
- Otočení motoru o jeden krok

*Analýza:*

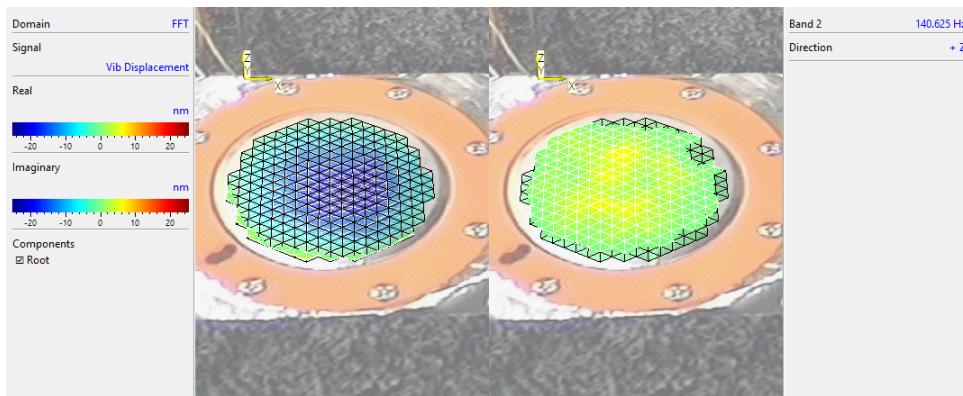
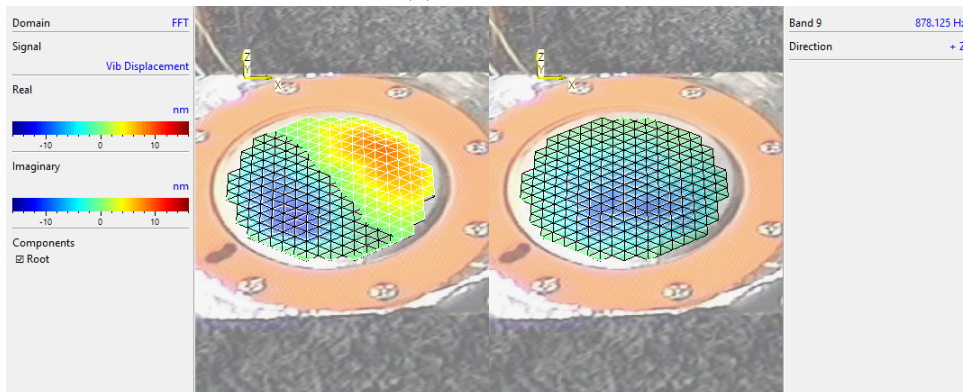
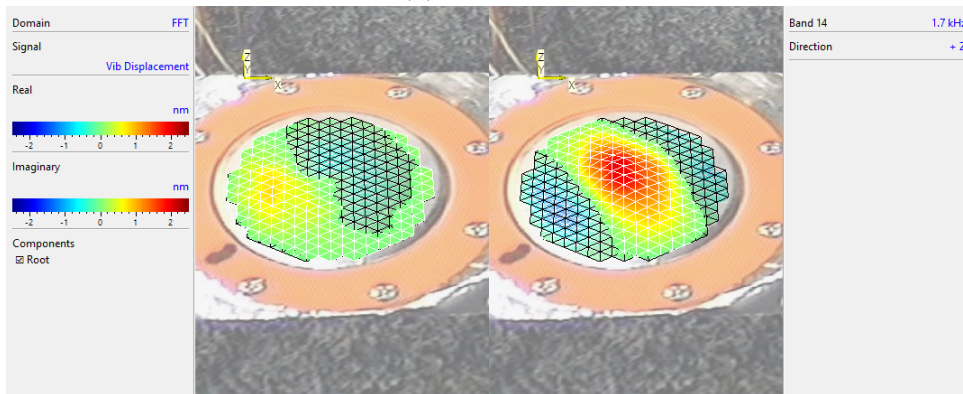
- Výpočet spektra změřeného signálu
- Výpočet frekvenční charakteristiky jako násobek spektra změřeného signálu a inverzního spektra swept-sinu
- Průměrování frekvenčních charakteristik

Směrová charakteristika je poté vykreslena jako absolutní hodnota frekvenčních charakteristik na dané frekvenci v dB, vztažená k maximální absolutní hodnotě těchto frekvenčních charakteristik na dané frekvenci.

Aplikace také umožňuje opětovnou analýzu, resp. vykreslení již změřených, resp. zanalyzovaných dat.

## ■ 4.3 Vibrometr

Pro zobrazení výchylky membrány měřeného mikrofónu byl použit vibrometr Polytec. Membrána mikrofónu byla buzena růžovým šumem, který dosahoval hladiny 94,4 dBA (použitý hlukoměr měřil s aktivovaným váhovacím filtrem A), mikrofón nebyl připojen k polarizačnímu napětí.

(a)  $f = 140 \text{ Hz}$ (b)  $f = 878 \text{ Hz}$ (c)  $f = 1.7 \text{ kHz}$ 

**Obrázek 4.11:** Reálná a imaginární část výchylky membrány změřená vibrometrem

Vibrometrem se podařilo ověřit výstupy numerického modelu popisující tvar výchylky membrány při neuniformním buzení. Na rozdíl od modelu zde není vidět vliv děr v pevné elektrodě.

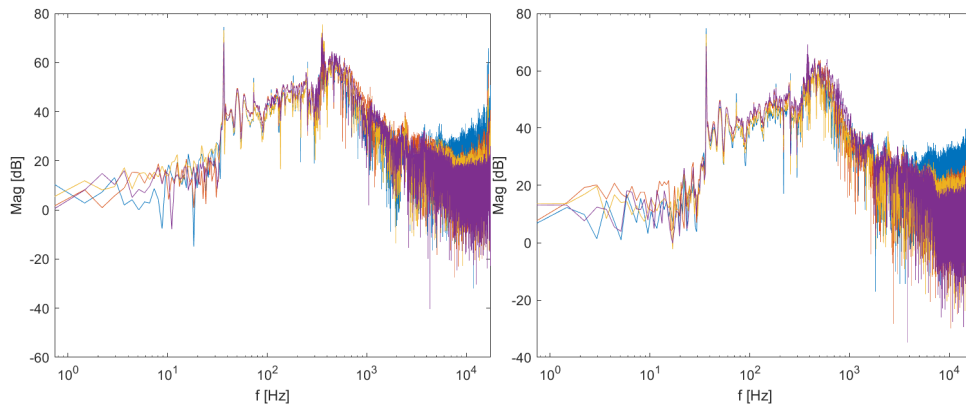
## 4.4 Výsledky měření

Měření směrových charakteristik bylo nejprve provedeno ve studiu bez průměrování, poté v bezodrazové komoře s průměrováním. V obou případech byl použit swept-sine s frekvenčním rozsahem 50 Hz až 10 kHz, vzorkovací frekvence byla 48 kHz.



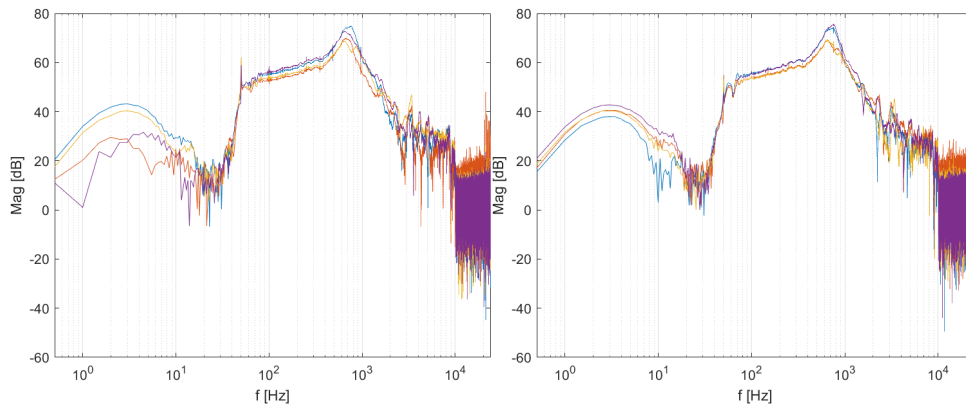
Obrázek 4.12: Měření ve studiu

Frekvenční charakteristika změřená ve studiu bez průměrování (swept-sine délky  $T_p = 1$  s byl přehrán v každém kroku pouze jednou) je zobrazena na obrázku 4.13 pro dva různé úhly. Frekvenční charakteristika na těchto obrázcích je ve sledovaném rozsahu příliš zašuměná. Z tohoto důvodu bylo provedeno druhé měření v bezodrazové komoře, čímž byl eliminován vliv případných odrazů. Další změnou oproti měření ve studiu bylo průměrování výsledných frekvenčních charakteristik a prodloužení doby trvání swept-sinu na  $T_p = 2$  s. Na obrázku 4.14 jsou vidět již nezašuměné frekvenční charakteristiky.



(a) Frekvenční charakteristika,  $\alpha = 0^\circ$  (b) Frekvenční charakteristika,  $\alpha = 90^\circ$

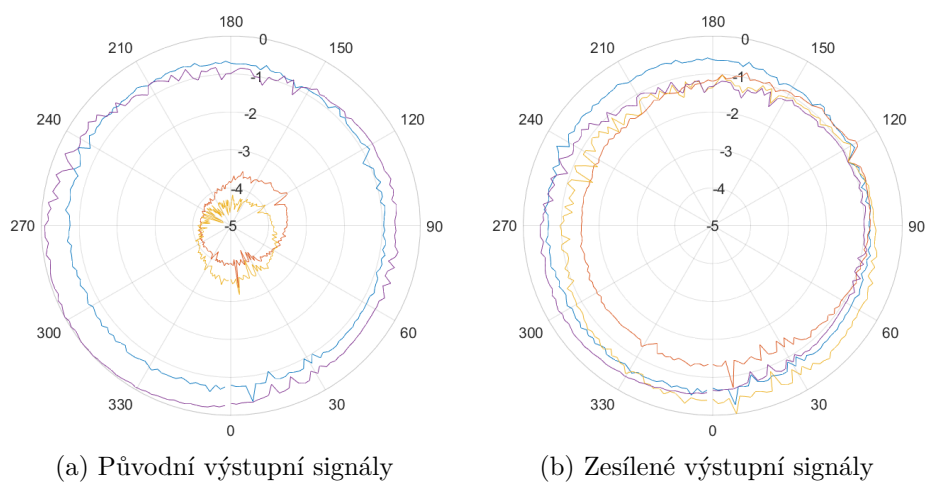
**Obrázek 4.13:** Změřená frekvenční charakteristika pro dva různé úhly



(a) Frekvenční charakteristika,  $\alpha = 0^\circ$  (b) Frekvenční charakteristika,  $\alpha = 90^\circ$

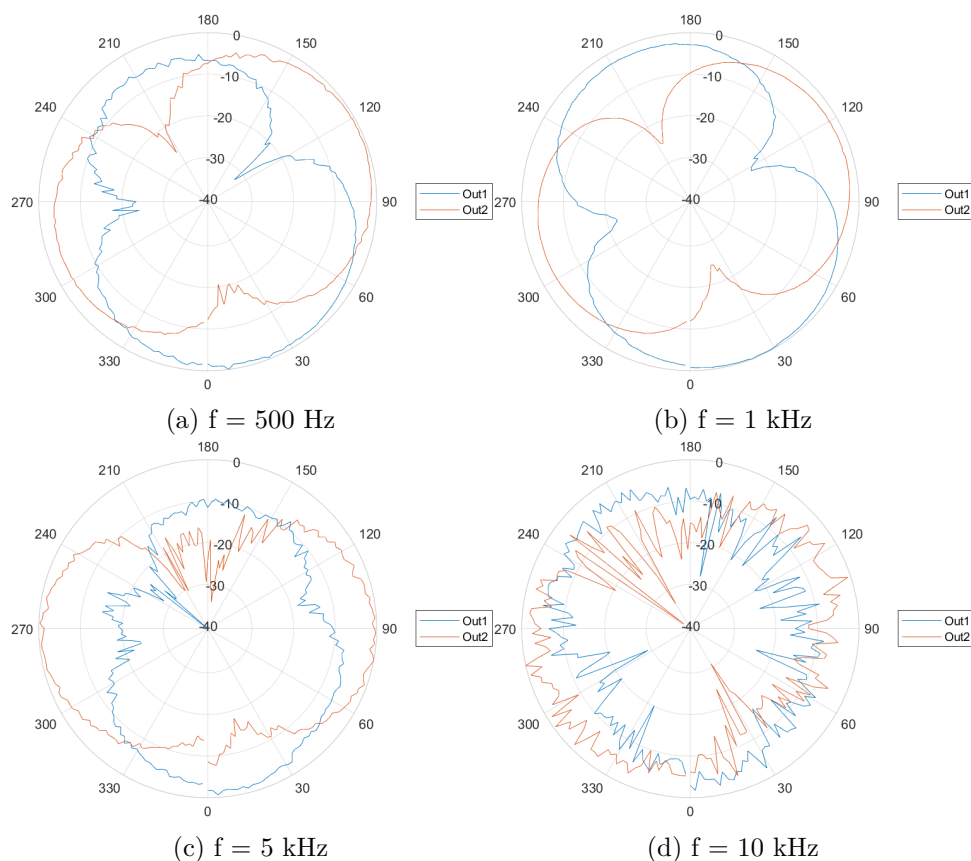
**Obrázek 4.14:** Změřená frekvenční charakteristika pro dva různé úhly - s průměrováním

Na obrázku 4.15 je vidět, že výstupní signály jednotlivých elektrod nemají stejnou úroveň. Před dalším zpracováním naměřených dat byly signály zesíleny o rozdíl hodnot frekvenčních charakteristik v bodě, kde by signály protějších elektrod měly mít podle teorie stejnou úroveň. Tento bod byl odečten z polárního grafu rozdílu absolutních hodnot výstupních signálů protějších elektrod jako minimum na frekvenci 500 Hz.



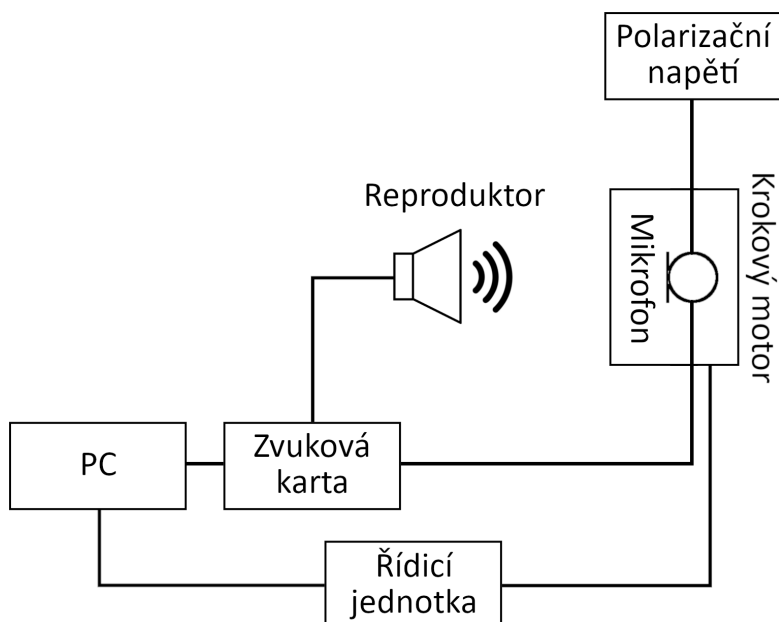
**Obrázek 4.15:** Porovnání směrových charakteristik před a po zesílení výstupních signálů,  $f = 500$  Hz

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny absolutní hodnoty rozdílu změřených výstupů protějších elektrod v závislosti na úhlu  $\alpha$  příchozí akustické vlny. Out1 označuje rozdíl signálů elektrod 1 a 3, Out2 elektrod 2 a 4.



**Obrázek 4.16:** Absolutní hodnota rozdílu výstupů protějších elektrod v dB v závislosti na úhlu  $\alpha$

Absolutní hodnoty rozdílů změřených výstupů protějších elektrod mikrofonu odpovídají teoretickým předpokladům z výsledků numerického modelu. Na vyšších frekvencích jsou frekvenční charakteristiky i po průměrování pořád zašuměné (obrázek 4.14), což má vliv na tvar směrovosti rozdílů výstupů na těchto frekvencích.



**Obrázek 4.17:** Schéma zapojení s měřicí aparaturou





## Kapitola 5

### Závěr

V této práci byl nejprve vytvořen numerický model kondenzátorového mikrofону s dělenou pevnou elektrodou. Na obrázcích 3.9 až 3.24 jsou vidět vypočtené výchylky membrány pro některé úhly příchozí akustické vlny. Na obrázku 3.25 jsou uvedeny vypočtené absolutní hodnoty průměrných výchylek nad jednotlivými elektrodami v závislosti na frekvenci. Vliv směru příchozí vlny budícího tlaku je vidět na obrázku 3.27, který zobrazuje absolutní hodnotu rozdílu průměrných výchylek nad protějšími elektrodami. Z tohoto obrázku vyplývá, že absolutní hodnota rozdílu průměrných výchylek by měla nabývat minima ve chvíli, kdy příchozí akustická vlna přichází přesně kolmo na dvě protější elektrody, tj. na protějších elektrodách je stejná průměrná výchylka.

Porovnáním výstupů numerického modelu pro různé tloušťky vzduchové mezery  $h_g$  (obrázky 3.28 a 3.29) je vidět, že zmenšením vzduchové mezery dojde ke snížení úrovně výstupního signálu. Podle vztahu 2.1 by mělo zmenšením  $h_g$  docházet naopak ke zvýšení úrovně výstupního signálu.

V další části práce bylo provedeno několik měření na zkoumaném mikrofону. Úvodní měření mělo za cíl pouze ověřit funkčnost přípravku a měřitelnost jednotlivých výstupů. Toto měření bylo provedeno na několika frekvencích, změřená data byla zatížena šumem (obrázek 4.4), pro jehož odstranění byl v matlabu navržen filtr (obrázek 4.5).

Pro měření směrových charakteristik podle [8, 9] bylo potřeba nejprve sestavit měřicí aparaturu. Pro přichycení krokového motoru Nema17 ke stojanu a pro přichycení měřeného mikrofону k motoru byly pomocí 3D tisku vytvořeny speciální úchyty (obrázky 4.8 a 4.9). Pro řízení motoru byl použit driver DRV8825, ovládaný z matlabu přes arduino a napájený ze zdroje stejnosměrného napětí 12 V (obrázek 4.6). Uvnitř krabičky je kromě driveru a arduina přichycen i větráček, který byl kvůli rušivému zvuku během všech měření odpojen. Ovládání motoru, přehrávání swept-sinu a nahrávání bylo řízeno vytvořenou aplikací *PolarRecording*, jejíž grafické rozhraní je vidět na obrázku 4.10.

Při prvním měření směrových charakteristik byla sestava umístěna ve studiu. Na obrázku 4.13 jsou vidět frekvenční charakteristiky, které jsou zašuměné. Z tohoto důvodu byla do vytvořené aplikace přidána možnost průměrování. Druhé měření bylo provedeno v bezdrazové komoře, čímž se výrazně sní-

žil vliv odrazů zvuku. Nezašuměné frekvenční charakteristiky jsou vidět na obrázku 4.14. Hlavním výsledkem měření jsou absolutní hodnoty rozdílů výstupních signálů protějších elektrod zobrazené na obrázku 4.16. Z tohoto obrázku je vidět, že nejlépe lze určit směr příchozí akustické vlny na nižších frekvencích, na rozdíl od výsledků numerického modelu.

Na závěr byl ještě použit vibrometr pro změření výchylky membrány mikrofonu buzené růžovým šumem. Reálná a imaginární část výchylky membrány je pro několik frekvencí zobrazena na obrázku 4.11.

Aby bylo možné v budoucnu použít sestavenou měřicí aparaturu a vytvořenou aplikaci pro měření směrových charakteristik i jiných mikrofonů, bylo by vhodné aplikaci ještě upravit a vylepšit. V této chvíli aplikace například neumožňuje změnu použité zvukové karty ani změnu kanálů pro nahrávání, resp. přehrávání zvuku. Jediný způsob, jak tato nastavení změnit je přímou úpravou matlabovského kódu, což není zcela ideální postup.

Pokračováním této práce by mohlo být studium vlivu rozdělení pevné elektrody mikrofonu na větší počet segmentů na přesnost určování směru příchozí akustické vlny, či vytvoření analytického modelu popisujícího výchylku membrány kondenzátorového mikrofonu. K měřicí aparatuře by také bylo vhodné přidat referenční mikrofon pro odstranění vlivu frekvenční charakteristiky použitého reproduktoru na směrovou charakteristiku zkoumaného mikrofonu.



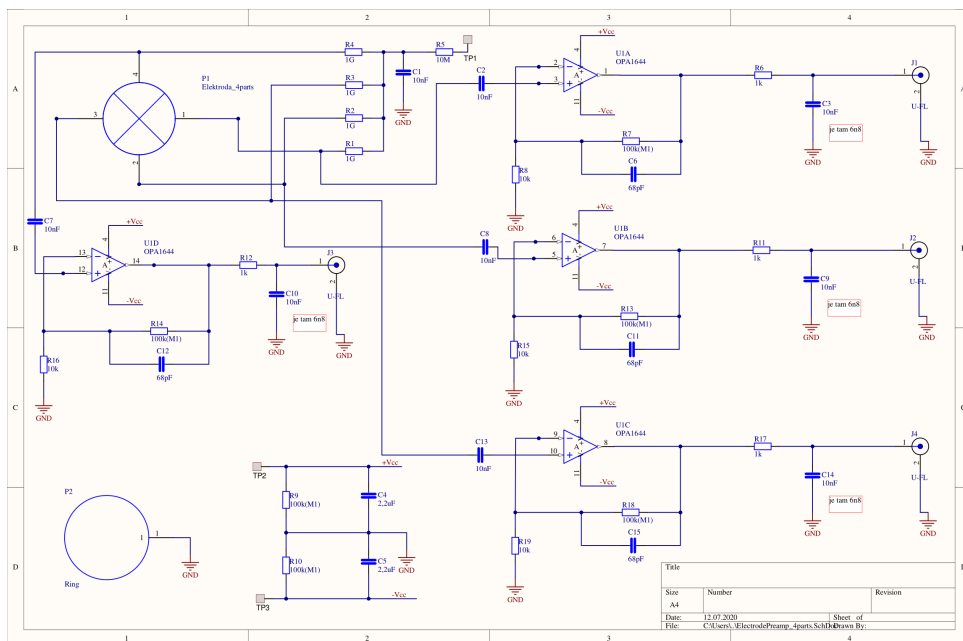
## Literatura

- [1] TUDOR, Dave. Condenser vs. Dynamic Microphones. In: *Making Music Pro* [online]. Zář 2022. [cit. 17.1.2023]. Dostupné z: <https://makingmusicpro.com/condenser-vs-dynamic/>
- [2] NOVAK, Antonin a Petr Honzík. Measurement of nonlinear distortion of MEMS microphones. In: *Applied Acoustics*, 2021, vol. 175, s. 107802. ISSN 0003-682X. DOI 10.1016/j.apacoust.2020.107802
- [3] WHITE, Paul. Q. Are back-electret mics any good? In: *Sound on Sound* [online]. Leden 2014. [cit. 3.11.2022]. Dostupné z: <https://www.soundonsound.com/sound-advice/q-are-back-electret-mics-any-good>
- [4] ŠKVOR, Zbyněk. *Elektroakustika a akustika*. Praha: vydavatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05034-7
- [5] KŘÍŽEK, Michal. Padesát let metody konečných prvků. In: *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [Online]. 1992, vol. 37, s. 129-140. [cit. 17.1.2023] ISSN 0032-2423. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/139386>
- [6] JOLY, Nicolas. Finite Element Modeling of Thermoviscous Acoustics on Adapted Anisotropic Meshes: Implementation of the Particle Velocity and Temperature Variation Formulation. In: *Acta Acustica united with Acustica*, 2010, vol 96, s. 102-114. DOI 10.3813/AAA.918261
- [7] JOLY, Nicolas, Michel BRUNEAU a Romain BOSSART. Coupled Equations for Particle Velocity and Temperature Variation as the Fundamental Formulation of Linear Acoustics in Thermo-Viscous Fluids at Rest. In: *Acta Acustica united with Acustica*, 2006, vol. 92, s. 202-209.
- [8] ŠUPKA, Ondřej. *Měření směrových charakteristik mikrofonů*. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Ing. František Rund, Ph. D.
- [9] ŠUPKA, Ondřej. *Sestava pro měření HRTF*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Ing. František Rund, Ph. D.

- [10] NOVAK, Antonin, Pierrick Lotton a Laurent Simon. Synchronized Swept-Sine: Theory, Application and Implementation. In: *Journal of the Audio Engineering Society*. 2015, vol. 63, s. 786-798. DOI <http://dx.doi.org/10.17743/jaes.2015.0071>
- [11] NOVAK, Antonin. JAES: Synchronized Swept-Sine. In: *ant-novak.com* [online]. Antonin Novak, 2015. [cit. 17.5.2023]. Dostupné z: [https://ant-novak.com/posts/research/2015-10-30\\_JAES\\_Swept/](https://ant-novak.com/posts/research/2015-10-30_JAES_Swept/)
- [12] Eclipsa s.r.o.: Datasheet Mini step-down měnič [online.] [cit. 20.5.2023]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/1/1186/1524639436.pdf>
- [13] CUI INC: Datasheet NEMA 17 42HD8011-01 [online]. [cit. 20.5.2023]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1061518/CUI/NEMA17-13-04PD-AMT112S.html>
- [14] Eclipsa s.r.o.: Datasheet Stepdown nastavitelný měnič s LM2596 DC-DC [online.] [cit. 20.5.2023]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/1/1243/1463386307.pdf>
- [15] MERHAUT, Josef. *Teoretické základy elektroakustiky*. 4. vydání. Praha: Academia, 1985.
- [16] PLAČEK, Jan. *Vlastnosti miniaturních mikrofonů*. Praha, 2022. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta. Vedoucí práce Ing. Petr Honzík, Ph.D.
- [17] Texas Instruments: Datasheet DRV8825 Stepper Motor Controller IC [online]. [cit. 20.5.2023] Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/835822/TI1/DRV8825.html>

# Příloha A

## Schéma zapojení měřeného mikrofonu



Obrázek A.1: Schéma zapojení měřeného mikrofonu



## Příloha B

### Popis důležitých částí upraveného kódu

#### B.1 swept-sine

Funkce `generate_sine_sweep` se nachází v samostatném souboru `generate_sine_sweep.m`. Výstupní signál `sweep` a jeho inverzní spektrum `X` jsou vygenerovány podle vztahů 4.1 a 4.2.

```
function [sweep,t,X]= generate_sine_sweep(fs,Tp,f1,
    f2)
```

```
L = 1/f1*round(Tp*f1/(log(f2/f1)));
```

```
sweep = sin(2*pi*f1*L*(exp(t/L))).';
```

```
X = 2*sqrt(ff/L).*exp(-1i*2*pi*ff*L.*(1-log(ff/f1))
    +1i*pi/4);
```

#### B.2 Aplikace PolarRecording

Aplikace byla vytvořena pomocí app designeru v matlabu a následně vyexportována jako `PolarRecording.m`.

##### B.2.1 Připojení arduina

Načtení dostupných portů:

```
ports = serialportlist("available");
```

Připojení k arduinu:

```
app.myArduino = arduino(app.port,'Uno');
```

## ■ B.2.2 Nastavení swept-sinu

Stisknutí tlačítka `play test sound` vygeneruje swept-sine na základě uživatelem zadaných hodnot. Vygenerovaný signál ani načtené hodnoty se nikam neukládají.

```
sampleRate1 = app.SamplerateEditField.Value*1000;
sweepDuration1 = app.SweepDurationEditField.Value;
freqRange1 = [app.StartFreqEditField.Value,app.
    StopFreqEditField.Value];
[sinesweep1,~,~] = generate_sine_sweep(sampleRate1,
    sweepDuration1,freqRange1(1),freqRange1(2));
repets = app.RepetitionsSpinner.Value;
player = audioplayer(sinesweep1,sampleRate1);
for i = 1:repets
    playblocking(player)
end
```

## ■ B.2.3 Měření

Měření obstarává funkce `Measure`.

```
function [name2,date] = Measure(app)
```

Nastavení jednotlivých pinů arduina:

```
writeDigitalPin(app.myArduino,app.pin_DIR,1);

writeDigitalPin(a,app.pin_M0,0);
writeDigitalPin(a,app.pin_M1,0);
writeDigitalPin(a,app.pin_M2,0);
```

Vygenerování unikátních jmen souborů:

```
date = string(datetime);
date = erase(date,["-"," ",":"]);
name1 = "sinesweep_" + date + ".wav";
name2 = "recorded_" + date + ".wav";
```

Vytvoření a nastavení objektu typu `audioPlayerRecorder`, který umožňuje přehrávat a nahrávat zvuk současně:

```
playRec = audioPlayerRecorder('Device','ASIO
    Fireface USB','SampleRate',app.sampleRate,'
    BitDepth','24-bit integer','BufferSize',app.
    bufferSize);
playRec.PlayerChannelMapping = 1;
playRec.RecorderChannelMapping = [5 6 7 8];
app.num_of_channels = size(playRec.
    RecorderChannelMapping,2);
```



```
fileWriter = dsp.AudioFileWriter(name2, 'SampleRate',
    app.sampleRate);
fileReader = dsp.AudioFileReader(name1);
```

Přehrávání a nahrávání probíhá po každém otočení krokového motoru. Do proměnné `sampleCountInStep` se ukládá počet načtených vzorků v *i*-tém kroku měření při *k*-tém přehrávání sweepu v daném kroku. Jelikož použitý driver neumožňuje provést měření v méně než 200 krocích na otáčku, je měření provedeno pouze v některých krocích.

```
while ~isDone(fileReader)
    audioToPlay = fileReader();
    [recorded,~,~] = playRec(audioToPlay);
    fileWriter(recorded);
    app.sampleCountInStep(i/steps_between,k) =
        app.sampleCountInStep(i/steps_between,k)
        + 1;
end
```

Otočení motorem o jeden krok:

```
writeDigitalPin(a, app.pin_STP, 1);
pause(pausetime)
writeDigitalPin(a, app.pin_STP, 0);
pause(pausetime+0.1)
```

Uložení dat potřebných pro analýzu změřeného signálu:

```
name3 = "measurementDATA_" + date + ".mat";
save(name3, 'sampleCount', 'freq_range', 'date', '
    name1', 'name2', 'numof_channels', 'ppSampleRate', '
    steps', 'X2', 'repets');
```

## ■ B.2.4 Analýza

Funkce `Analyse` provádí analýzu změřeného signálu. Vstupem je nahraný signál `recording` importovaný z `.wav` souboru a datum měření `date`.

```
function Analyse(app, recording, date)
```

Vybrání části signálu nahrané v *i*-tém kroku měření:

```
sig = recording(sig_pos+1:sig_pos + sum(app.
    sampleCountInStep(i,:)),:);
sig_pos = sig_pos + sum(app.sampleCountInStep(i,:));
```

Vybrání části signálu pro *k*-té opakování sweep-sinu:

```
sig_cut = sig(pos_k+1:pos_k + app.sampleCountInStep(
    i,k),ch);
pos_k = pos_k + app.sampleCountInStep(i,k);
```

Výpočet frekvenční charakteristiky změřeného signálu pro každé opakování swept-sinu:

```
Y = fft(sig_cut,n);
Y = Y(1:n/2+1);
frequencyResponse = app.X.*Y.';
frequencyResponse = frequencyResponse(1:ceil(n/2+1))
;
frequencyResponse(2:end-1) = 2*frequencyResponse(2:
end-1);
freqResp_mean(:,k) = frequencyResponse;
```

Průměrování spektra v i-tém kroku:

```
app.polarPattern(1:max(size(freqResp_mean)),ch,i) =
mean(freqResp_mean,2);
```

Uložení dat potřebných k vykreslení směrových charakteristik:

```
name3 = "polarPatterns_" + date + ".mat";
save(name3,'ppExport','freq_range','date','
ppSampleRate','steps');
```

## ■ B.2.5 Vykreslení směrových charakteristik

Funkce PlotPolarPatterns vykresluje směrové charakteristiky na požadované frekvenci freq\_to\_plot.

```
function PlotPolarPatterns(app,freq_to_plot,date)
```

Vytvoření vektoru směrových charakteristik rho:

```
step = app.sampleRate/(2*max(size(app.polarPattern))
); %*2 because its only one sided spectrum
pos = round(freq_to_plot/step+1);
app.graph_rho = abs(squeeze(app.polarPattern(pos
,:,:)));
ref_max = max(app.graph_rho,[],'all');
app.graph_rho = mag2db(app.graph_rho./ref_max);
```

Vykreslení směrových charakteristik:

```
polarplot(pax,app.graph_theta,app.graph_rho);
pax.ThetaDir = 'clockwise';
pax.ThetaZeroLocation = 'bottom';
rlim(pax,[-inf 0])
```

## Příloha C

### Návod k měření

#### C.1 Software

Před spuštěním aplikace je nutné nastavit zvukovou kartu úpravou matlabského skriptu *PolarRecording.m*. Seznam dostupných zařízení pro nahrávání a přehrávání zvuku je možné zobrazit příkazem `getAudioDevices(audioPlayerRecorder)`. Na obrázku C.1 je zobrazeno nastavení zvukové karty Fireface UCX následujícím způsobem:

- Uložení názvu zvukové karty do proměnné `DeviceName`,
- Nastavení kanálů určených pro přehrávání zvuku `playRec.PlayerChannelMapping` a
- Nastavení kanálů určených pro nahrávání zvuku `playRec.RecorderChannelMapping`.

```
218 % setup audioplayerrecorder object
219 DeviceName = 'ASIO Fireface USB';
220 playRec = audioPlayerRecorder('Device',DeviceName,...
221                               'SampleRate',app.sampleRate,...
222                               'BitDepth','24-bit integer',...
223                               'BufferSize',app.bufferSize);
224 playRec.PlayerChannelMapping = 1; % on fireface output 1
225 playRec.RecorderChannelMapping = [5 6 7 8]; % on fireface inputs 5-7
```

**Obrázek C.1:** Nastavení zvukové karty Fireface UCX

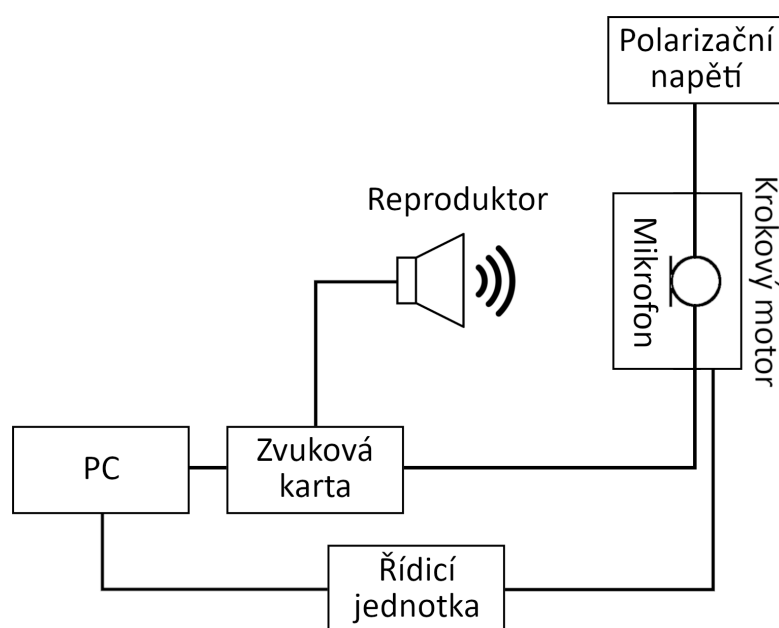
Pro správné fungování aplikace je důležité, aby byly soubory *PolarRecording.m* a *generate\_sine\_sweep.m* umístěny ve stejném adresáři. Dále je potřeba mít nainstalovaný toolbox *MATLAB Support Package for Arduino Hardware* pro komunikaci matlabu s arduinem.

## C.2 Zapojení

Doporučený postup zapojení jednotlivých částí měřicí aparatury:

- Připojení zvukové karty k počítači (pokud se jedná o externí zvukovou kartu)
- Připojení mikrofону a reproduktoru ke zvukové kartě
- Připojení krokového motoru k řídicí jednotce
- Připojení počítače k řídicí jednotce
- Zapojení napájení řídicí jednotky

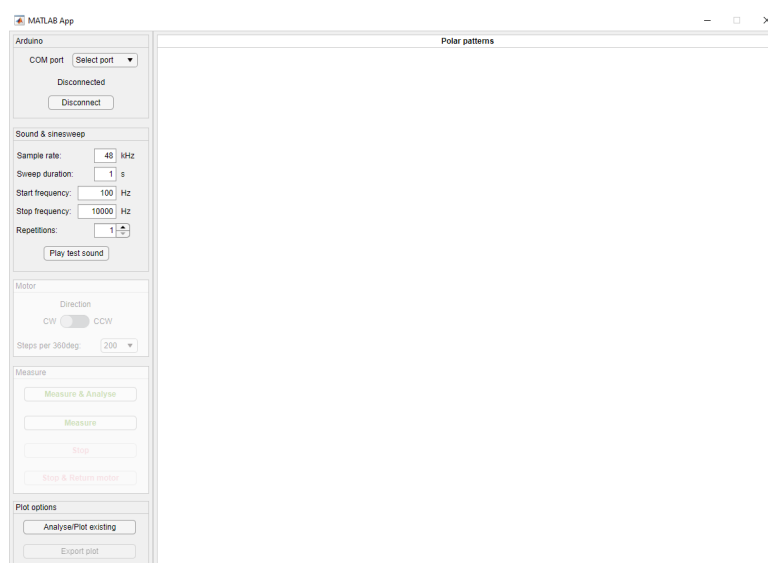
Použitá zvuková karta musí být schopna přehrávat a nahrávat zvuk zároveň.



**Obrázek C.2:** Příklad zapojení - měření směrových charakteristik kondenzátorového mikrofónu

## C.3 Měření a analýza

Aplikaci je možné spustit jako běžný matlabovský skript kliknutím na tlačítko Run all sections na záložce Editor. Po spuštění aplikace se otevře GUI, kde je možné si před spuštěním měření navolit požadované parametry.



Obrázek C.3: Aplikace - GUI

Pro připojení k arduinu je potřeba vybrat správný port kliknutím na drop-down menu *Com port*. V nabídce jsou zobrazeny pouze porty, na nichž bylo detekováno arduino, ke kterému se lze připojit. Po prvním spuštění aplikace může připojení trvat až několik minut, než se do arduina nahraje potřebný software.

Na panelu *Sound & sinesweep* je možné nastavit požadované parametry swept-sinu a počet opakování swept-sinu při jednotlivých krocích měření (průměrování frekvenčních charakteristik). Pro otestování reproduktoru a parametrů swept-sinu slouží tlačítko *Play test sound*, které přehraje vygenerovaný swept-sine.

Panel *Motor* umožňuje změnit směr otáčení motoru a počet bodů měření z předdefinované nabídky.

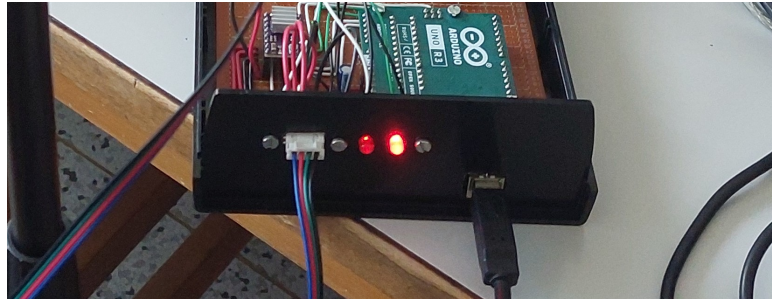
Stisknutím tlačítka *Measure & Analyse* se spustí se 30vteřinovým zpožděním měření a následná analýza, tlačítko *Measure* provede pouze měření bez analýzy. Měření lze přerušit pomocí tlačítek *Stop* a *Stop & return motor*, kde to druhé tlačítko ještě navíc vrátí motor do původní pozice.

Na předním panelu řídicí jednotky jsou umístěny dvě signalizační LED, které mohou svítit pouze během měření. Pravá LED signalizuje režim spánku driveru, levá signalizuje bezchybný stav driveru. Jelikož levá LED může svítit pouze v případě, kdy driver není přepnut do režimu spánku (probíhá měření), můžou nastat jen následující stavy<sup>1</sup>:

- Obě LED svítí - probíhá měření,
- Pravá LED svítí, ale levá LED nesvítí - driver hlásí chybu<sup>2</sup> během měření,
- Ani jedna LED nesvítí - driver je v režimu spánku, měření neprobíhá.

<sup>1</sup>Za předpokladu, že vše funguje

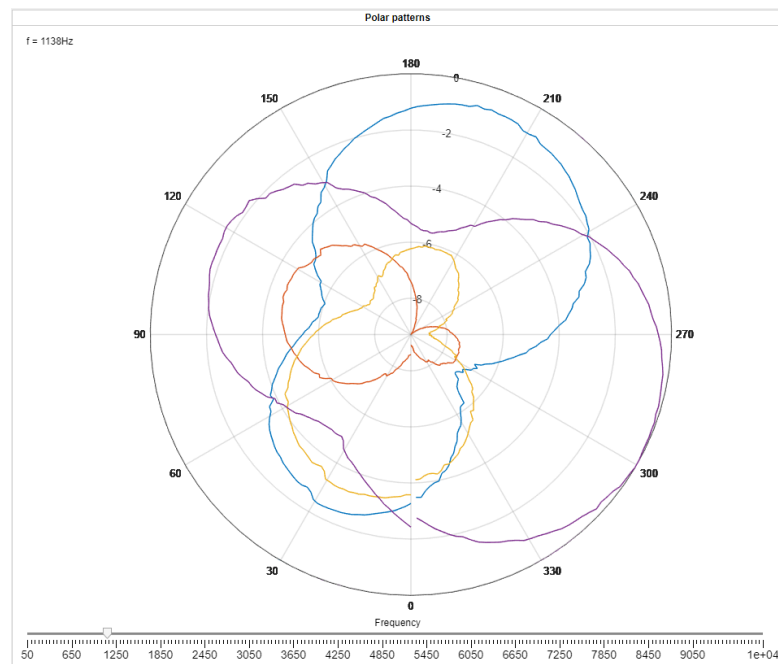
<sup>2</sup>Nejčastěji se jedná o přehřátí driveru



Obrázek C.4: Přední panel - signalizační LED

Po úspěšném dokončení měření i analýzy dojde k uložení několika souborů, které jsou nezbytné pro analýzu změřených dat a vykreslení směrových charakteristik. Soubory jsou označeny datem spuštění měření v názvu souboru ve formátu *\*\_DDMonthYYYYHHMMSS.\** (například swept-sine vygenerovaný při měření spuštěném 17.5.2023 v 11:01:39 bude uložen v souboru *sinesweep\_17May2023110139.wav*).

Směrové charakteristiky budou vykresleny automaticky po dokončení analýzy dat. Sliderem pod vykreslenou směrovou charakteristikou je možné si vybrat požadovanou frekvenci v rozsahu uvedeném při vygenerování swept-sinu. Stisknutím tlačítka **Export plot** dojde k uložení aktuálně vykreslených charakteristik ve formátech *\*.png* (obrázek) a *\*.txt* (data).



Obrázek C.5: Vykreslená směrová charakteristika mikrofonu se čtyřmi výstupy







## Příloha D

### Datové přílohy

- 3D\_tisk
  - MicHolderInverted.f3d.....úchyt mikrofonu
  - MicHolderInverted.sat.....úchyt mikrofonu
  - MotorAttach.f3d.....úchyt krokového motoru
  - MotorAttach.sat.....úchyt krokového motoru
- Aplikace
  - generate\_sine\_sweep.m..... funkce na generování sweepu
  - Navod\_k\_mereni.pdf..... návod k měření
  - PolarRecording.m..... aplikace
- Namerena\_data
  - Smerove\_charakteristiky
    - measurementDATA\_11May2023152024.mat..... pomocná data
    - measurementDATA\_17May2023110139.mat
    - recorded\_11May2023152024.wav..... nahraný signál
    - recorded\_17May2023110139.wav
    - sinesweep\_11May2023152024.wav... vygenerovaný swept-sine
    - sinesweep\_17May2023110139.wav
  - Vibrometr
    - memr5\_1.7\_kHz.txt
    - memr5\_3.478125\_kHz.txt
    - memr5\_140.625\_Hz.txt
    - memr5\_878.125\_kHz.txt