

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Vlastnosti miniaturních mikrofonů

Jan Plaček

Vedoucí: Ing. Petr Honzík, Ph.D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Plaček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **492015**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vlastnosti miniaturních mikrofonů

Název bakalářské práce anglicky:

Properties of Miniature Microphones

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s principy a teorií elektrostatických měničů a specifiky miniaturních mikrofonů. Sestavte teoretický model mikrofonu s grafickým uživatelským rozhraním. Prozkoumejte závislost citlivosti mikrofonu na změně geometrických a mechanických parametrů. Provedte měření na vzorcích miniaturních mikrofonů včetně MEMS mikrofonů s digitálním výstupem, seznamte se s formáty digitálního výstupu. Za použití známých a odhadnutých parametrů mikrofonu porovnejte naměřené výsledky s výsledky modelu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Škvor, Z.: Vibrating systems and their equivalent circuits, Elsevier, Amsterdam (1991).
[2] Škvor, Z.: Elektroakustika a akustika, ČVUT, Praha (2012).

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Petr Honzík, Ph.D. UBI FD ČVUT

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

Datum zadání bakalářské práce: **27.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

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 poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Petru Honzíkovi, Ph.D. za cenné rady, odborný dohled a vstřícnost 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.

Abstrakt

Práce se zabývá popisem modelu MEMS elektrostatičkého mikrofonu. Vychází se z teorie položené Zdeňkem Škvorem v knize *Elektroakustika a akustika* z roku 2012. Celý model je postaven na výpočtu průměrné výchylky, ze které získáváme důležité veličiny týkajících se mikrofonů, z celkové impedance náhradního obvodu elektrostatičkého mikrofonu, abychom mohli vypočítat citlivost mikrofonu.

Klíčová slova: MEMS, náhradní obvod mikrofonu, mikrofony, frekvenční charakteristika

Vedoucí: Ing. Petr Honzík, Ph.D.

Abstract

The work deals with the description of model of the MEMS microphone of an electrostatic microphone. It is based on the theory put forward by Zdeněk Škvor in the book *Elektroakustika a akustika* from 2012. The whole model operates on the calculation of the average displacement, from which we obtain important quantities related to microphones, from the total impedance of the electrostatic microphone replacement circuit to provide us to count the sensitivity of microphone.

Keywords: MEMS, equivalent circuit of microphone, microphones, frequency response

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
2 Teoretická část	3
2.1 Teoretický model mikrofonu	3
2.1.1 Elektrostatický mikrofon	3
2.1.2 Citlivost mikrofonu	4
2.1.3 Výchylka kruhové membrány	5
2.1.4 Průměrná výchylka membrány	5
2.1.5 Náhradní obvod mikrofonu	5
2.2 Numerický model mikrofonu	8
2.2.1 Slabé řešení diferenciální rovnice	8
2.2.2 Akustická formulace v termoviskozním plynu	9
3 Výsledky modelů	11
3.1 Vliv parametrů náhradního obvodu na citlivost mikrofonu	12
3.2 Porovnání modelů mikrofonu s neděrovanou pevnou elektrodou	14
3.3 Porovnání modelů mikrofonu s děrovanou pevnou elektrodou	16
3.4 Grafické uživatelské rozhraní	19
4 Praktická část	21
4.1 Formáty digitálních výstupů MEMS mikrofونů	21
4.1.1 PDM výstupní signál	21
4.1.2 I2S výstupní signál	22
4.1.3 TDM výstupní signál	23
4.2 Frekvenční charakteristiky	24
4.2.1 ICS-41352	25
4.2.2 ICS43432 a SPH0645LM4H-B	26
4.3 Měření rezonance a napětí membrány	27
4.4 Porovnání naměřených hodnot s výsledky modelů	29
5 Závěr	31
Literatura	33
A Rezonanční frekvence piezoelektrického měniče	35
B Seznam datových příloh	37
Složka COMSOL	37
Složka GUI	37
Složka Modely	37
Složka Piezoměnič	38

Obrázky

1.1 Výroba mikrofonů v milionech od roku 2005. [1]	1	3.13 GUI modelu mikrofonu.	20
2.1 Řez elektrostatickým mikrofonem.	3	4.1 Výstupní PDM signál mikrofonu SPH0641LU4H-1. [10]	22
2.2 Průměrná výchylka membrány ve vakuu, z rovnice 2.11.	6	4.2 Naměřený PDM signál a signál hodin.	22
2.3 Náhradní obvod kruhové membrány. [4]	7	4.3 Výstupní I2S signál mikrofonu ICS-43432. [11]	22
2.4 Náhradní obvod mikrofonu.	8	4.4 Naměřený výstupní I2S signál mikrofonu ICS-43432 - červeně SCK a žlutě WS.	23
3.1 Citlivost mikrofonu.	12	4.5 Naměřený výstupní I2S signál mikrofonu ICS-43432 - žlutě WS a červeně výstupní data.	23
3.2 Citlivosti mikrofonu při různých hodnotách parametrů mikrofonu		4.6 Zapojení mikrofonů na TDM sběrnici. [12]	24
a) mechanického napětí membrány		4.7 Celkový přehled časového diagramu TDM sběrnice. [12]	24
b) tloušťky mezery mezi elektrodami		4.8 Detail na 1 časové okno TDM sběrnice. [12]	24
c) objemu zadní dutiny mikrofonu.	13	4.9 Schéma měřicí aparatury pro frekvenční charakteristiky.	25
3.3 Citlivost mikrofonu pomocí náhradního obvodu, kompletního analytického a numerického modelu.	14	4.10 Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352	25
3.4 Citlivost mikrofonu pomocí náhradního obvodu, kompletního analytického a numerického modelu - detail na nízké frekvence.	15	4.11 Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352 - detail na rezonanční frekvenci.	26
3.5 Změna tlaku v dutinách mikrofonu se znázorněnou výchylkou membrány na frekvenci 209 kHz, měřítko v Pa.	15	4.12 Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352 - z katalogového listu. [13]	26
3.6 Změna teploty v dutinách mikrofonu na frekvenci 305 kHz, měřítko v K.	16	4.13 Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352 - z katalogového listu. [13]	26
3.7 Změna akustické rychlosti v dutinách mikrofonu na frekvenci 305 kHz, měřítko v m/s.	16	4.14 Frekvenční charakteristika mikrofonů ICS43432-I1, ICS43432-I6 a SPH0645LM4H-B.	27
3.8 Změna akustické rychlosti v dutinách mikrofonu na frekvenci 489 kHz, měřítko v m/s.	17	4.15 Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS43432 - z katalogového listu. [11]	27
3.9 Změna teploty v dutinách mikrofonu na frekvenci 489 kHz, měřítko v K.	17	4.16 Frekvenční charakteristika mikrofonu SPH0645LM4H-B - z katalogového listu. [14]	27
3.10 Změna akustického tlaku v prostoru mezi elektrodami na frekvenci 10 kHz, měřítko v Pa.	18	4.17 Frekvenční charakteristika SPH0641LU4H-1 mikrofonu připevněném na piezoelektrickém měničiči ve vakuu.	28
3.11 Změna akustického tlaku v prostoru mezi elektrodami na frekvenci 489 kHz, měřítko v Pa.	18		
3.12 Citlivost mikrofonu s děrovanou a neděrovanou pevnou elektrodou - 3D model s děrovanou elektrodou.	19		

4.18 Frekvenční charakteristika SPH0641LU4H-1 mikrofonu přípevněném na piezoelektrickém měničích ve vakuu - detail rezonance mikrofonu.	28
4.19 Schéma měřicí aparatury.	29
4.20 Normalizovaná frekvenční charakteristika mikrofonu ICS43432 - I1 s modelem mikrofonu.	29
A.1 Rezonanční frekvence piezoelektrického měniče.	35

Tabulky

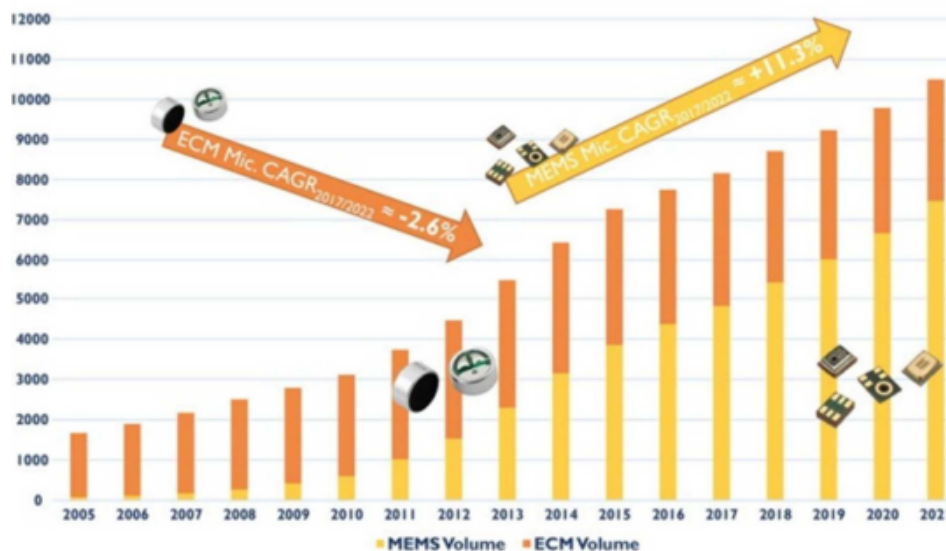
3.1 Parametry vzduchu.	11
3.2 Parametry mikrofonu.	11
4.1 Odhadnuté parametry mikrofonu ICS43432-I1.	30

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivace

S novou dobou přichází miniaturizace téměř všeho, včetně akustických prvků a jejich použití. Již od roku 2013, do současnosti, se výroba MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) mikrofونů zvyšuje každým rokem ve stovkách milionů jednotek o 11,3 %, jak je vidět na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Výroba mikrofونů v milionech od roku 2005. [1]

MEMS mikrofony mají mnoho pozitivních vlastností jakými jsou např. snadná výroba mnoha kusů naráz, malá velikost a menší citlivost na mechanické otřesy [1].

V dnešní době se vyrábí 2 druhy SMD (Surface Mounted Devices) mikrofونů: top a bottom port. Liší se v umístění otvoru kudy přichází tlak. Funkce a kvalita obou typů je stejná, avšak mikrofون typu bottom je v praxi více používán a to z důvodu menší poruchovosti membrány mikrofону při podtlakovém posazování součástky na desku.

Pro pochopení jak tyto mikrofony fungují musíme začít od úplných základů

elektrostatického pole a to změnou kapacity mezi elektrodami kondenzátoru a následně zjistit citlivost mikrofону, pro kterou budeme muset vypočítat průměrnou výchylku membrány.

Kapitola 2

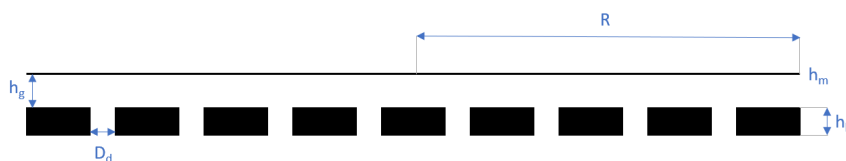
Teoretická část

2.1 Teoretický model mikrofonu

Kapitola 2 pojednává o analytickém řešení vlnové rovnice a z ní získané klíčové veličiny pro popis chování mikrofonu jako jsou průměrná výchylka membrány nebo citlivost mikrofonu.

2.1.1 Elektrostatický mikrofon

Elektrostatické mikrofony fungují na principu akustické změny tlaku rozkmitávající membrány mikrofonu, což je zároveň elektroda kondenzátoru. Tato elektroda je pohyblivá, vodivá a nejčastěji připojená na zem. Pevná elektroda je připojena k polarizačnímu napětí U_0 . Výchylka kmitající membrány vyvolá změnu kapacity, která se poté převádí na elektrický signál tak, že napětí na pohyblivé membráně je snímáno předzesilovačem s velkou vstupní impedancí.



Obrázek 2.1: Řez elektrostatickým mikrofonem.

Na obrázku 2.1 je vidět řez středem obou elektrod mikrofonu, kde R je poloměr pohyblivé membrány, h_g je tloušťka vzduchové mezery mezi elektrodami, D_d je průměr děr v pevné elektrodě, h_m je tloušťka pohyblivé membrány a h_h je tloušťka pevné elektrody, též hloubka děr.

Náboj na kondenzátoru je dán vztahem $Q = CU$, kde U je napětí na kondenzátoru a C je statická kapacita, která se skládá z aktivní statické kapacity C_0 a parazitní kapacity C_p . Aktivní statická kapacita je dána vztahem $C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{h_g}$,

kde S je aktivní plocha kondenzátoru (překryv membrány a pevné elektrody) a ε_0 je permitiva prostředí.

Totální diferenciál náboje se může vyjádřit jako [2]

$$dQ = dCU + CdU. \quad (2.1)$$

Pokud zavedeme $dU \approx u$, kde u je výstupní napětí, pro které platí $u \ll U_0$, můžeme dále závest $U \approx U_0$ a protože polarizační napětí je vedeno přes rezistor v řádech giga ohmů, tak protékající proud $I = U_0/R$ je téměř nulový a proto platí $dQ \approx 0$, můžeme psát zjednodušený vztah pro výstupní napětí [2]

$$u = -U_0 \frac{dC}{C}. \quad (2.2)$$

Změna kapacity v čase je dána změnou průměrné výchylky membrány $\tilde{\xi}(t)$, proto [2]

$$C_t(t) = C_p + \frac{\varepsilon_0 S}{h_g + \tilde{\xi}(t)} = C_p + C_0 \frac{1}{1 + \frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g}}. \quad (2.3)$$

Pomocí Taylorova rozvoje funkce $\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + x^4 - \dots$ a předpokladu, že celková kapacita je $C_t(t) = C_p + C_0 + dC(t)$, můžeme změnu celkové kapacity vyjádřit jako [2]

$$dC(t) = -C_0 \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} - \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} \right)^3 - \dots \right). \quad (2.4)$$

Dosažením změny celkové kapacity do rovnice 2.2 nám vyjde, že výstupní napětí elektrostatického mikrofonu se rovná

$$u(t) = U_0 \frac{C_0}{C_p + C_0} \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} - \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g} \right)^3 - \dots \right). \quad (2.5)$$

V této práci se dále zabýváme pouze lineárním modelem mikrofonu, tudíž členy v rovnici 2.5 $\frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g}$ umocněné vyšším číslem než je 1 zanedbáme a také pro zjednodušení vynecháme parazitní kapacitu mikrofonu C_p . Po této úvaze se výstupní napětí zjednoduší a platí

$$u(t) = U_0 \frac{\tilde{\xi}(t)}{h_g}. \quad (2.6)$$

■ 2.1.2 Citlivost mikrofonu

Citlivost na akustický tlak je podíl výstupního napětí a vstupního tlaku na membráně $\sigma = \frac{u}{p_{vstup}}$. Po zjednodušení a dosažení výstupního napětí z rovnice 2.2 vyjde citlivost mikrofonu [3]

$$\sigma = U_0 \frac{\tilde{\xi}}{p_{vstup} h_g}. \quad (2.7)$$

2.1.3 Výchylka kruhové membrány

V kapitole 2.1.2 jsme zavedli citlivost mikrofónu, kde vystupuje i průměrná výchylka membrány $\tilde{\xi}$ abychom tuto veličinu zjistili, musíme si nejprve stanovit výchylku membrány.

Uvažujme, že kruhová membrána je buzená harmonicky proměnným tlakem p , který je na celé ploše membrány stejný. Vlnová rovnice pro výchylku membrány [4]

$$\frac{d^2\xi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\xi}{dr} + k_M^2 \xi = -\frac{p}{T}, \quad (2.8)$$

kde ξ je výchylka membrány, r je radiální prostorová souřadnice, T je mechanické napětí membrány a $k_M = \frac{\omega}{c_m} = 2\pi f / \sqrt{\frac{T}{m_1}}$ je vlnové číslo, f je frekvence akustické vlny, c_m je rychlost vlny na membráně a $m_1 = \rho_m h_m$ je plošná hustota membrány, kde ρ_m je hustota materiálu membrány a h_m tloušťka membrány. Řešením rovnice (2.8) dojdeme k [4]

$$\xi(k_M r) = -\frac{p}{T k_M^2} + \mathbf{A}_0 J_0(k_M r) + \mathbf{B}_0 N_0(k_M r), \quad (2.9)$$

kde J_0 je Besselova funkce nultého řádu, N_0 je Neumannova funkce nultého řádu a $\mathbf{B}_0, \mathbf{A}_0$ jsou integrační konstanty. Z podmínek konečnosti řešení v počátku vyplývá $\mathbf{B}_0 = 0$ a z nehybnosti membrány na okraji $\xi(k_M R) = 0$ vyplývá \mathbf{A}_0 , dostaneme rovnici výchylky $\xi(k_M r)$: [4]

$$\xi(k_M r) = \frac{p}{T k_M^2} \left(\frac{J_0(k_M r)}{J_0(k_M R)} - 1 \right). \quad (2.10)$$

2.1.4 Průměrná výchylka membrány

V kapitole 2.1.3 jsme se zabývali pouze o okamžitou výchylku membrány ξ , pro další výpočty musíme stanovit průměrnou výchylku $\tilde{\xi}$. Tu získáme tak, že zintegrujeme výchylku přes celou aktivní plochu a vydělíme ji aktivní plochou. Poté platí, že $\tilde{\xi}$ se rovná [4]

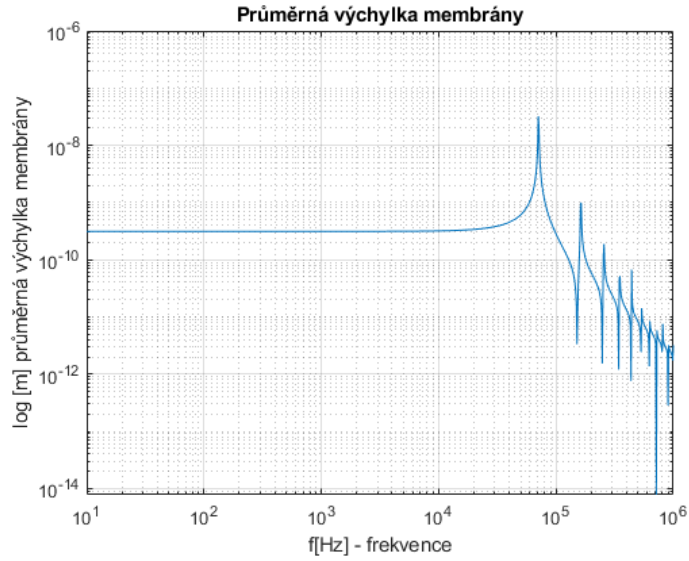
$$\tilde{\xi} = \frac{1}{S} \iint_S \xi(r) dS = \frac{p}{T k_M^2} \left(\frac{J_2(k_M R)}{J_0(k_M R)} \right). \quad (2.11)$$

Na obrázku 2.2 je ukázána frekvenční závislost průměrné výchylky kruhové membrány ve vakuu, spočítána pro konkrétní hodnoty ¹, kde jsou vidět jednotlivé rezonanční frekvence.

2.1.5 Náhradní obvod mikrofónu

Vztah 2.11 je určen pro membránu bez vlivu okolního vzduchu (ve vakuu). Mikrofón můžeme popsat jako soustavu skládající se z mechanických impedancí.

¹Akustický tlak $p = 1 \text{ Pa}$, mechanické napětí membrány $T = 100 \frac{\text{N}}{\text{m}}$, hustota křemíku $\rho_m = 2329 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, tloušťka membrány $h_m = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, poloměr membrány $R = 500 \mu\text{m}$ a frekvence od 10 Hz do 1 MHz



Obrázek 2.2: Průměrná výchylka membrány ve vakuu, z rovnice 2.11.

Jedná se o mechanickou impedanci membrány, prostoru mezi elektrodami, prostoru za pevnou elektrodou a mechanickou impedanci děr na pevné elektrodě. Všechny tyto impedance tvoří celkovou mechanickou impedanci

$$\mathbf{Z}_{mech} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{v}} = \frac{pS}{j\omega\xi}. \quad (2.12)$$

Pokud si ze vztahu 2.12 vytkneme průměrnou výchylku kruhové membrány a následně ji dosadíme do 2.7 získáme citlivost mikrofону

$$\sigma = U_0 \frac{S}{j\omega Z_{mech} h_g}, \quad (2.13)$$

která bude odpovídat reálné citlivosti mikrofону, avšak jen do první rezonanční frekvence.

■ Mechanická impedance kruhové membrány

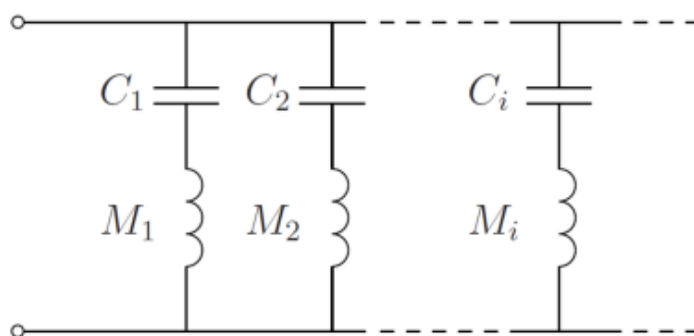
Chování membrány se dá popsat pomocí inertorů a elastorů. Její náhradní obvod tvoří paralelní zapojení inertoru a elastoru v sérii, viz obrázek 2.3.

Pro dostatečně přesný model nám stačí započítat vlivy C_1 poddajnosti a M_1 hmotnosti. Hmotnosti M_2 až M_i můžeme zanedbat, jelikož hmotnost na nízkých frekvencích nezávisí. Kvazistatická poddajnost $C_{2\infty}$ provádí korekci chování membrány na nízkých frekvencích [3]. Jednotlivé komponenty jsou určeny těmito vztahy [4]

$$C_i = \frac{4}{j_i^4 \pi T}, M_i = \frac{j_i^2 m_1 S}{4}, C_{2\infty} = C_\infty - C_1 = \frac{1}{8T\pi} - C_1, \quad (2.14)$$

kde j_i je i -té řešení rovnice $J_0(j_i) = 0$ [3], pro $j_1 \approx 2.4048$.

Řešení těchto rovnic lze získat dvěma způsoby, buď pomocí reziduí [4], nebo pomocí vlastních funkcí Ψ_n homogenní rovnice $\Delta\Psi_n + K_n^2\Psi_n = 0$ [5].



Obrázek 2.3: Náhradní obvod kruhové membrány. [4]

■ Mechanická impedance prostoru mezi elektrodami

Pro získání mechanické impedance prostoru mezi elektrodami se vychází ze zjednodušené formulace řešení Navier-Stokesovy rovnice pro viskozní plyn. Mechanická impedance vzduchového prostoru mezi membránou a pevnou elektrodou bez děr, se vypočítá jako [4][3]

$$Z_g = \frac{3\mu\pi R^4}{2h_g^3} + j\omega \frac{3\rho_0\pi R^4}{20h_g}, \quad (2.15)$$

a s děrovanou pevnou elektrodou jako [3]

$$Z_g = N \left(\frac{6\mu\pi\beta X_0^4}{h_g^3} + j\omega \frac{\rho_0\pi\beta X_0^4}{2h_g} \right), \quad (2.16)$$

kde N je počet děr v pevné elektrodě, μ je smyková dynamická viskozita, ρ_0 je hustota vzduchu, $X_0 = \sqrt{\frac{S}{N\pi}}$ je ekvivalentní kruhová oblast shromažďování vzduchového proudu z každého otvoru, $\beta = \ln \frac{X_0}{R_d} - \frac{3}{4} + \frac{R_d^2}{X_0^2} - \frac{R_d^4}{4X_0^4}$ a R_d je poloměr děr.

■ Mechanická impedance děr na pevné elektrodě

Mechanická impedance děr se vyjádří jako [4][3]

$$Z_d = \frac{S^2}{N} \left(\frac{8h_h\mu}{\pi R_d^4} + j\omega \frac{4\rho_0 h_h}{3\pi R_d^2} \right), \quad (2.17)$$

kde h_h je tloušťka pevné elektrody neboli hloubka jednotlivých děr.

■ Mechanická poddajnost prostoru za pevnou elektrodou

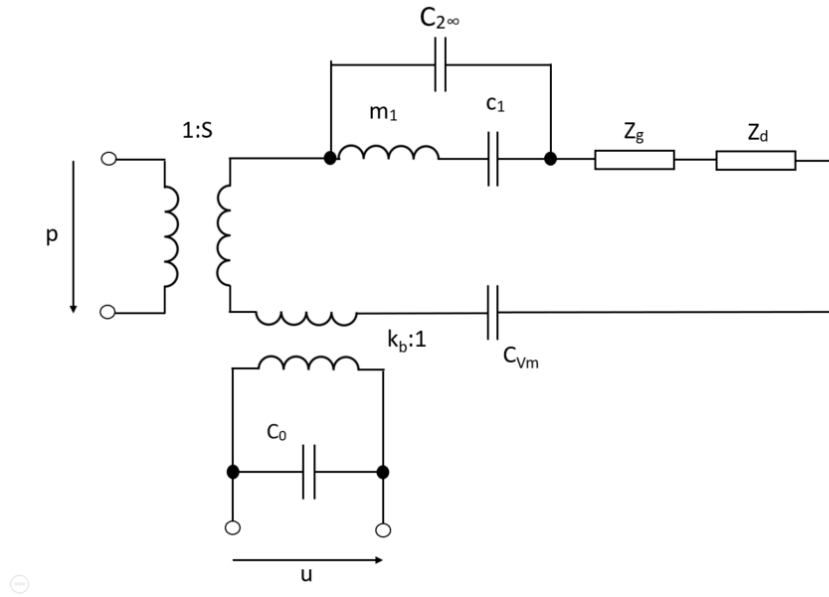
Mechanická poddajnost prostoru za pevnou elektrodou se vyjádří jako [4][3]

$$C_{V_m} = \frac{V_c}{\rho_0 c^2 S^2}, \quad (2.18)$$

kde V_c je objem této dutiny, ρ_0 hustota vzduchu a c adiabatická rychlost zvuku.

■ Náhradní obvod mikrofonu

Celkový náhradní obvod mikrofonu je vidět na obrázku 2.4 a je složen z jednotlivých komponentů uvedených v kapitole 2.1.5. Příchozí akustický tlak p je pomocí mechanicko-akustického transformátoru s poměrem $1 : S$ přeměněn na sílu. Výstupní mechanicko-elektrický transformátor s poměrem $k_b : 1$, kde $k_b = \frac{C_0 U_0}{h_g}$, mění vstupní veličinu obvodu na výstupní napětí. Náhradní obvod nebere v úvahu akustický zkrat na velmi nízkých frekvencích způsobený kapilárou pro vyrovnání statického tlaku.



Obrázek 2.4: Náhradní obvod mikrofonu.

■ 2.2 Numerický model mikrofonu

Numerický model mikrofonu je řešen v programu COMSOL Multiphysics.

■ 2.2.1 Slabé řešení diferenciální rovnice

Galerkinova variační metoda je metoda nahrazení tzv. silné formulace její integrální formou a následnou diskretizací slabého řešení (metoda konečných prvků). Galerkinova variační metoda je aplikována na vlnovou rovnici 2.8 ze které se získá tzv. slabé řešení diferenciální rovnice pro výchylku membrány

$$\int_{\Omega} \frac{d^2 \xi}{dr^2} w d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{r} \frac{d\xi}{dr} w d\Omega + \int_{\Omega} k_M^2 \xi w d\Omega = - \int_{\Omega} \frac{p(r)}{T} w d\Omega, \quad (2.19)$$

$$d\Omega = 2\pi r dr. \quad (2.20)$$

Proměnná w se nazývá testovací funkce. Po zavedení 2.20 a pomocí integrace per partes se rovnice 2.19 změní na

$$\begin{aligned} & \left[\frac{d\xi}{dr} w \right]_0^R - \int_0^R \frac{d\xi}{dr} \frac{dw}{dr} 2\pi r dr + \int_0^R w \frac{d\xi}{dr} 2\pi dr + \\ & + \int_0^R k_M^2 \xi w 2\pi r dr + \int_0^R \frac{p(r)}{T} w 2\pi r dr = 0. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Pokud všechny integrály sloučíme do jednoho, získáme tak tvar rovnice

$$\int_0^R \left[-\frac{d\xi}{dr} \frac{dw}{dr} r + w \frac{d\xi}{dr} + k_M^2 \xi w r + \frac{p(r)}{T} w r \right] dr = 0. \quad (2.22)$$

Formulace v hranaté závorce v rovnici 2.22 se dosadí do simulačního softwaru COMSOL Multiphysics.

2.2.2 Akustická formulace v termoviskózním plynu

Pro popis akustické rychlosti a změny teploty v zadní dutině mikrofónu a prostoru mezi pevnou elektrodou a membránou se vychází z Navier-Stokesovy rovnice, rovnice zachování hmoty, rovnice zachování celkové energie a termodynamických stavových zákonů pro tekutiny [6][7]. Rovnice obsahující teplotu a akustickou rychlost jsou dány

$$\omega^2 \mathbf{v} + B \mathbf{grad} \operatorname{div} \mathbf{v} + C \mathbf{rot} \mathbf{rot} \mathbf{v} - D \mathbf{grad} \tau = \mathbf{0}, \quad (2.23)$$

$$j\omega\tau + Q \operatorname{div} \mathbf{grad} \tau - R \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (2.24)$$

kde $B = \frac{c^2}{\gamma} + j\omega c l_v$, $C = -j\omega c l_v$, $D = \frac{j\omega \hat{\beta}}{\rho_0}$, $Q = -\gamma l_h c$, $R = \frac{-(\gamma-1)\rho_0 c_0^2}{\gamma \hat{\beta}}$, c je adiabatická rychlost zvuku, $\hat{\beta} = \frac{\partial P}{\partial T}$ změna tlaku vůči změně teploty při konstantní hustotě, γ Poissonova konstanta pro adiabatický děj, μ smyková dynamická viskozita, η objemová dynamická viskozita a λ_h je tepelná vodivost. Charakteristické viskozní délky jsou l_v a l'_v , které se vyjádří jako $l'_v = \frac{\mu}{\rho_0 c}$, $l_v = \frac{(\eta + \frac{4\mu}{3})}{\rho_0 c}$ a tepelná charakteristická délka je vyjádřena jako $l_h = \frac{\lambda_h}{\rho_0 c C_P}$, kde c_p je měrná tepelná kapacita při stálém tlaku [6][7].

Na předchozí rovnice pro akustickou rychlost 2.23 a teplotu 2.24 se použije Galerkinova variační metoda a tím se získá slabé řešení těchto diferenciálních rovnic [8]. Na tuhých izotermických stěnách byla použita homogenní Dirichletova okrajová podmínka pro akustickou rychlost a změnu teploty ($\mathbf{v} = \mathbf{0}$ a $\tau = 0$), na membráně je použita Dirichletova okrajová podmínka $v_z = j\omega\xi$, $v_x = v_y = 0$ a $\tau = 0$. Příklad implementace do simulačního softwaru COMSOL Multiphysics byl dodán vedoucím práce.

Kapitola 3

Výsledky modelů

V této kapitole je znázorněn rozdíl mezi jednotlivými modely použitými v této práci a také grafické ukázky změn teploty, akustické rychlosti a akustického tlaku v dutinách mikrofону z programu COMSOL Multiphysics.

Tabulka 3.1: Parametry vzduchu.

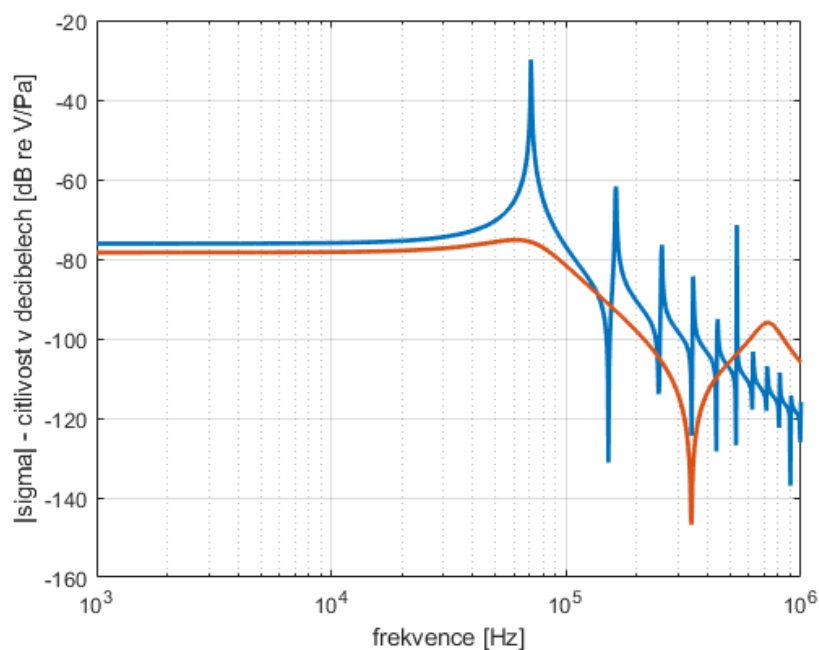
Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
P_0	101.325	Pa	Atmosférický tlak
T_0	296.15	K	Statická teplota
λ_h	$24.4 \cdot 10^{-3}$	$W/(m \cdot K)$	Tepelná vodivost
c	345.9	m/s	Adiabatická rychlost zvuku
ρ_0	1.18	kg/m^3	Hustota vzduchu
μ	$1.183 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s$	Smyková dynamická viskozita
η	0.7098	$Pa \cdot s$	Objemová viskozita
$\hat{\beta}$	340,52	$J/(m^3 \cdot K)$	Změna tlaku vůči změně teploty při konstantní hustotě
γ	1.4	-	Poissonova konstanta pro adiabatický děj
c_p	1010	$J/(kg \cdot K)$	Měrná tepelná kapacita při stálém tlaku

Tabulka 3.2: Parametry mikrofónu.

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
h_m	$5 \cdot 10^{-6}$	m	Tloušťka membrány
ρ_m	2329	kg/m^3	Hustota křemíku
R	$425 \cdot 10^{-3}$	m	Poloměr membrány
h_g	$10 \cdot 10^{-6}$	m	Tloušťka vzduchové mezery mezi elektrodami
h_h	$8 \cdot 10^{-6}$	m	Tloušťka pevné elektrody, hloubka děr
R_d	$7 \cdot 10^{-6}$	m	Poloměr díry v pevné elektrodě
h_d	$150 \cdot 10^{-6}$	m	Hloubka zadní dutiny
V_c	$11.78 \cdot 10^{-9}$	m^3	Objem zadní dutiny
T	100	N/m	Mechanické napětí membrány

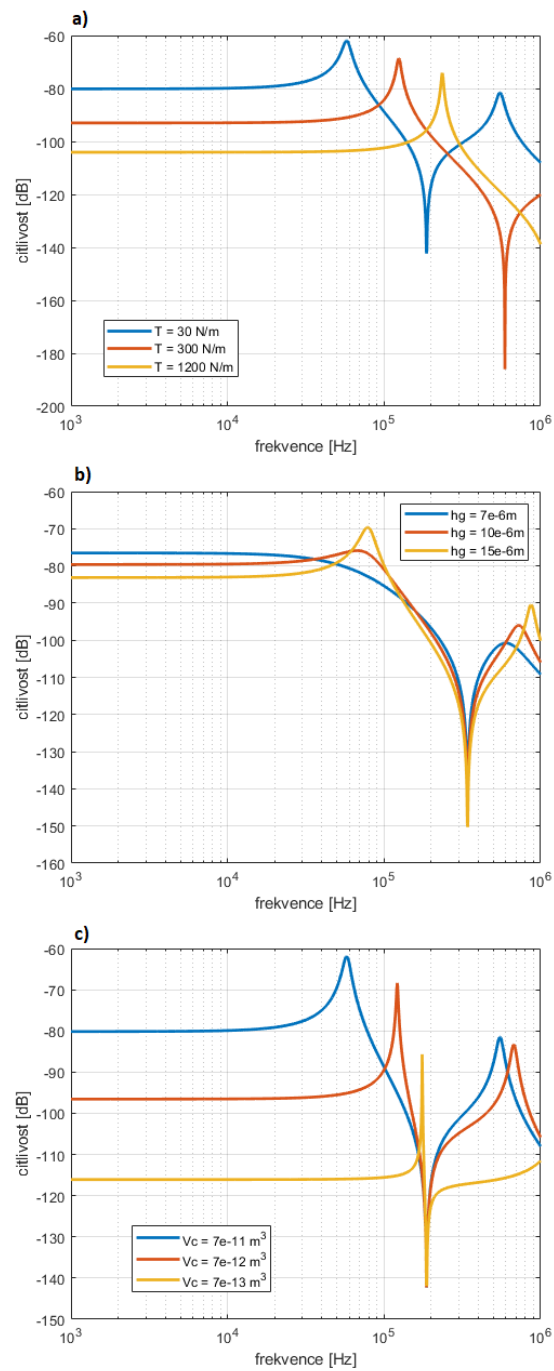
3.1 Vliv parametrů náhradního obvodu na citlivost mikrofonu

Vliv náhradního obvodu mikrofonu s neděrovanou pevnou elektrodou na citlivost mikrofonu ukazuje obrázek 3.1, kde modře je znázorněna citlivost mikrofonu na ekvivalentní tlak, který odpovídá vybuzení jako je použité ve vakuu (elektrostatické buzení nebo buzení vibracemi), z rovnice 2.7 a červeně citlivost ve vzduchu spočtena z náhradního obvodu mikrofonu pro hodnoty v tabulkách 3.1 a 3.2. Na obrázku 3.2 jsou znázorněny citlivosti mikrofonu při změnách hodnot hlavních parametrů membrány (napětí membrány T), mezery mezi elektrodami (tloušťka vzduchové mezery h_g) a zadní dutiny mikrofonu (objem zadní dutiny V_c).



Obrázek 3.1: Citlivost mikrofonu.

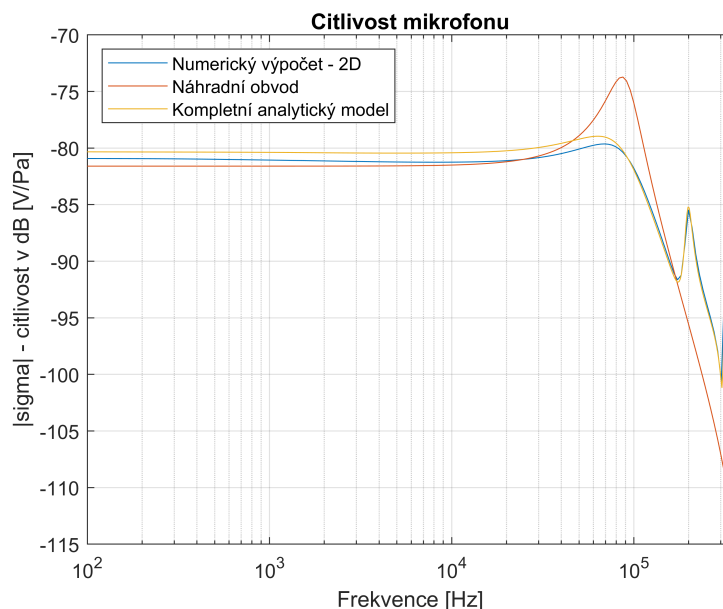
3.1. Vliv parametrů náhradního obvodu na citlivost mikrofonu



Obrázek 3.2: Citlivosti mikrofonu při různých hodnotách parametrů mikrofonu a) mechanického napětí membrány b) tloušťky mezery mezi elektrodami c) objemu zadní dutiny mikrofonu.

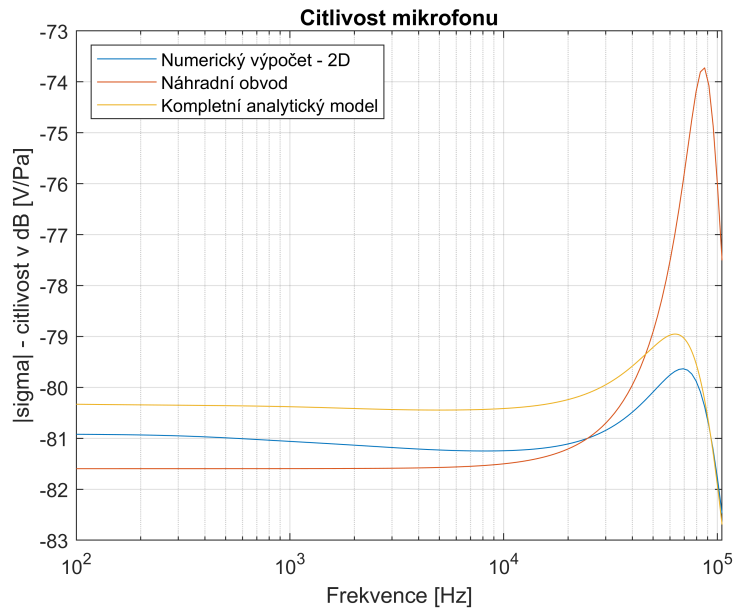
3.2 Porovnání modelů mikrofonu s neděrovanou pevnou elektrodou

V této části jsou ukázány rozdíly mezi analytickým modelem mikrofonu, kompletním analytickým modelem [5]¹ a numerickým modelem vytvořeným v COMSOL Multiphysics ve 2D. Na obrázku 3.3 jsou znázorněny jednotlivé citlivosti mikrofonu pro dříve zmíněné modely. Důležité je si také všimnout průběhů citlivostí na nízkých frekvencích, viz obrázek 3.4.



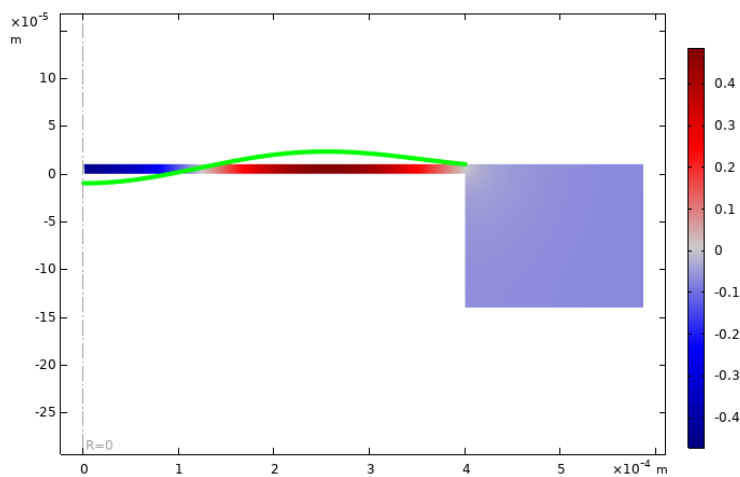
Obrázek 3.3: Citlivost mikrofonu pomocí náhradního obvodu, kompletního analytického a numerického modelu.

¹Implementace kompletního analytického modelu do Matlabu byla dodána vedoucím práce a nachází se v příloze B.

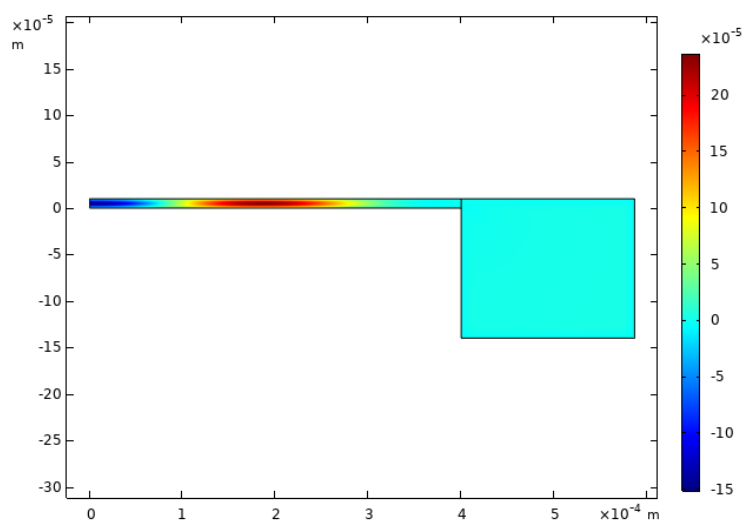


Obrázek 3.4: Citlivost mikrofonu pomocí náhradního obvodu, kompletního analytického a numerického modelu - detail na nízké frekvence.

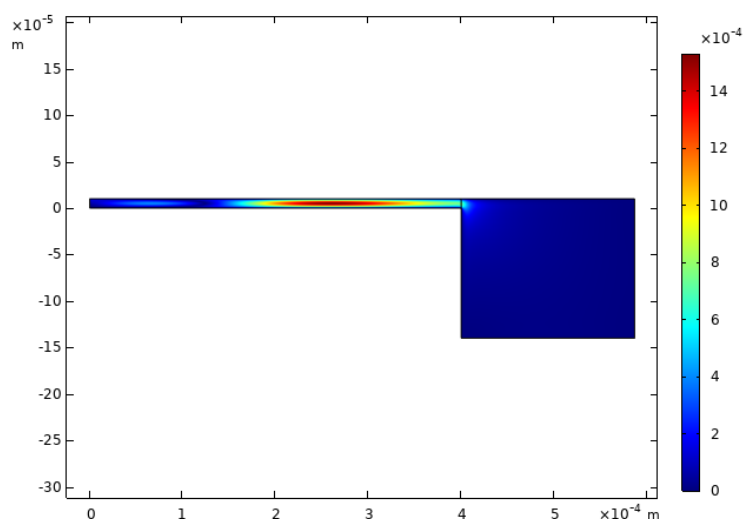
Ukázka změny tlaku, teploty a akustické rychlosti v dutinách mikrofonu jsou vidět na obrázcích 3.5, 3.6 a 3.7, kde lze pozorovat vliv viskózních a tepelných limitních vrstev v blízkosti membrány a pevné elektrody.



Obrázek 3.5: Změna tlaku v dutinách mikrofonu se znázorněnou výchylkou membrány na frekvenci 209 kHz, měřítko v Pa.



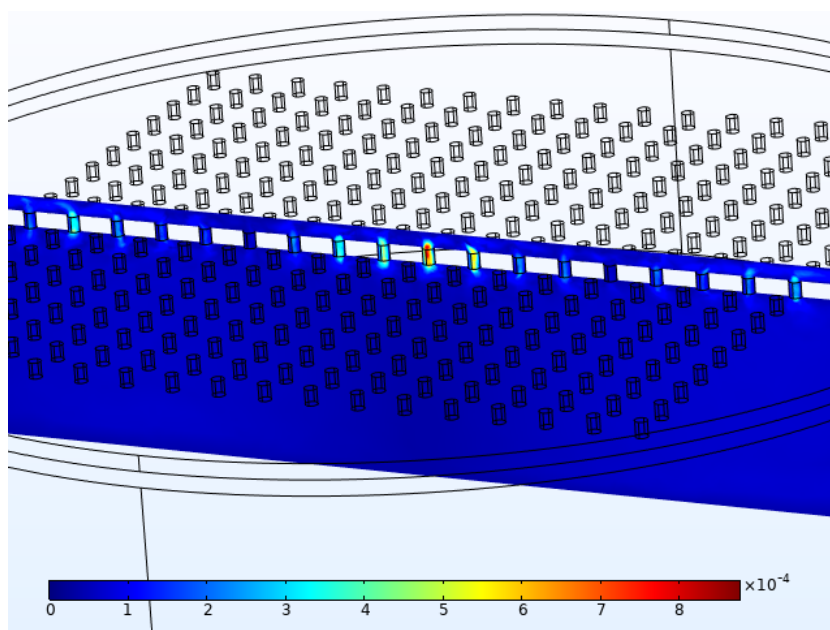
Obrázek 3.6: Změna teploty v dutinách mikrofonu na frekvenci 305 kHz, měřítko v K.



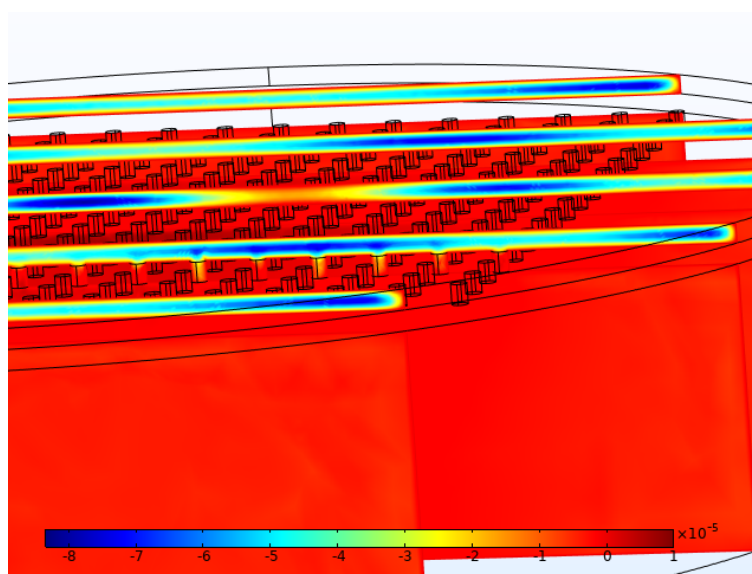
Obrázek 3.7: Změna akustické rychlosti v dutinách mikrofonu na frekvenci 305 kHz, měřítko v m/s.

3.3 Porovnání modelů mikrofonu s děrovanou pevnou elektrodou

Předchozí numerický 2D model mikrofonu, který v sobě neobsahoval díry v pevné elektrodě mikrofonu, byl přetvořen na numerický 3D model mikrofonu s děrovanou pevnou elektrodou. Na následujících obrázcích 3.8 a 3.9 jsou ukázány změny akustické rychlosti a teploty v dutinách mikrofonu spočtené pomocí tohoto numerického modelu.

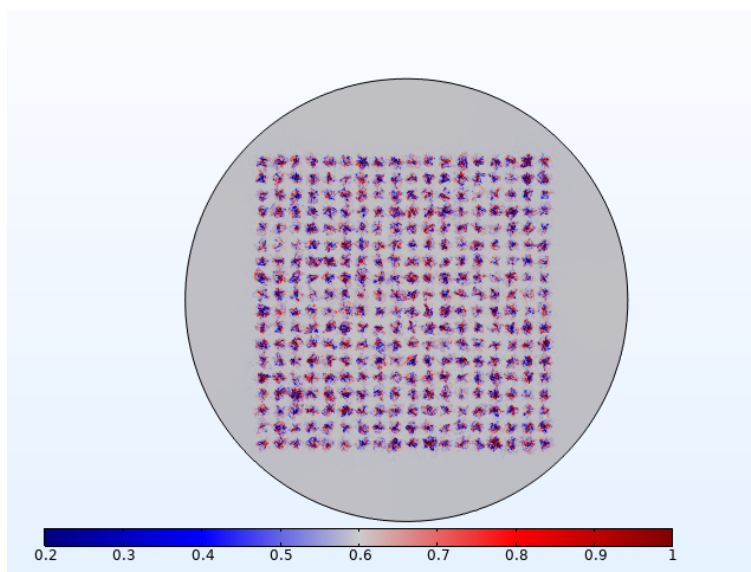


Obrázek 3.8: Změna akustické rychlosti v dutinách mikrofonu na frekvenci 489 kHz, měřítko v m/s.

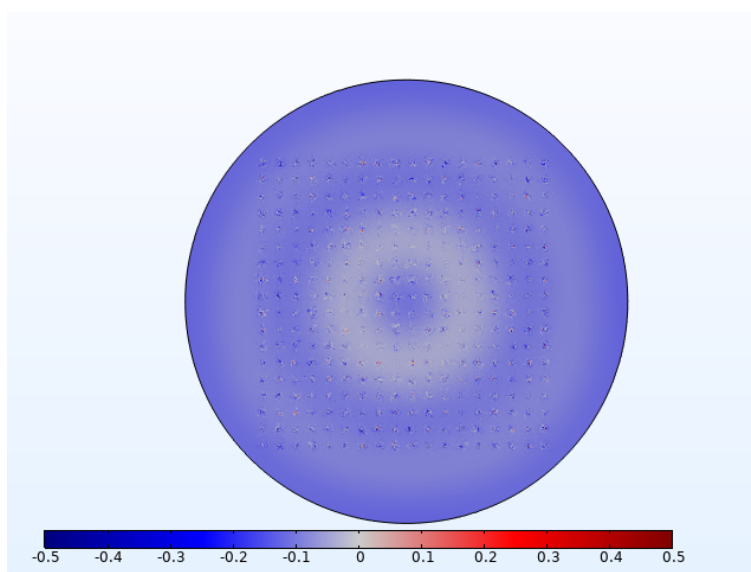


Obrázek 3.9: Změna teploty v dutinách mikrofonu na frekvenci 489 kHz, měřítko v K.

Akustický tlak je na nízkých frekvencích v prostoru mezi elektrodami mikrofonu uniformní, jak je vidět na obrázku 3.10. Avšak kvůli nedostatečnému rozdělení plochy modelu děr se na okrajích děr vytváří nežádoucí artefakty. Na vysokých frekvencích, kdy se objevují vyšší módy membrány, můžeme sledovat axisymetrické změny akustického tlaku, viz obrázek 3.11.

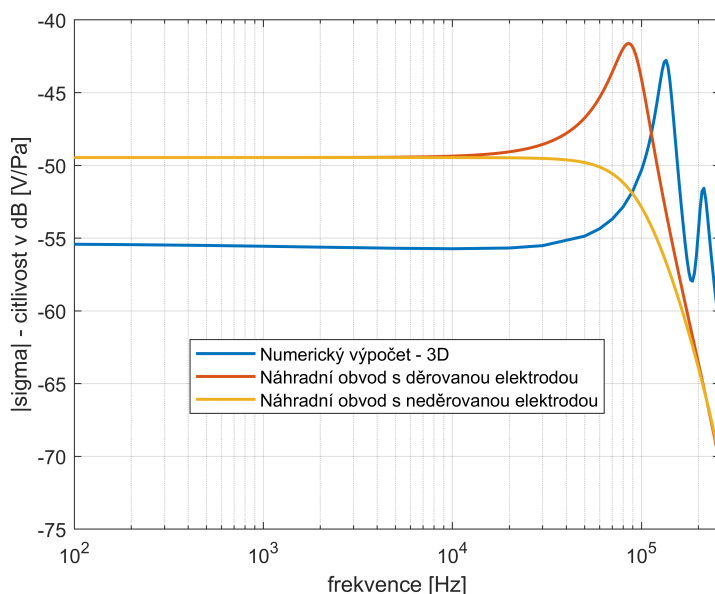


Obrázek 3.10: Změna akustického tlaku v prostoru mezi elektrodami na frekvenci 10 kHz, měřítko v Pa.



Obrázek 3.11: Změna akustického tlaku v prostoru mezi elektrodami na frekvenci 489 kHz, měřítko v Pa.

Pokud porovnáme citlivosti náhradního obvodu mikrofonu s citlivostí numerického 3D modelu mikrofonu 3.12 se stejnými parametry, zjistíme, že na nízkých frekvencích je citlivost numerického 3D modelu zhruba o 6 dB menší než ukazují náhradní obvody. První rezonanční frekvence 3D modelu je oproti analytickým modelům posunuta do vyšších frekvencí.



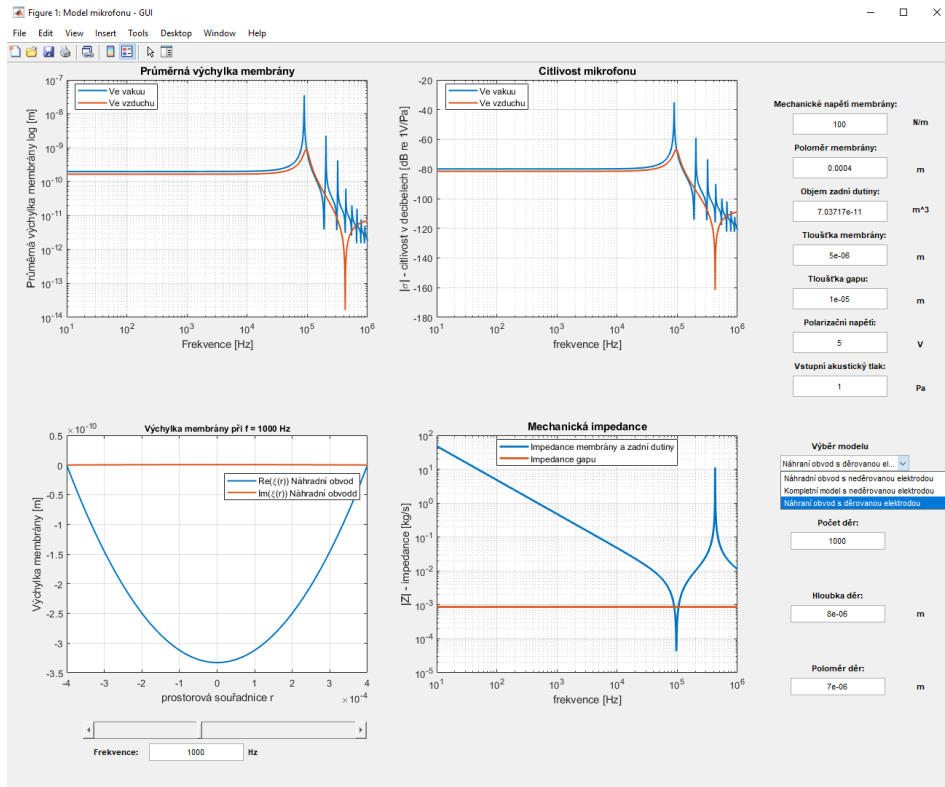
Obrázek 3.12: Citlivost mikrofону s děrovanou a neděrovanou pevnou elektrodou - 3D model s děrovanou elektrodou.

3.4 Grafické uživatelské rozhraní

Pro snažší pochopení a vysvětlení chování miniaturního elektrostatičkého mikrofónu jsem vytvořil GUI (grafické uživatelské rozhraní) 3.13. V tomto rozhraní je možné sledovat změny průměrné výchylky a citlivosti mikrofónu při různých vstupních hodnotách parametrů mikrofónu jako jsou napětí membrány, poloměr membrány, tloušťka membrány, tloušťka vzduchové mezery mezi elektrodami (gap), objem zadní dutiny a vstupní tlak, a také lze měnit metody přístupů k výpočtům náhradních obvodů. Vstupní akustický tlak pro citlivost mikrofónu ve vakuu je ekvivaletní tlak, který odpovídá vybuzení ve vakuu vibracemi či elektrostatičkému buzení. Výstupem GUI je také ukázání okamžité výchylky prostoru ve vzduchu při dané frekvenci. Výchylka v prostoru ve vzduchu se dá spočítat z průměrné výchylky membrány spočítané z náhradního obvodu jako podíl mezi rovnicemi 2.10 a 2.11. Jeden z přístupů je podle pana profesora Zdeňka Škvora, u kterého se dá frekvenční charakteristika mikrofónu použít pouze do první rezonanční frekvence, po první rezonanční frekvenci se citlivost mikrofónu dostává do nesmyslných hodnot viz 3.3. Druhý přístup zahrnuje také spojení mezi akustickým tlakem a výchylkou membrány, viz 3.5, a platí i pro vyšší frekvence.

GUI by hlavně mělo sloužit ke vzdělávacím účelům, jelikož je názorně vidět, jak se projeví změny jednotlivých parametrů mikrofónu na výstupní citlivosti. Nebo pokud si někdo modeluje vlastní mikrofón podle svých představ, toto mu slouží jako dobrý nástroj.

3. Výsledky modelů



Obrázek 3.13: GUI modelu mikrofonu.

Kapitola 4

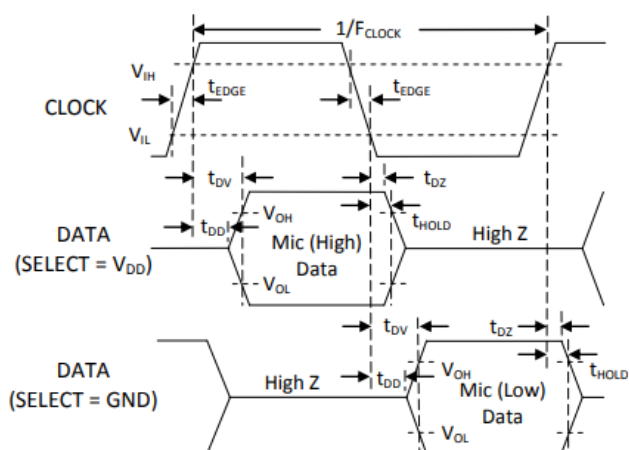
Praktická část

4.1 Formáty digitálních výstupů MEMS mikrofonů

V této kapitole jsou ukázány tři druhy výstupních signálů MEMS mikrofonů, jimiž jsou PDM, TDM a I2S výstupní signály.

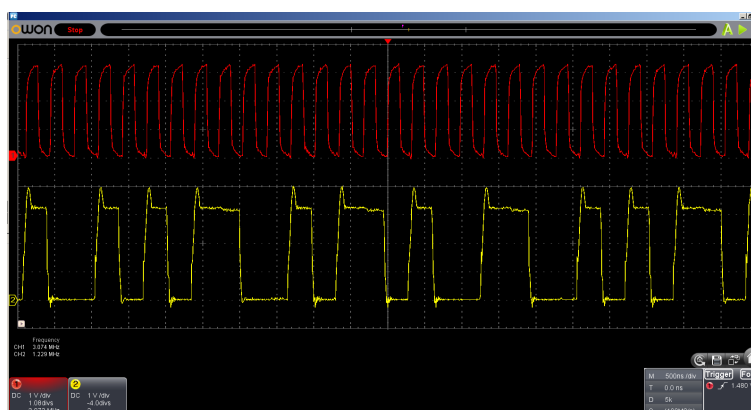
4.1.1 PDM výstupní signál

U PDM (pulse-density modulation) výstupního signálu je analogový signál převeden na binární digitální signál pomocí sigma-delta modulace. Sigma-delta modulátor se skládá z rozdílového členu, integrátoru, komparátoru a zpětné vazby. Na výstupu je jednobitový digitální signál [9]. Pokud jsou připojeny na PDM linku dva mikrofony, tak jeden mikrofon odesílá data při rostoucí hraně hodin a druhý při klesající hraně hodin, viz 4.1. V případě připojeného pouze jednoho mikrofonu se může zvolit při jaké hraně (rostoucí/klesající) hodin bude mikrofon odesílat data. Pokud je výběrový pin spojen s napájením, tak mikrofon odesílá data při rostoucí hraně hodin a pokud je výběrový pin spojen se zemí, tak odesílá data při klesající hraně hodin. Jelikož se pracuje s diskretizací signálu je potřeba dodržet vzorkovací teorém, tedy vzorkovací kmitočet musí být 2x větší než nejvyšší frekvence signálu. Frekvence hodinového signálu je nejčastěji 64x větší než vzorkovací frekvence. Proto např. pro vzorkovací frekvenci $f_s = 48 \text{ kHz}$ je taktovací frekvence $f_t = 64 \cdot 48 \text{ kHz} = 3.072 \text{ MHz}$.



Obrázek 4.1: Výstupní PDM signál mikrofonu SPH0641LU4H-1. [10]

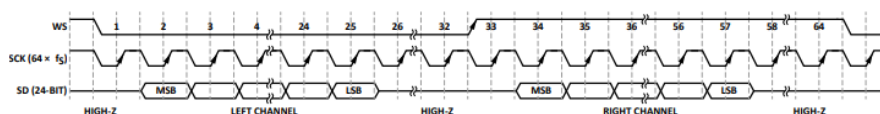
Vlastní měření PDM signálu při připojeném jednom mikrofonu je možno vidět na obrázku 4.2, kde žlutý signál je PDM výstup a červeně signál hodin.



Obrázek 4.2: Naměřený PDM signál a signál hodin.

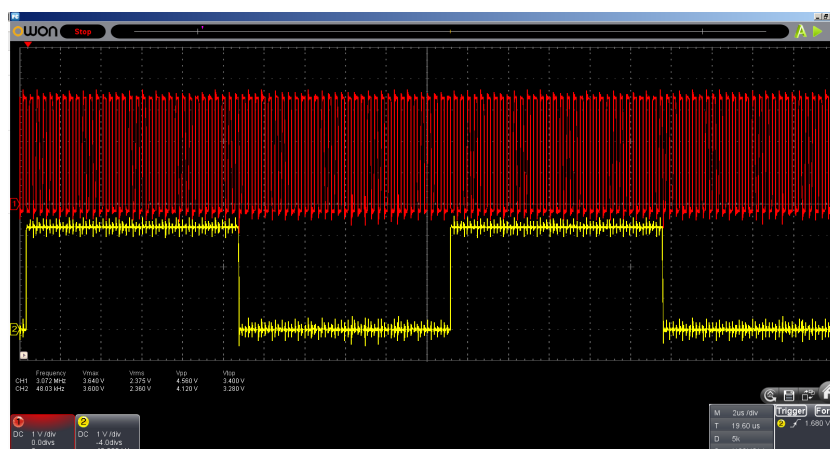
4.1.2 I2S výstupní signál

I2S (Inter-IC Sound) je sériová sběrnice zaměřená na připojování digitálních audio zařízení. I2S sběrnice pracuje se třemi linkami: 1. hodinový signál (SCK = "continuous serial clock"), 2. výběr slova (WS = "word select") určuje který mikrofon kdy odesílá data. Levý kanál odesílá data při logické nule a pravý kanál při logické jedničce, což je vidět na obrázku 4.3, a 3. datová linka [11].

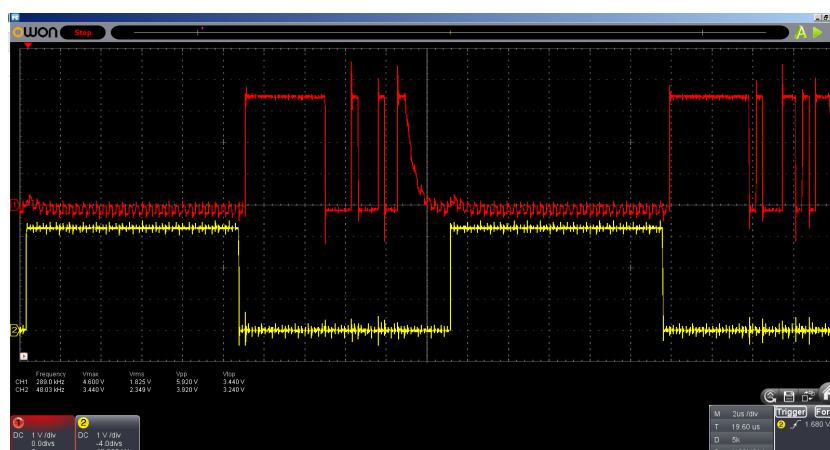


Obrázek 4.3: Výstupní I2S signál mikrofonu ICS-43432. [11]

Naměřený výstupní I2S signál SCK s WS se nachází na obrázku 4.4 a WS s výstupními daty na obrázku 4.5.



Obrázek 4.4: Naměřený výstupní I2S signál mikrofonu ICS-43432 - červeně SCK a žlutě WS.



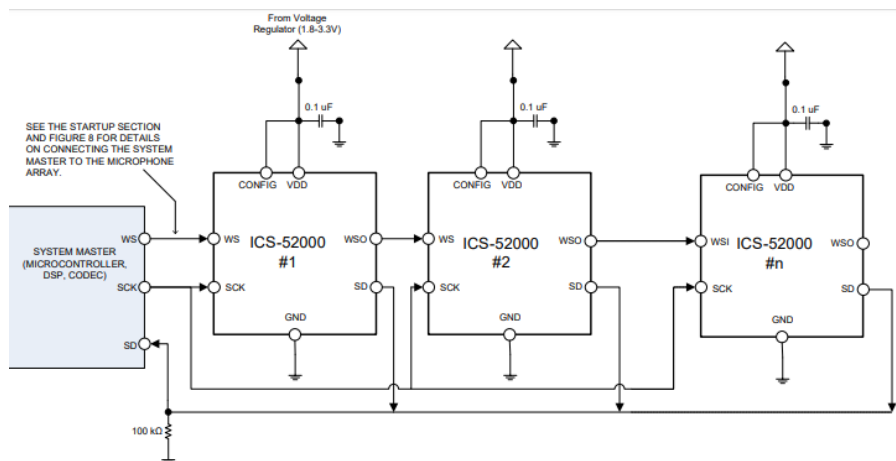
Obrázek 4.5: Naměřený výstupní I2S signál mikrofonu ICS-43432 - žlutě WS a červeně výstupní data.

4.1.3 TDM výstupní signál

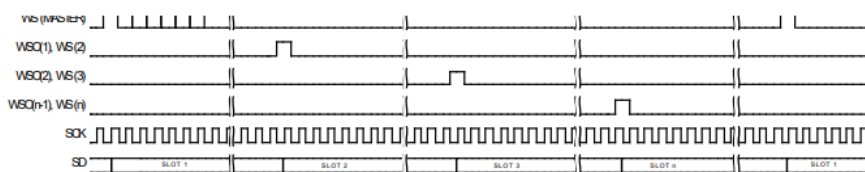
Doposud jsme se zabývali pouze signály se dvěma výstupními kanály, TDM (time division multiplex) umožňuje připojit více signálů na jedno přenosové médium, jak je vidět na obrázku 4.6. Jednotlivé signály jsou odděleny časově, neboli každý signál vysílá v různých časových intervalech [12]. Vysílání dat je stejné jako u PDM či I2S, avšak z důvodu většího počtu mikrofonů je nutné zvýšit rychlost přenášení dat, a proto se taktovací frekvence, např. pro vzorkovací frekvenci $f_s = 48 \text{ kHz}$, rovná

$$f_t = n \cdot f_s \cdot 32 = n \cdot 1.536 \text{ MHz}, \quad (4.1)$$

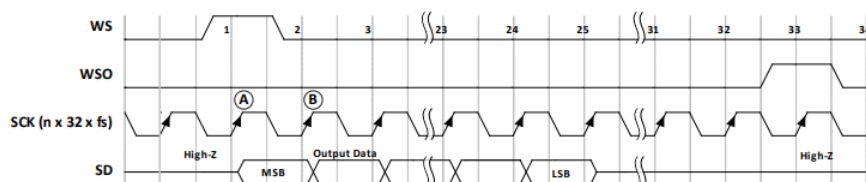
kde n může nabývat hodnot $n = 2, 4, 8$ nebo 16 a zároveň odpovídá maximálnímu počtu mikrofonů pro danou taktovací frekvenci. Časové diagramy TDM sběrnice lze pak vidět na obrázcích 4.7 a 4.8.



Obrázek 4.6: Zapojení mikrofonů na TDM sběrnici. [12]



Obrázek 4.7: Celkový přehled časového diagramu TDM sběrnice. [12]

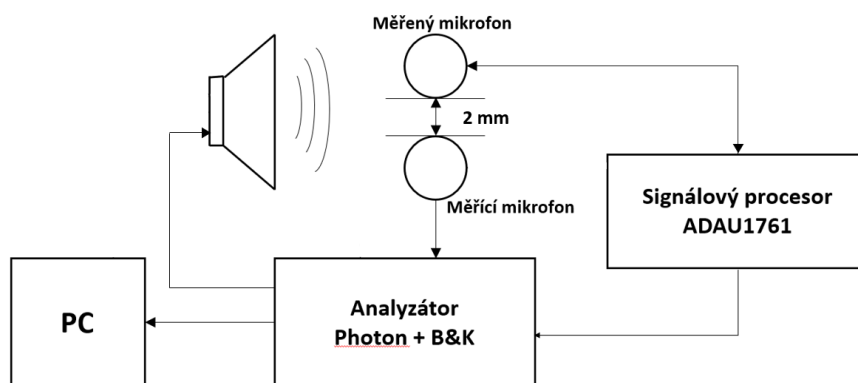


Obrázek 4.8: Detail na 1 časové okno TDM sběrnice. [12]

4.2 Frekvenčních charakteristiky

V této části jsou ukázány naměřené frekvenční charakteristiky mikrofonů ICS43432 a SPH0645LM4H-B, které mají I2S výstupní signál a frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352, který má PDM výstupní signál. Všechny tři mikrofony byly změřeny pomocí referenčního mikrofonu B&K DeltraTron Pressure-field 1/4" typu 4944B s citlivostí 0.853 mV/Pa. Mikrofony byly připojeny k signálovému procesoru ADAU1761 se vzorkovací frekvencí 48 kHz a buzeny studiovým poslechovým monitorem ESI aktiv 05 s frekvenčním

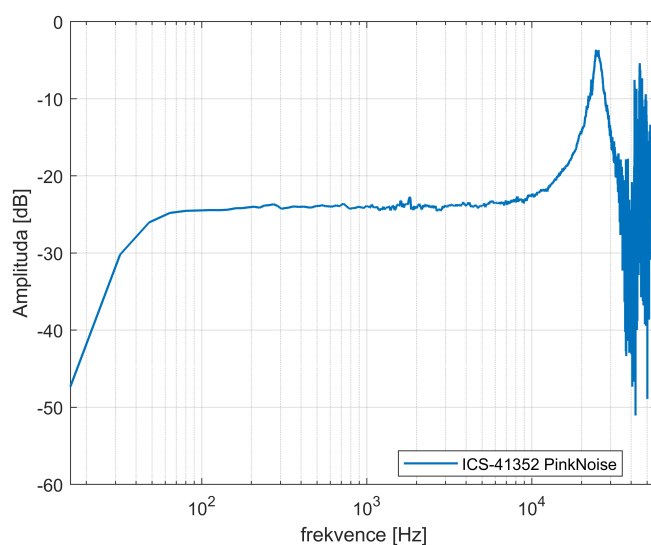
rozsahem 50 Hz - 20 kHz. Mikrofon ICS-41352 byl navíc vybuzen piezoelektrickým měničem značky Sencor, více o něm v části 4.3, z důvodu nalezení druhé rezonanční frekvence ležící v oblasti ultrazvuku. Měření probíhalo podle schématu na obrázku 4.9.



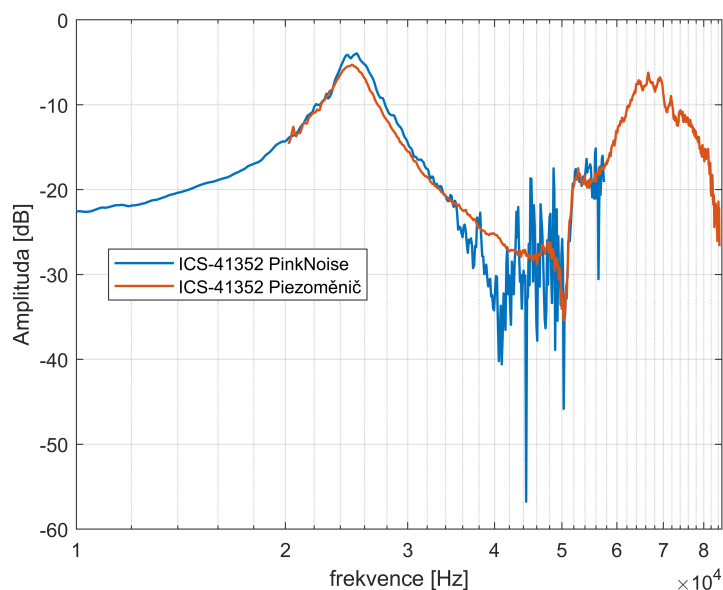
Obrázek 4.9: Schéma měřicí aparatury pro frekvenční charakteristiky.

4.2.1 ICS-41352

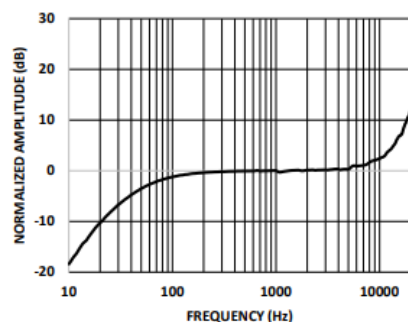
Změřenou frekvenční charakteristiku mikrofonu ICS-41352 lze vidět na obrázcích 4.10 a 4.11. Pomocí piezoelektrického měniče, jako zdroje akustického tlaku, bylo možné získat také i druhou rezonanční frekvenci tohoto mikrofonu. Frekvenční charakteristiky relativně odpovídají frekvenčním charakteristikám udávané výrobcem, viz obrázky 4.12 a 4.13.



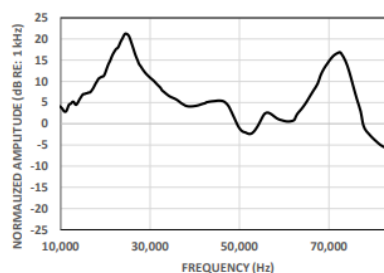
Obrázek 4.10: Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352



Obrázek 4.11: Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352 - detail na rezonanční frekvenci.



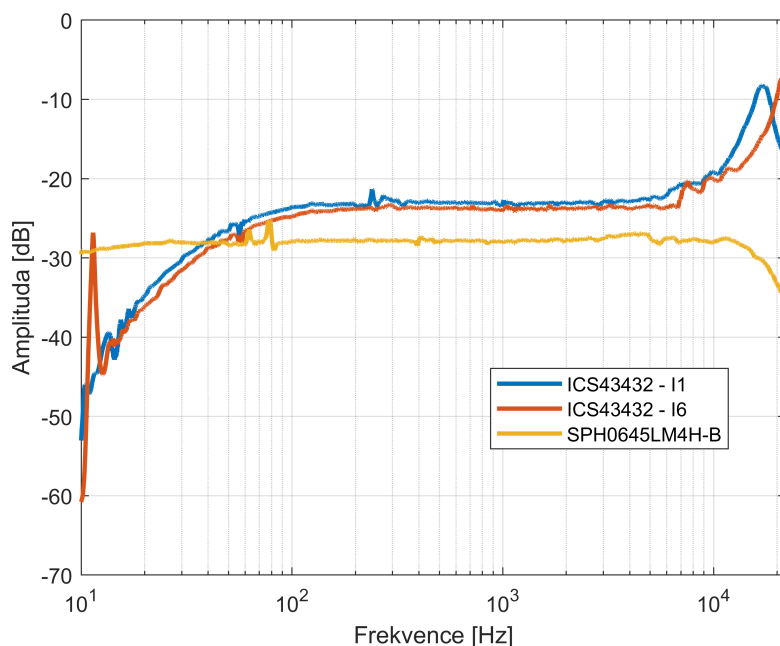
Obrázek 4.12: Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352 - z katalogového listu. [13]



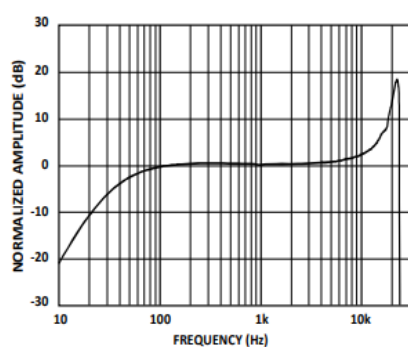
Obrázek 4.13: Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS-41352 - z katalogového listu. [13]

4.2.2 ICS43432 a SPH0645LM4H-B

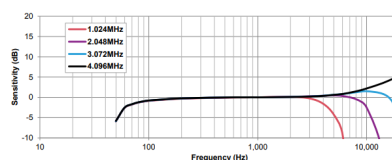
Mikrofon ICS43432 označen I1 je ze starší sady než mikrofon ICS43432 označen I6. Podle frekvenčních charakteristik 4.14 můžeme usoudit, že každá výrobní várka těchto mikrofonů se lehce liší. Změřený mikrofon SPH0645LM4H-B má oproti mikrofonu ICS43432 menší citlivost a širší frekvenční rozsah. ICS43432 mikrofony mají na velmi nízkých frekvencích akustický zkrat, který model mikrofonu nebere v úvahu. Mikrofony byly měřeny za stejných podmínek. Frekvenční charakteristiky mikrofonů udávány výrobcí jsou na 4.15 a 4.16.



Obrázek 4.14: Frekvenční charakteristika mikrofonů ICS43432-I1, ICS43432-I6 a SPH0645LM4H-B.



Obrázek 4.15: Frekvenční charakteristika mikrofonu ICS43432 - z katalogového listu. [11]



Obrázek 4.16: Frekvenční charakteristika mikrofonu SPH0645LM4H-B - z katalogového listu. [14]

4.3 Měření rezonance a napětí membrány

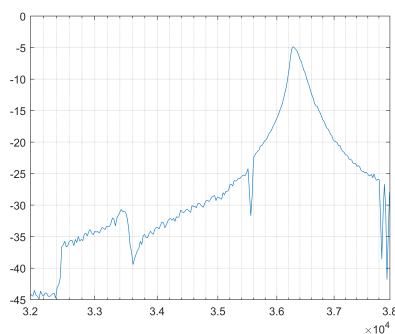
Měření probíhalo podle schématu 4.19, kde byl mikrofon umístěn ve vakuu na piezoelektrickém měniči od značky Sencor, který slouží jako ultrazvukový parkovací senzor. Mikrofon byl připojen ke generátoru hodinového signálu, digitálnímu analyzátoru Photon+ B&K a stejnosměrnému zdroji napájení. Senzor byl připojen na generátor signálu od značky Tektronix. Cílem tohoto měření bylo otestovat, zda-li samotný piezoelektrický měnič dokáže svými vibracemi rozhýbat membránu mikrofonu a pokud ano, tak pomocí rezonanční

frekvence mikrofonu vyvolané měničem dopočítat napětí membrány mikrofonu ze vzorce [3]

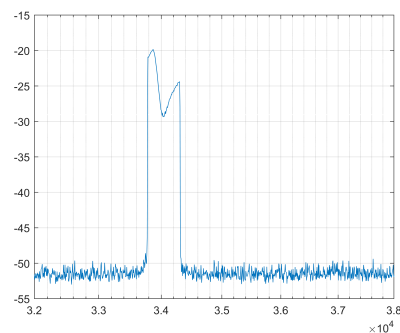
$$T = m_1 \left(\frac{2\pi f_{res} R}{j_1} \right)^2 \quad (4.2)$$

Výsledná frekvenční charakteristika změřená na mikrofonu 4.17 ukazuje dvě rezonanční frekvence. První rezonance se nachází na 33,87 kHz (předpokládaná rezonanční frekvence mikrofonu) a druhá rezonance se nachází na 36,28 kHz (předpokládaná rezonanční frekvence piezoelektrického měniče). Předpokládáme proto, že z katalogů víme první rezonanční frekvence jednotlivých přístrojů. Rezonanční frekvence piezoelektrického měniče ve vzduchu je zhruba 41 kHz¹, viz příloha A, a proto usuzujeme, že menší rezonanční frekvence náleží mikrofonu. Ačkoliv nám měření ukazuje, že rezonanční frekvence piezoelektrického měniče je o 5 kHz menší, předpokládáme, že je to způsobeno možným tlakem vodičů ve vakuové komoře na pohyblivou část senzoru, a proto senzor nedokázal dostatečně kmitat.

Z článku [15] si dále zjistíme ostatní potřebné parametry: poloměr membrány $R = 425 \mu\text{m}$ a tloušťku membrány $h_m = 1,4 \mu\text{m}$. Po dosazení do rovnice 4.2 získáváme napětí membrány mikrofonu SPH0641LU4H-1 $T = 4.6142 \text{ N/m}$. Detail rezonance mikrofonu je vidět na obrázku 4.18. Rezonanční frekvence na obrázku 4.17 (první měření) se mírně liší od rezonanční frekvence na obrázku 4.18 (druhé měření). To je způsobeno tím, že frekvenční charakteristiky byly měřeny za sebou bez toho, aby se mezitím vypnula vakuová pumpa, tím pádem druhé měření probíhalo za nižšího statického tlaku než první měření.

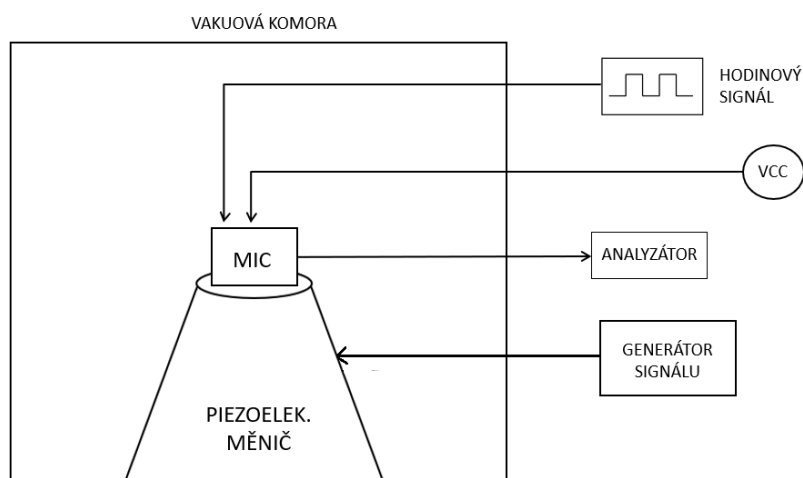


Obrázek 4.17: Frekvenční charakteristika SPH0641LU4H-1 mikrofonu připevněném na piezoelektrickém měniči ve vakuu.



Obrázek 4.18: Frekvenční charakteristika SPH0641LU4H-1 mikrofonu připevněném na piezoelektrickém měniči ve vakuu - detail rezonance mikrofonu.

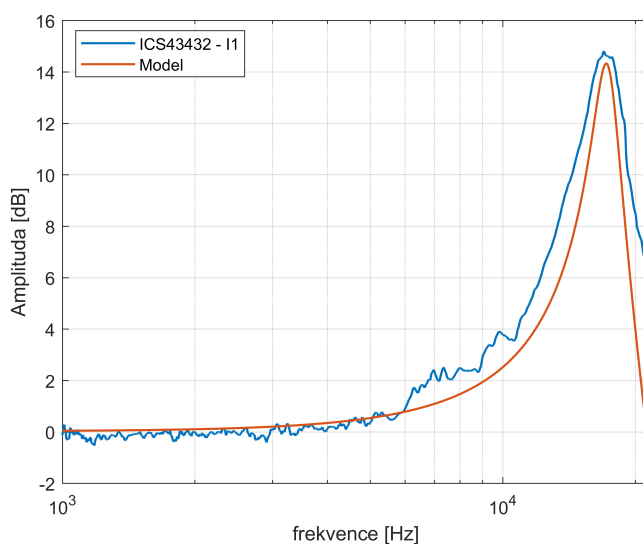
¹Rezonanční frekvence piezoelektrického měniče byla změřena mikrofonem B&K DeltraT-ron Pressure-field 1/4" typu 4944B s citlivostí 0.853 mV/Pa ve vzdálenosti 1 cm při vstupním buzení 20 V špička-špička. Data naměřená v minulosti byla dodána vedoucím práce. K dispozici v příloze B



Obrázek 4.19: Schéma měřicí aparatury.

4.4 Porovnání naměřených hodnot s výsledky modelů

Pro získání odhadů neznámých parametrů mikrofonu, lze použít analytický model a známé parametry mikrofonu z katalogového listu, abychom získali relativně stejný průběh modelu a mikrofonu. Obrázek 4.20 ukazuje frekvenční charakteristiku mikrofonu ICS43432-I1 z kapitoly 4.2.2 a jeho odhadnutý model.



Obrázek 4.20: Normalizovaná frekvenční charakteristika mikrofonu ICS43432 - I1 s modelem mikrofonu.

Jelikož v katalogovém listu [11] nebyly uvedeny žádné parametry mikrofonu k získání věrohodnějšího modelu, byly všechny parametry odhanuty a nachází se v tabulce 4.1

Tabulka 4.1: Odhadnuté parametry mikrofonu ICS43432-I1.

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
T_{ICS}	0,22	N/m	Mechanické napětí membrány
N_{ICS}	1050	-	Počet děr v pevné elektrodě
h_{mICS}	$11 \cdot 10^{-6}$	m	Tloušťka pohyblivé membrány
h_{gICS}	$5,6 \cdot 10^{-6}$	m	Tloušťka vzduchové mezery mezi elektrodami
h_{hICS}	$6 \cdot 10^{-6}$	m	Tloušťka pevné elektrody/hloubka děr
R_{dICS}	$5 \cdot 10^{-6}$	m	Poloměr děr
h_{dICS}	$270 \cdot 10^{-6}$	m	Hloubka zadní dutiny
R_{ICS}	$175 \cdot 10^{-6}$	m	Poloměr membrány



Kapitola 5

Závěr

V práci je popsáno, jak lze získat citlivost mikrofону a to z určení průměrné výchylky tenké kruhové membrány. Následně je ukázán náhradní obvod elektrostatičkého mikrofónu a vypočtena průměrná výchylka membrány z celkové mechanické impedance tohoto obvodu. Veškeré zjištěné veličiny (citlivost, průměrná výchylka, výchylka membrány a impedance jednotlivých komponentů obvodu) jsou znázorněny v GUI s možností měnit důležité parametry mikrofónu a modely mikrofónů.

Během práce jsem byl seznámen se softwarem pro analýzu konečných prvků a simulaci fyzikálních jevů, díky kterému jsem získal lepší přehled o problematice a přesnější data k porovnávání s analytickými modely. Dále jsem měřil frekvenční charakteristiky typických zástupců miniaturních mikrofónů. Jako navazování na tuto práci bych se chtěl zabývat nelineárním chováním mikrofónu a jeho modelem v časové oblasti.



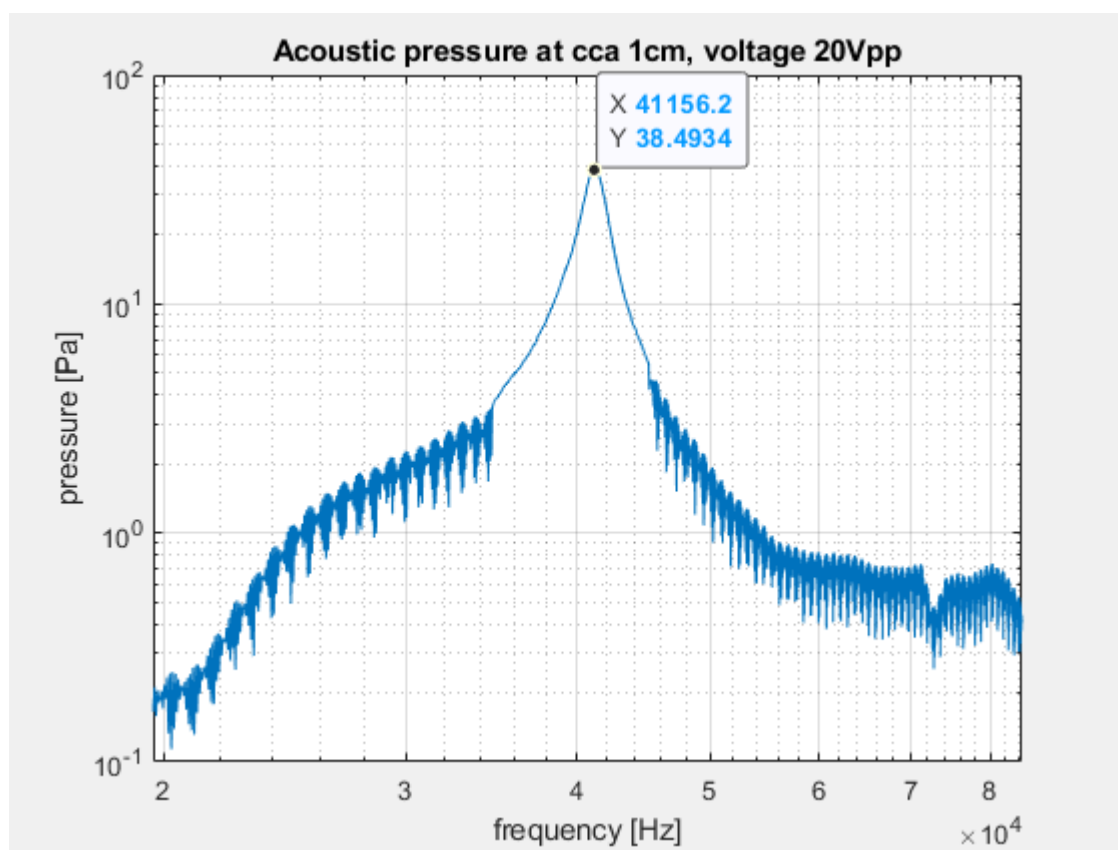
Literatura

- [1] Piero Malcovati a Andrea Baschiroto. “The Evolution of Integrated Interfaces for MEMS Microphones”. In: *Micromachines* 9 (čvn. 2018), s. 323. DOI: 10.3390/mi9070323.
- [2] Antonin Novak a Petr Honzík. “Measurement of nonlinear distortion of MEMS microphones”. In: *Applied Acoustics* 175 (2021), s. 107802. ISSN: 0003-682X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107802>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X20309075>.
- [3] Karina Abramova a Petr Honzík. “Experimental Estimation of Unknown Parameters of Equivalent Circuits of Low-cost Electret Microphones”. In: *Akustické listy*, 23(1-4). 2017 December, s. 9–17.
- [4] Zdeněk ŠKVOR. *Elektroakustika a akustika*. Praha: Praha : Vydavatelství ČVUT, 2012. ISBN: 978-80-01-025034-7.
- [5] Michel Bruneau et al. “An Equivalent Network Modelling the Strong Coupling Between a Vibrating Membrane and a Fluid Film”. In: *Acta Acustica* 1994 (čvn. 1994), s. 223–232.
- [6] Romain Bossart Nicolas Joly Michel Bruneau. “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*, 92. 2006, March, s. 202–209.
- [7] Nicolas Joly. “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*, 96. 2010, January, s. 102–114. DOI: 10.3813/AAA.918261.
- [8] Honzík Petr et al. “Analytical and numerical modeling of an axisymmetrical electrostatic transducer with interior geometrical discontinuity”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America [online]* 134(5) (2013). [cit. 2022-04-28], s. 3573–3579. ISSN: 0001-4966. DOI: 10.1121/1.4824342. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X20309075>.
- [9] *Audiovisual Technology*. <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=180811>. [cit. 2022-05-06].

- [10] Knowles *SiSonic™ Surface Mount MEMS Microphones*. https://www.knowles.com/docs/default-source/model-downloads/sph0641lu4h-1-revb.pdf?Status=Master&sfvrsn=bdc077b1_4. [cit. 2022-02-08].
- [11] TDK. https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sw_piezo/mic/mems-mic/data_sheet/ics-43432-data-sheet-v1.3.pdf. [cit. 2022-05-02].
- [12] TDK. <https://cz.mouser.com/datasheet/2/400/DS-000121-ICS-52000-v1.3-1114907.pdf>. [cit. 2022-05-06].
- [13] TDK. https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sw_piezo/mic/mems-mic/data_sheet/ds-000048-ics-41352-data-sheet-v1.0.pdf. [cit. 2022-05-12].
- [14] Knowles *SiSonic™ Surface Mount MEMS Microphones*. <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Knowles%20Acoustics%20PDFs/SPH0645LM4H-B.pdf>. [cit. 2022-05-02].
- [15] Shubham Shubham et al. “A Novel MEMS Capacitive Microphone with Semiconstrained Diaphragm Supported with Center and Peripheral Backplate Protrusions”. In: *Micromachines* 13.1 (2022). ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi13010022. URL: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/1/22>.

Příloha A

Rezonanční frekvence piezoelektrického měniče



Obrázek A.1: Rezonanční frekvence piezoelektrického měniče.

Příloha B

Seznam datových příloh

Složka COMSOL

Zdrojový soubor s 2D a 3D modelem mikrofonu v COMSOL Multiphysics:

Microfon_3D_added2_freq_kopie.mph

Microfon_test_s_membranou_adapt_mesh_NoSol.mph

Soubory neobsahují řešení, z důvodu velikosti souboru, pro získání dat je potřeba spustit výpočet.

Složka GUI

Matlab skripta potřebná k otevření GUI:

Sensitivity_GUI_NEW.m - (GUI skript).

Calculate.m - (Analytický model s náhradním obvodem mikrofonu s neděrovanou pevnou elektrodou).

CalculateD.m - (Analytický model s náhradním obvodem mikrofonu s děrovanou pevnou elektrodou).

MBPL.m (Kompletní analytický model).

besselzero.m

Složka Modely

Matlab skripta pro modely:

MBPL_SKVOR_PH.m - (Kompletní analytický model mikrofonu).

Porovnani_ICS43432I1_Model.m - (Změřený mikrofon ICS43432-I1 a jeho model s odhadnutými hodnotami).

porovnani_Numerika_x_Model.m - (Numerický výpočet - 2D model s náhradními obvody).

besselzero.m

Porovnani_3DModel_AnalytModel.m - (Numerický výpočet - 3D model

s náhradním obvodem s děrovanou i neděrovanou pevnou elektrodou).
PrumerVychylNaFreq.txt - (textový soubor potřebný na 2D model mikrofonu).
xiAve_3D_added2freq_10.5.2022.txt - (textový soubor potřebný na 3D model mikrofonu).

■ Složka Piezoměnič

Změřená frekvenční charakteristika piezoelektrického měniče:

Source_data_import.m - (Matlab skript).
G1,1(f) Sep 20, 2016 15-31-19.txt - (data z měření).