

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA KYBERNETIKY



Bakalářská práce

## **Experimenty s ultralehkou membránou v blízkém akustickém poli**

*Angelina Ermokhina*

Vedoucí práce: Ing. Marek Brothánek, Ph.D.

27. května 2016



---

## Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Marku Brothánku, Ph.D. za veškerou pomoc a obrovskou trpělivost při konzultacích a vypracování bakalářské práce. Mé poděkování patří též mé rodině a blízkým přátelům za pomoc a podporu během studia.



---

## Prohlášení

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

V Praze dne 27. května 2016

.....



---

## Abstrakt

Tato práce se zabývá bezkontaktním měřením ultralehké membrány pomocí laserového vibrometru a následním zpracováním naměřených hodnot pomocí akustické holografie. Výsledkem bude jak porovnání různých membrán a jednotlivých nastavení ovlivňujících měření, tak i hodnot predikovaných pomocí holografie se skutečné naměřenými hodnotami.

**Klíčová slova** Akustická rychlost, blízké pole, akustická holografie, laserový vibrometr, nanovlákna

---

## Abstract

This work deals with an ultra-light membrane's measurement by a laser vibrometer. The aim of this work is to do further studies and experiments, regarding the techniques of the membrane's measurement and comparison of differently made membranes from nanofibres. Also acoustic holography will be applied on measured source and results will be compared with measured data.

**Keywords** Acoustic partial velocity, nearfield, acoustic holography, laser vibrometer, nanofiber





---

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>1 Teorie</b>	<b>5</b>
1.1 Měření akustické rychlosti . . . . .	5
1.2 Akustická holografie . . . . .	7
1.3 Skenovací vibrometr . . . . .	12
<b>2 Experiment</b>	<b>15</b>
2.1 Realizace měřicího řetězce . . . . .	15
2.2 Popis a instalace membrány . . . . .	16
2.3 Měření vibrometrem . . . . .	17
2.4 Zpracování naměřených dat . . . . .	19
<b>3 Výsledky měření</b>	<b>21</b>
3.1 Zdroj akustického pole . . . . .	21
3.2 Membrána bez závaží . . . . .	22
3.3 Membrána se závažím . . . . .	23
3.4 Další membrány . . . . .	24
3.5 Porovnání s výsledky NAH algoritmu . . . . .	25
<b>Závěr</b>	<b>31</b>
<b>Literatura</b>	<b>33</b>
<b>A Grafy</b>	<b>35</b>
<b>B Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>45</b>
<b>C Obsah příloženého CD</b>	<b>47</b>



---

## Seznam obrázků

1.1	Schématické znázornění dopadu rovinné vlny kolmo na membránu	8
1.2	Predikční rovina a rovina zdroje . . . . .	10
1.3	Měřicí systém POLYTEC PSV-400 . . . . .	12
2.1	Frekvenční závislost hladiny akustického tlaku . . . . .	15
2.2	Schematické naznačení umístění membrány . . . . .	17
2.3	Blokové schéma měřicího řetězce . . . . .	18
3.1	Rychlost vibrace plechu pro frekvence 60 Hz. Vykreslený jsou reálná, imaginární a absolutní hodnota (amplituda) rychlosti zdroje	22
3.2	Rychlost kmitání I. membrány pro frekvence 60 Hz. Vykreslený jsou reálná, imaginární a absolutní hodnota (amplituda) akustické rychlosti . . . . .	23
3.3	Závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti od zdroje pro porovnání hodnot naměřených na I. membráně a predikovaných pomocí NAH pro frekvence 60 Hz (obr. a) a 310 Hz (obr. b) . . . . .	26
3.4	Závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti od zdroje pro porovnání hodnot naměřených na I. membráně a predikovaných pomocí NAH pro frekvence 697 Hz a 1,39 kHz . . . . .	26
3.5	Porovnání naměřených hodnot ve vzdálenosti 3,8 cm od zdroje a hodnot predikovaných pomocí NAH pro frekvence 312 Hz. . . . .	27
3.6	Porovnání naměřených hodnot ve vzdálenosti 17,8 cm od zdroje a hodnot predikovaných pomocí NAH pro frekvence 1387 Hz. . . . .	28
3.7	Porovnání naměřených hodnot ve vzdálenosti 17,8 cm od zdroje a hodnot predikovaných pomocí NAH pro frekvence 1387 Hz. . . . .	29
A.1	Rychlost vibrace zdroje pro frekvence 60 Hz a 312 Hz. . . . .	35
A.2	Rychlost vibrace zdroje pro frekvence 697 a 1390 Hz . . . . .	36
A.3	Amplituda (absolutní hodnota) rychlosti kmitání I. membrány pro všechny vzdálenosti a pro frekvence 60 Hz. . . . .	37

A.4	Amplituda (absolutní hodnota) rychlosti kmitání I. membrány pro všechny vzdálenosti a pro frekvence 310 Hz. . . . .	38
A.5	Amplituda (absolutní hodnota) rychlosti kmitání I. membrány pro všechny vzdálenosti a pro frekvence 697 Hz. . . . .	39
A.6	Amplituda (absolutní hodnota) rychlosti kmitání I. membrány pro všechny vzdálenosti a pro frekvence 1387 Hz. . . . .	40
A.7	Porovnání membrány se závažím a bez závaží . . . . .	41
A.8	Závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti od zdroje pro II. membránu . . . . .	42
A.9	Závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti od zdroje pro III. membránu . . . . .	43

---

## Seznam tabulek

2.1	Hodnoty hmotnosti použitých závaží . . . . .	16
2.2	Hodnoty vzdálenosti membrány od vibrujícího plechu . . . . .	17



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** Angelina Ermokhina  
**Studijní program:** Kybernetika a robotika (bakalářský)  
**Obor:** Robotika  
**Název tématu:** Experimenty s ultralehkou membránou v blízkém akustickém poli

### Pokyny pro vypracování:

Pomocí laserového vibrometru POLYTEC proveďte v blízkosti vhodného akustického zdroje experimentální měření na ultralehkých membránách vyrobených z nanovláken. Měření proveďte pro několik různých konfigurací (vzdálenost membrány od zdroje, její napnutí a typ). Následně naměřená data zpracujte pomocí principu holografie v prostředí MATLAB a zhodnoťte vhodnost této metody pro rekonstrukci zvukového pole v okolí akustického zdroje.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Q. Leclère, B. Laulagnet - Particle velocity field measurement using an ultra-light membrane - Applied Acoustics 2008, vol. 69, 302-310
- [2] Q. Leclère, B. Laulagnet - Nearfield acoustic holography using a laser vibrometer and a light membrane - J. Acoust. Soc. Am. 2009, 126(3), 1245-9
- [3] A. A. Pereira, Q. Leclère - Assessment of acoustic pressure holograms from membrane velocity measurements - Applied Acoustics 2010, vol. 71, 583-585
- [4] J. Prezelj, P. Lipar, A. Belšak, M. Čudina - On acoustic very near field measurements – Mechanical Systems and Signal Processing 2013, vol. 40, 194-207
- [5] A. Koutný, P. Švec, O. Jiříček, M. Brothánek - Reconstruction of normal surface velocity from measurement of acoustically induced vibration of a thin membrane – Proc. of Euronoise 2014, Prague, 2014

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Marek Brothánek, Ph.D.

**Platnost zadání:** do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

prof. Dr. Ing. Jan Kybic  
**vedoucí katedry**

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
**děkan**





---

# Úvod

Cílem bakalářské práce je bezkontaktně změřit akustické pole v okolí zdroje a následně zpracovat pomocí algoritmu rovinné akustické holografie.

Měření je provedeno na ultralehké membráně pomocí skenovacího laserového vibrometru. Teoretická část je věnovaná popisu existující metody měření akustické rychlosti pole pomocí membrány. Dále je vysvětlená akustická holografie a uveden detailnější popis algoritmu, který byl zde využit. Během experimentu jsme se seznámili s měřicím systémem bezkontaktního laserového vibrometru.

Jednotlivá nastavení měření, bloková schémata, rozměry a popis membrán jsou detailně rozepsány v druhé kapitole. Zdrojem akustického pole je kmitající kovový plech umístěný v tuhé desce přímo za membránou. Měření provádíme pro tři různé membrány z nanovláken, které mají malou a pro naše účely i zanedbatelnou hmotnost.

Vliv různých realizací membrán (měnila se vzdálenost od zdroje a napnutí materiálu) byl podrobně prozkoumán a zhodnocen ve výsledku v kapitole 3.

Ve závěru této práce je porovnání skutečně naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými pomocí akustické holografie v blízkém poli a vyhodnocení použitelnosti této metody pro měření akustického pole.



---

# Teorie

V této kapitole popíšeme využitou metodu měření akustického pole, její obtíž a zmíníme výsledky předchozích experimentů, popsáných v [1], [2].

Pokud potřebujeme změřit charakteristiku akustického pole v okolí zdroje, využíváme například mikrofonních polí nebo intenzitní sondy. Je to vhodné pro vizualizaci nebo lokalizaci zdroje zvuku. Ke zpracování naměřených dat z mikrofonních polí se používají metody akustické holografie. Dá se po aplikaci této metody vypočítat akustické pole ve velké blízkosti zdroje, které může být obtížně měřitelné přímo [3]. Pro použití holografie je potřebné informace o fázi měřené veličiny. Získáváme buď akustický tlak nebo akustickou rychlost v určité rovině v různých bodech.

V článku [4] je uvedena jiná efektivní metoda pro přímé měření akustické rychlosti - pomocí laserového vibrometru a ultralehké membrány. Příslušné teorie byly aplikovány k sérii měření pro ověření a hodnocení její použitelnosti [5]. Z výsledků těchto prací plyne, že na měření má značný vliv použitý typ membrány, tzn. se zanedbatelnou hmotností. Při tomto předpokladu je možné počítat akustické pole přímo bez použití korekce hmotnosti membrány [4], [1]. V této práci měříme membránu z nanovláken a detailně zkoumáme různá nastavení membrány. Naměřená data jsou využita ke zpracování pomocí akustické holografie v blízkém poli.

## 1.1 Měření akustické rychlosti

Běžný způsob jak změřit akustické pole je měření akustického tlaku za pomoci polí mikrofonních sond. Ale pokud potřebujeme změřit akustickou rychlost, je stále obtížně měřitelná přímo [6]. V článku [4] byla navržena efektivnější metoda měření akustické rychlosti pole pomocí ultralehké membrány a laserového paprsku. Hlavní výhodou této metody je vysoká prostorová rozlišovací schopnost obrazu a snadná realizace. Stejně pokud k dispozici je přístroj na bezkontaktní měření, to hodně usnadňuje snímání a zlepšuje kvalitu výsledku. Pokud potřebujeme přepočítat naměřené pole někam jinam pomocí akustické

holografie, metoda zmenšuje obtížnost výpočtu. Podrobněji bude vysvětleno v další podkapitole.

Normálovou složku rychlosti membrány umístěné v akustickém poli zdroje lze bezkontaktně změřit pomocí laserového vibrometru. Membrána musí mít dobré odrazové vlastnosti (jinak laserový paprsek se špatně odráží) a být s co nejmenší hmotností [5]. V tomto případě naměřená rychlost membrány by se měla co nejvíc přiblížit k dokonalé reprezentaci akustického pole.

Jedním z problému této metody je ovlivnění zvukového pole membránou, protože membrána není nikdy zcela transparentní. To znamená, že vlny vysílané ze zdroje jsou částečně odrážené membránou. Nicméně, modifikující účinek membrány je možné vzít v úvahu a opravit [7].

Za účelem minimalizace vlivu hmotnosti musíme najít materiál dostatečně tenký k tomu, aby korekce hmotnosti byla tak malá, jak je to možné. Jak již bylo uvedeno, v této práci nebyla využita korekce kvůli malé hmotnosti použitých nanomembrán oproti membránám z předchozích experimentu (viz [5]).

V článku [1] je uvedena praktická realizace konečné membrány a popsány obtíže spojené s módy membrány, které byly překonány její zatížením a použitím korekce vlivu hmotnosti.

Na konci příslušného článku je popsána implementace membrány se zdrojem ve formě desky buzené šejkrem. Výsledky ukázaly, že „těžká“ membrána by měla být použita při nízkých frekvencích, aby se zabránilo obtížím s módy membrány. Ale „lehká“ má lepší výsledky při vysokých frekvencích, protože je minimalizován vliv hmotnosti membrány (což se dá opravit pouze pro rovinnou vlnu v kolmém směru), a aby se zabránilo vzájemnému působení mezi membránou a vzduchovou mezerou (mezi membránou a zdrojem), když membrána je umístěna v blízkém poli.

Výsledky ukázaly že pokud malý akustický zdroj je umístěn přímo před membránou, odezva membrány se stává více lokalizovaná kolem zdroje pro dané napínání. Tato vlastnost byla zkoumána v článku [1] s cílem využít membránu ve spojení s laserovými vibrometrem jako dvou dimenzionální akustický snímač rychlostí. I když měříme jen normálovou složku rychlosti, je proměřená po celé rovině a zahraňuje v sobe fáze, takže jsme schopní získat 3D vizualizace akustického pole kolem zdroje.

Pokud je možné změřit celé akustické pole kolem zdroje, dalším zájmem z praktického hlediska je získávání akustických obrazů. Holografie je jedna z těchto technik, která na základě měření tlaku (nebo rychlosti) na konečném povrchu obklopujícím zdroj (obecně rovinu nebo válec) umožňuje získat obrazy tlaku a nebo rychlosti v jiné prostorové poloze.

Dále popíšeme akustickou holografie - jaké metody existují a k čemu jsou vhodné, a jak jsme zkusili použít akustickou holografie v blízkém pole na naše naměřená data.

## 1.2 Akustická holografie

Akustická holografie poprvé byla vynalezená Dennisem Gabrem v roce 1948, ale v podobném tvaru pro blízké pole se objevuje až v roce 1980 [8]. Jedná se o nedestruktivní měřicí metodu, použitou k rekonstrukci šíření akustických vln nebo pro detekci akustického zdroje měřením akustických parametrů kolem zdroje. Vytváří vizuální obraz struktury zkoumané oblasti.

Základní rozdělení akustické holografie je podle druhu pole: pro vzdálené pole FAH (Far-field acoustic holography) a pro blízké pole NAH (Nearfield Acoustical Holography) [2]. Měřicí metody zahrnované do akustické holografie se stávají více populární v různých oblastech, zejména v oblasti dopravy, vozidel a designu letadel.

Při použití FAH hologram je zaznamenáván ve velké vzdálenosti od zdroje. Ve srovnání s NAH, FAH algoritmu je obvykle věnována menší pozornost, protože ve vzdáleném poli nelze zachytit krátké vlnové délky. Existuje základní omezení, které určuje o měření v jakém poli se jedná. Dáváme pozor na vlnovou délku nejkratší sledované vlny.

### 1.2.1 Akustická holografie v blízkém poli

Akustická holografie pro naše účely je použita k rekonstrukci trojrozměrného zvukového pole v různých vzdálenostech od zdroje z hodnot naměřených na jeho povrchu. Původní úloha byla naopak z hodnot naměřených blízko zdroje vypočítat hodnoty samotného zdroje, ale kvůli velkému vlivu evanescentních vln nedalo se dostat zobrazení bez použití filtrace, což obvykle řeší podobné problémy při aplikaci akustické holografii.

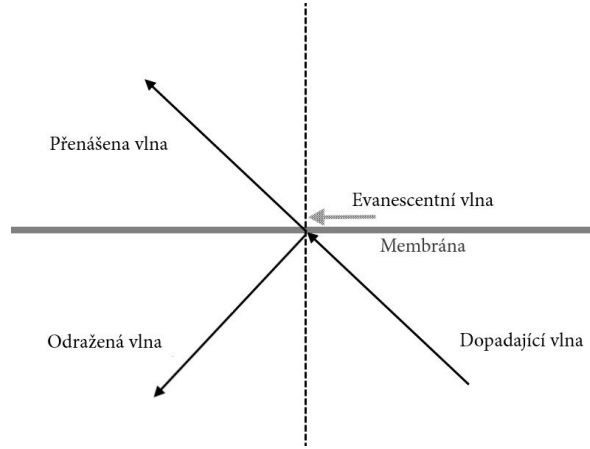
Na obrázku 1.1 je schématické znázornění dopadu rovinné vlny kolmo na membránu, evanescentní vlny se vyskytují velmi blízko její povrchu.

Nejčastěji k rekonstrukce pole se používá akustický tlak, akustická intenzita nebo akustická rychlost [2]. Zvukové vlnění kolem zdroje představuje nekonečný počet vln určitého tvaru (sférického, cylindrického), v našem případě aproximace rovinného. Ve velmi blízké vzdálenosti od povrchu zdroje mohou být zjištěny tzv. evanescentní vlny, které rychle mizejí ze vzdáleností (klesá amplituda vlny) [1]. Jejich existence se využívá při výpočtu metodou NAH (Nearfield Acoustic Holografy) a omezuje vzdálenost na kterou je možné metodu aplikovat (viz obrázek 1.1).

Obvykle NAH je založena na měření akustického tlaku, a z toho výpočet akustické rychlosti je robustnější než z přímo naměřené akustické rychlosti pomocí membrány a vibrometru [2].

Akustická rychlost je měřena na povrchu nanomembrány pomocí laserového paprsku, a při zanedbání malé hmotnosti membrány můžeme pokládat její rychlost za akustickou rychlost pole v určité vzdálenosti od zdroje [1], [4].

Naším cílem je z naměřených hodnot rychlosti v určitých vzdálenostech od zdroje vypočítat zpátky akustické pole na rovině zdroje (viz obrázek 1.2)



Obrázek 1.1: Schématické znázornění dopadu rovinné vlny kolmo na membránu - upraveno z [6]

a porovnat s nemařenými hodnoty přímo na zdroje.

### 1.2.2 Teoretické základy NAH

Základní rovnicí pro akustickou holografii je homogenní vlnová rovnice:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (1.1)$$

kde  $c$  je rychlost zvuku,  $p(\mathbf{r}, t)$  je akustický tlak v časové doméně závislý na poloze a  $\nabla$  je Laplaceův operátor. Pro známou frekvenci  $\omega$  lze napsat následující vztah vyjádřující Fourierův obraz  $P$  po prostorové Fourierovy transformaci:

$$P(x, y, z, \omega) = \sum_n \sum_m P_{nm}(z, \omega) e^{jk_n x} e^{jk_m y}, \quad (1.2)$$

kde směr šíření je ve směru osy  $z$ , kde  $k_n x = 2\pi n/L_x$  a  $k_m y = 2\pi m/L_y$  jsou prostorové frekvence, a  $n, m$  jsou kladná nebo záporná celá čísla mezi hodnoty dané prostorovým rozlišením.

Z vlnové homogenní rovnice a Greenovy věty lze odvodit Helmholtzovu-Huyghensovu rovnici. Z níž vyplývá, že aby bylo možné rekonstruovat zvukové pole vně plochy obklopující zdroj zvuku, musíme rozložení veličin pole na této ploše. Integrál je pak v praxi aproximován sumací.

S použitím Helmholtzové rovnice,

$$\Delta p + (\omega/c)^2 p = 0 \quad (1.3)$$

kde  $\Delta$  je totéž co  $\nabla^2$ ,  $p$  je komplexní amplituda akustického tlaku a  $k = (\omega/c)^2$  je vlnové číslo, k výše uvedenému vztahu (1.2) a vyřešením diferenciální

rovnice dostáváme k následujícímu:

$$P_{nm}(z, \omega) = P_{nm}^+(0, \omega)e^{jk_{nmz}z} + P_{nm}^-(0, \omega)e^{jk_{nmz}z}, \quad (1.4)$$

kde

$$k_{nmz}^2 = (\omega/c)^2 - k_{nx}^2 - k_{my}^2. \quad (1.5)$$

Pokud  $k_{nx}^2 + k_{my}^2 > (\omega/c)^2$ , pak  $k_{nmz} = j\sqrt{-k_{nmz}^2}$  je imaginární a vlny jsou evanescentní, exponenciálně se zvyšují nebo snižují s  $z$  a pro  $P^-$  a  $P^+$  resp. Za předpokladu, že zdroj je v části prostoru, kde hodnoty  $z$  jsou nižší než měřicí rovina, akustické vlny nemůžou exponenciálně narůstat s  $z$ . Tedy  $P_{nm}^-(0, \omega) = 0$ .

Jestliže  $k_{nx}^2 + k_{my}^2 < (\omega/c)^2$ , pak  $k_{nmz}$  je reálné a vlny se šíří (jsou netlumené). Za předpokladu, že  $p(\omega, t) = P(\omega)e^{-j\omega t}$ , vlny se pohybují v kladném směru osy  $z$  a jsou reprezentovány  $P^+$ . Tedy  $P_{nm}^-(0, \omega) = 0$ .

Konečně Fourierovy složky měřeného hologramu mohou být vyjádřeny buď pro tlumené nebo netlumené šíření vlny podle následující rovnici [9]:

$$P_{nm}(z, \omega) = P_{nm}(0, \omega)e^{jk_{nmz}z}. \quad (1.6)$$

Pro výraz rovnice NAH s výpočtem akustické rychlosti z naměřeného akustického tlaku můžeme přepsat výše uvedený vztah pomocí Eulerovy rovnice do tvaru:

$$V_{nm}^z(z, \omega) = -\frac{j}{\omega\rho} \frac{\partial}{\partial z} P_{nm}(z, \omega) = \frac{k_{nmz}}{\omega\rho} P_{nm}(0, \omega)e^{jk_{nmz}z}. \quad (1.7)$$

V našem případě je měřená normálová složka akustické rychlosti a pro NAH můžeme vyjádřit příslušný výraz jako

$$V_{nm}^z(z, \omega) = V_{nm}^z(0, \omega)e^{jk_{nmz}z}. \quad (1.8)$$

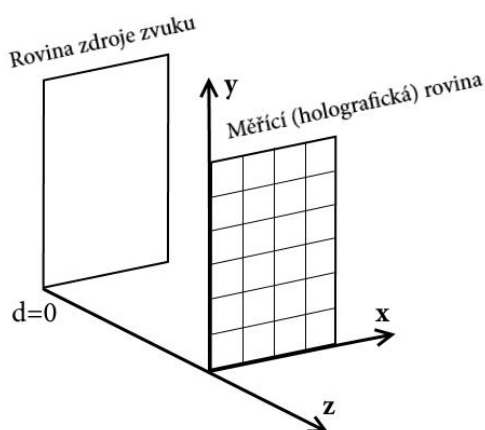
Je vidět, že tento výraz je teoreticky méně komplikovaný než výpočet NAH z akustického tlaku, což je výhodou a je méně citlivý na měření hluku ovlivňujícího vyšší vlnová čísla. Tyto vlastnosti byly experimentálně ověřeny v příslušném článku [1].

### 1.2.3 Metody a implementace rovinné NAH

Základní výpočet akustické rychlosti ve zkoumané rovině za předpokladu rovinné NAH (jinak planar NAH - PNAH) je možno provést pomocí následujících kroků [10]:

1. Naměřit akustickou rychlost v definovaných bodech holografické roviny (viz obrázek 1.2), paralelní s rovinou zdroje zvuku (PNAH).
2. Výpočet dvourozměrné Fourierovy transformace pole v holografické rovině (spektrum akustické rychlosti v doméně vlnových čísel).

3. Vynásobení získaného spektra transformační funkcí.
4. Zpětná dvourozměrná Fourierova transformace funkce získané v bodě 3.



Obrázek 1.2: Predikční rovina a rovina zdroje - upraveno z [9]

Použití FFT a inverzní transformační funkce vyvolává zesílení prostorových kmitočtu evanescentních vln. Dochází k zesílení šumu, což je nutně odstranit filtrace signálu v doméně vlnových čísel nebo použitím jiných metod.

Pro úplnost dále jsou uvedeny a velmi stručně popsány některé existující algoritmy kromě rovinné NAH:

- SONAH (statistický optimální algoritmus)

Vyjadřuje spektrum určitého vlnění pomocí sady elementárních vln. Hlavní výhodou této metody je možnost použití mikrofonního pole nepravidelného tvaru.

- NAH algoritmus s K-filtrem

Zesílení požadovaných hodnot signálů a dvourozměrné okno na transformovaný signál zajistí minimální zesílení okrajových částí.

- Iterační NAH

Dopředná transformace odhadu pole a porovnání s naměřenými hodnotami. Rozdíl je chybou, která se odečte od původního odhadu a postup se opakuje.

- Kombinace iteračního NAH algoritmu s K-filtrem



Využívá Fourierovy transformace zvukové mapy do domény vlnových čísel, filtrace v této oblasti a zpětné rekonstrukce do zkoumané roviny.

Existují i další algoritmy a jiné metody k predikce akustického pole, které mohou být vhodné pro různé účely. Zde jsou jen zdokonalené metody na základě rovinné NAH, které jsou komplikovanější, efektivnější a typické využívané.

Klasická NAH je vhodná pro nízké frekvence. Zatím NAH vyžaduje pravidelné mikrofonní pole, které pokrývá celý měřený objekt, a typicky funguje na základě měření ve velmi malé vzdálenosti od zdroje [7]. Vypočtené hodnoty zvukového pole (např. akustická rychlost) jsou v rovinách rovnoběžných s rovinou měření.

K odstranění nevýhod klasické NAH, např. nutností regularizace nebo zlepšení kvality predikce, jsou vyvíjeny další metody.

Například metoda SONAH překonává omezení klasické metody NAH, tj. že měřicí oblast musí mít tvar pravidelného pravoúhelníku pro možnost použití prostorové FFT. SONAH navíc umožňuje použít nepravidelných mikrofonních polí a polí menších než měřený objekt.

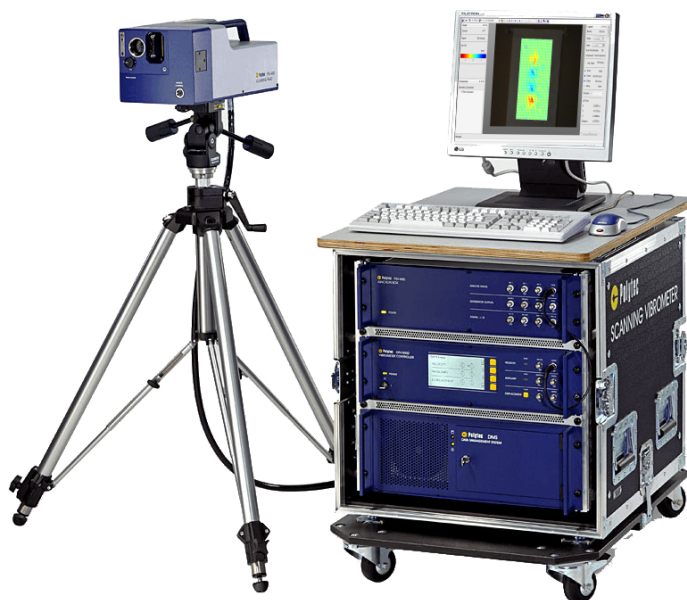
Klasický NAH algoritmus je hodně funkcionální a může být aplikován na různé měřené akustické veličiny, jako například akustický tlak, akustická intenzita a akustická rychlost, a hodnoty měřené v různé vzdálenosti v prostoru před zdrojem v blízkém pole. Umožňuje 3D vizualizace povrchu zdroje nebo měřeného objektu.

Na závěr v této práci ověříme použitelnost NAH na naše naměřená data a zjistíme podmínky při kterých výsledky vycházejí lépe nebo hůř.

### 1.3 Skenovací vibrometr

K bezkontaktnímu měření vibrační povrchu používáme skenovací vibrometr. Měřicí systém POLYTEC PSV-400 (viz obrázek 1.3) obsahuje čtyři základní komponenty [11]:

- Polytec Vibrometer Scanning Head
- Polytec Junction Box
- Polytec Vibrometer Controller
- PC



Obrázek 1.3: Měřicí systém POLYTEC PSV-400 - převzato z [11]

Pro měření rychlosti na povrchu objektu, skenovací hlava vibrometru vyzařuje laserový paprsek, který se odrazí od objektu a následně je obdržen skenovací hlavou [11]. PC zpracovává přijatý signál a referenční signál. Integrovaný FFT analyzátor ukazuje naměřenou rychlost objektu ve frekvenční oblasti. Vibrační povrchu se naměří pouze ve směru paprsku, jen normálová složka.

Měření se provádí po bodech, v nastavené uživatelem měřicí mřížce. Systém je ovládán přes uživatelské rozhraní (PC), které udává i dobu měření v daném bodě, což taky má vliv na přesnost. Důležitým předpokladem je dobrá odrazivost povrchu, což můžeme zkontrolovat pomocí indikátoru na skenovací hlavě vibrometru nebo v programu.

Naměřená data jsou zobrazena graficky a je možné vizualizovat celou plochu měřeného objektu. Software, který používáme, se jmenuje PSV (Polytec Scanning Vibrometr). Máme v tom dva módy, pro získávání a pro prezentace naměřených dat. V prvním modu nastavujeme měření: parametry pro FFT, měřicí síť bodu, rozměry a vzdálenost. V prezentačním modu můžeme zvolit různé varianty zobrazení dat, například zobrazit amplitudu nebo reálnou a imaginární složku rychlosti.

Zaznamenaný časový signál se skládá z diskrétního počtu vzorků. Tento software používá algoritmus FFT (Fast Fourier Transformation) pro generování odpovídajícího frekvenčního spektra [12]. Každá frekvence, která se objeví v časovém signálu, generuje spektrální čáru v spektru FFT. Počet vzorků zpracovávaných v FFT musí být mocninou dvou. Při měření v softwaru nastavujeme několik parametrů, tj. šířka pásma – BW v kHz, od a do - frekvenční rozsah v kHz, počet vzorků FFT –  $n_{\text{FFT}}$ .

Software vypočítá z toho další parametry [12]:

- Vzorkovací kmitočet:

$$f_{Vz} = 2,56 \cdot BW$$

- Časová délka jedne sekvenci:

$$t_{Sekv} = \frac{n_{\text{FFT}}}{BW}$$

- Frekvenční rozlišení:

$$\Delta f = \frac{1}{T_{Sekv}}$$

Taky můžeme nastavit funkce **remeasured** (přeměření), to znamená, že pokud při měření určitého bodu dojde k zhoršení odrazu paprsku nebo nějakému rušení, software označí ten bod příslušnou barvou a na konci měření vrátí se zpět a zopakuje měření v tom bodě. To značně ovlivňuje dobu měření. Obvykle stáčí i nižší kvalita odrazivosti materiálu pro získávání správných hodnot.

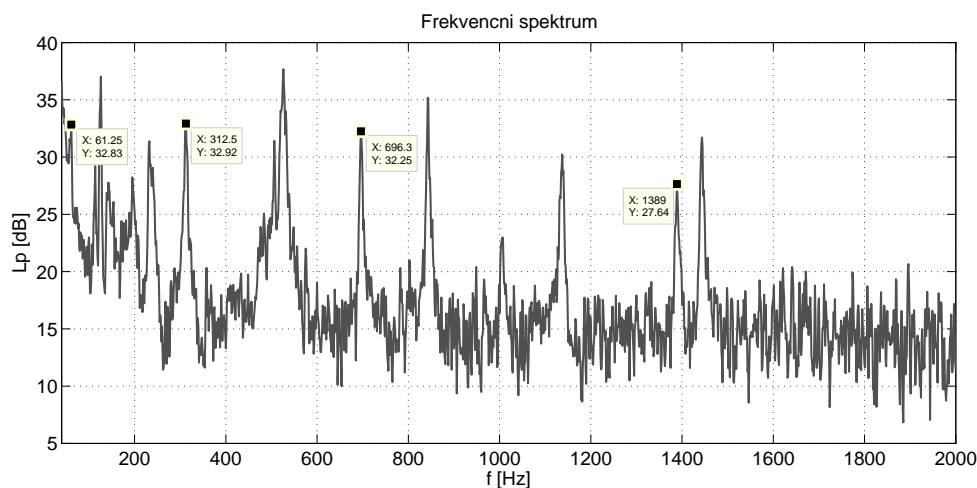


## Experiment

V této kapitole je detailně popsány použité membrány, jejich instalace a jaké byly využité přípravy a přístroje k samotnému měření. Níže jsou uvedené schematické obrázky pro lepší vizualizace průběhu měření.

### 2.1 Realizace měřicího řetězce

Jako zdroj rychlosti vibrací budíme obdélníkový kovový plech, který je umístěn ve středu čtvercové dřevěné, tuhé desky o rozměrech (122 × 122) cm. Samotný plech má rozměry (6,3 × 33,5) cm a tloušťku 0,5 mm. Umístění všech přípravku je ukázáno na obrázku 2.3. Horní a dolní okraje plechu jsou připevněny ke dřevěné desce.



Obrázek 2.1: Frekvenční závislost hladiny akustického tlaku

Vibrační budič TIRAVib byl namontován za kovovou deskou a jeho výstup je upevněný šroubem k destičce. Šejkr je buzen bílým šumem s vyrovnaným spektrem ve frekvenčním rozsahu 40 Hz až 1,64 kHz. Signál je zesílen zesilovačem DENON do konstantní napěťové úrovně (konkrétně 0,196 V), která byla kontrolována pomocí multimetru Agilent.

Mikrofon se používá pro kontrolu tvaru vyzařovaného spektra zvukového pole a je umístěn 0,5 m před zdrojem pod úhlem přibližně 60 stupňů od osy. Spektrum signálu je čárové, vrcholy odpovídají vlastním rezonančním kmitočtům (módům) použitého zdroje. Na obrázku 2.1 je zobrazena frekvenční závislost hladiny akustického tlaku, naměřená mikrofonem.

Celé měření bylo umístěno v bezodrazové místnosti, což znamená že zdroj je ve volném poli. Blokové schéma nastavení měření je uvedeno na obrázku 2.3 na straně 18.

## 2.2 Popis a instalace membrány

Používáme tři materiály z nanovláken různé tloušťky, kterými disponuje laboratoř. Jedná se o tři folie vyrobené z vícevrstvých nanovláken. Specifikované označení odpovídá výrobní technologii:

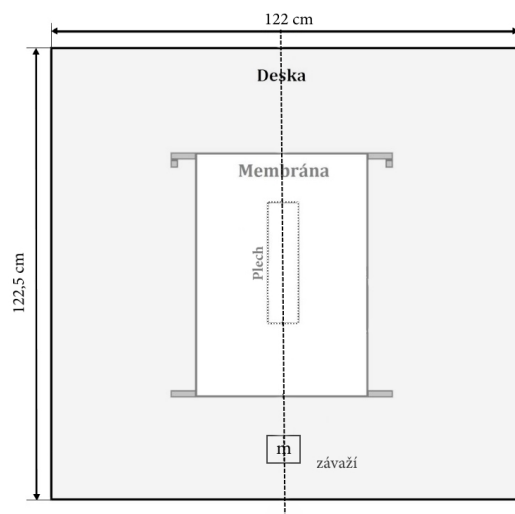
- **Materiál I:** GSM 4, S4-B/PVA
- **Materiál II:** GSM 10, P42L/DMF
- **Materiál III:** GSM 5, P42L

Membrána má obdélníkový tvar. Horní strana je přilepená na tenkou destičku z balzy a spolu s ní přelepena na dřevěnou lištu, ze které by měla volně viset. Tloušťka lišty určuje minimální vzdálenost, na kterou je možné membránu umístit před zdrojem. Během experimentu jsme zjistili, že materiál je moc jemný a nevisí volně dolů, přitahuje se k povrchu plechu pod vlivem elektrostatické síly. Proto na dolní části membrány je přilepená ještě jedna lehká destička z balzy. Dále zvětšujeme napínání materiálu přidáním rovnoměrného závaží, jak je znázorněno na obrázku 2.2.

Membrána byla proměřená s různým počtem závaží o různé hmotnosti. Má to vliv na tvar povrchu a její napínání. Na začátku jsme proměřili membránu bez závaží (natahuje jen balza) v různých vzdálenostech od zdroje. Poté k deštičce z balzy byly přidány závaží. V tabulce 2.1 jsou uvedeny hodnoty použitých závaží.

Tabulka 2.1: *Hodnoty hmotnosti použitých závaží*

Použitá závaží	Balza (bez závaží)	První závaží	Druhé závaží	Třetí závaží
Hmotnost [g]	2,9	23,9	44,9	237,3



Obrázek 2.2: Schematické naznačení umístění membrány o velikosti plochy  $(47,3 \times 60,2)$  cm před dřevěnou deskou. Vibrující plech je za membránou.

Membrána je zavěšena před vibrujícím plechem, viz. obrázek 2.2. Měníme postupně vzdálenost od zdroje.

Minimální vzdálenost před zdrojem na které se může membrána nacházet je 1,8 cm. Je to určeno tloušťkou lišty, na které je přilepena. Měření se provádělo po krocích 2 cm od minimální vzdálenosti do 20,5 cm. Všechny hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.2.

Jako nejvýznamnější polohy byly vybrány minimální, střední a maximální vzdáleností od zdroje, které jsou označeny tučně.

Tabulka 2.2: Hodnoty vzdálenosti membrány od vibrujícího plechu

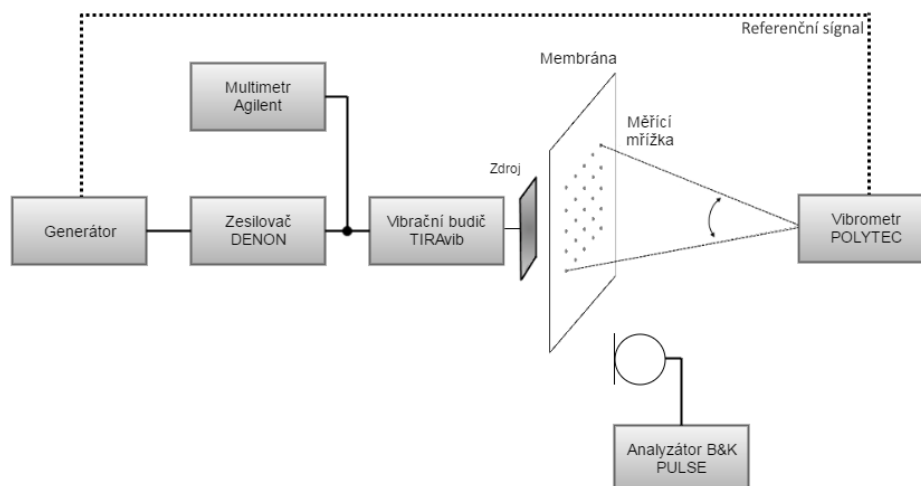
Vzdálenost [cm]	<b>1,8</b>	3,8	5,8	7,8	<b>9,8</b>	11,8	13,8	15,8	17,8	<b>19,8</b>
-----------------	------------	-----	-----	-----	------------	------	------	------	------	-------------

## 2.3 Měření vibrometrem

Vibrometr se nachází před membránou ve vzdálenosti 6,2 m a vně bezodrazové místnosti. Vliv chyby způsobené různými úhly dopadu paprsku na membránu je zanedbatelný při takhle velké vzdálenosti.

Pro měření rychlosti na povrchu objektu, skenovací hlava vibrometru vydává laserový paprsek, který se odrazí od objektu a následně je obdržena skenovací hlavou. Povrch membrány musí mít dobré odrazové vlastnosti, což bylo zkontrolováno pomocí indikátoru na skenovací hlavě. Rychlost vibrací povrchu je náměrná pouze jako normálová složka.

## 2. EXPERIMENT



Obrázek 2.3: *Blokové schéma měřicího řetězce, kolem zdroje není naznačena dřevěná deska.*

Měření se provádí po bodech, v nastavené uživatelem měřicí mřížce. Podoba mřížky a jak se pohybuje paprsek při měření dalších bodů je znázorněna na obrázku 2.3.

Naměřená data jsou zobrazena pomocí softwaru PSV graficky, ve tvaru reálné a imaginární složky rychlosti vibrace. Je možné zobrazit také její absolutní hodnotu (amplitudu) a exportovat data přímo do Matlab.

Na nastavení FFT závisí rozlišení, přesnost výstupních dat a celková délka jednoho měření. Pro kompromis mezi dobou měření a rozlišením FFT máme nastaveno 800 vzorků, průměrování 3 sekvencí, frekvenční rozsah 0 až 2 kHz. Tomu odpovídá frekvenční rozlišení 2,5 Hz.

Měřicí mřížku nastavujeme jednou pro samotný zdroj (plech), dále pro membránu. Pro plech jsme nastavili rozměr mřížky ( $5 \times 19$ ) bodů, měření přitom trvalo 2:15 minut. Zatímco pro membránu jsme zvětšili měřenou oblast se stejnou hustotou bodů na ( $25 \times 31$ ) bodů, doba měření byla 16:13 minut. Vzdálenost mezi body činila 1,26 cm a 1,57 cm v ose  $x$  a v ose  $y$  resp.

Celková proměřená mřížka na membráně je umístěná uprostřed membrány, kolem zdroje vibrací, a má rozměry ( $30,34 \times 47,20$ ) cm. Celkově mřížka měla 775 bodů, a taková hustota měřících bodů je dostačující k zobrazení očekávaných módů vibrace.



## 2.4 Zpracování naměřených dat

Při pokusu aplikovat akustickou holografii na naměřená data, jsme byly zaměřeny na ověření použitelnosti metody. Proto byla zvolena nejjednodušší z možností implementace holografie, rovinná NAH bez použití filtru. Její podrobnější popis je v podkapitole 1.2.2 a hlavně byl využit algoritmus, popsáný v podkapitole 1.2.3.

Nejprve naměřená data byly načteny do Matlabu a zpracovány do vhodného tvaru matic, ve kterých jednotlivá prvky odpovídají naměřené hodnotě v konkrétním bodě. Jelikož výpočet je prováděn z hodnot naměřených na zdroje (viz. obr. 1.2), bylo potřeba doplnit nulami matici zdroje ( $5 \times 19$ ) do rozměru matice membrány ( $25 \times 31$ ). Je-li zdroj uprostřed nebo je trochu posunutý, taky má vliv na porovnání výsledku. Počítáme rychlost akustického pole na nějaké vzdálenosti od zdroje, a můžeme potom porovnávat výsledky se skutečnými hodnoty rychlosti, naměřenými pomocí membrány a vibrometru.

Druhým bodem je aplikace dvoudimenzionální Fourierovy transformace na hodnoty akustické rychlosti měřené na zdroje (kmitajícím plechu), které jsou komplexní čísla zahrnující v sobě amplitudu a fázi. Pro tento účel jsme použili existující funkci **fft2**.

Po Fourierovy transformace hlavní otázkou je přechod do  $k$ -domény. Použití transformační funkce je možné pouze v doméně vlnových čísel, kde jednotlivá  $k_{ij}$  odpovídají měřeným bodům v prostoru (viz. 10).

K predikce holografické roviny na určitou vzdálenost od zdroje používáme přímou transformační funkci. V našem případě potřebujeme vztah pro výpočet akustické rychlosti taky z naměřené rychlosti zdroje (viz vzorec (1.8) na stránce 10).

Po vynásobení transformační funkcí aplikujeme zpětnou Fourierovou transformaci **ifft2** a dostáváme rychlost pole v predikované rovině. Konečně je vhodné vypočítat amplitudu rychlosti, jelikož fáze může být posunutá a od naměřené libovolně lišit.

Pro porovnání výsledků po aplikaci NAH algoritmu jsme využili jednoduchou funkci **corrcoef** kterou disponuje Matlab.

Na vstupu jsou dvě matice: hodnoty vypočtené z plechu na určitou vzdálenost a hodnoty naměřené v této vzdálenosti. Funkce převádí je na vektory a počítá lineární závislost dvou hodnot. Využívá definice Pearsonova korelačního koeficientu a výsledkem je **R**. Pokud výstupní hodnota blíží se 0, data mezi sebou nekorelují a podobnost je malá. A když  $|\mathbf{R}|$  se blíží k 1, tvar vstupních dat je podobný.

V výsledku měření jsou grafy závislosti korelačních koeficientu na vzdálenosti a na různých kombinacích nastavení měření, podrobněji popsáno v následující kapitole.



## Výsledky měření

Měření je prováděno pro tři membrány, kterými disponuje laboratoř (podrobnější popis viz podkapitola 2.2 na str. 16). Zdrojem akustického pole je malý kmitající plech, umístěný přímo za membránou. Blokové schéma umístění membrány je na obrázku 2.2 na str. 17. Ke snímání normálové složky akustické rychlosti byl použit laserový vibrometr, jehož umístění a blokové schéma samotného měření je na obrázku 2.3.

Ultralehké materiály ze kterých membrána může být vyráběna, se rozlišují svou plošnou hustotou. Přidáváme různá závaží pro jeho napnutí a taky máme možnost měnit vzdálenost umístění membrány od zdroje. Zvolené nastavení a jejich kombinace jsou popsány v podkapitole 2.2.

V této kapitole ukážeme výsledky pro každou kombinaci nastavení membrán, jejich porovnání a na konci výsledky aplikace algoritmu akustické holografie na data naměřená na zdroji.

Z důvodu velkého množství kombinací membrán, závaží, vzdálenosti a frekvencí (kolem 360 různých zobrazení nebo 30 kombinací měření) bylo obtížné zvolit nejzajímavější grafy k porovnání. Některé výsledné obrázky jsou uvedeny a popsány přímo v textu, ostatní se nacházejí v příloze.

### 3.1 Zdroj akustického pole

Jako zdroj akustického pole budíme kovový plech v tuhé desce, která je umístěna ve volném poli. Podrobnější popis je v podkapitole 2.1. V prvním kroku je proměřen celý povrch vibrujícího plechu a zvoleny čtyři frekvence odpovídající určitým módům plechu. Jednotlivé vrcholy jsou označena na obrázku 2.1 na str.15 a je vidět, že byly zvoleny v celém rozsahu frekvenčního pásma. Na těchto frekvencích vlastní módy zdroje jsou dobře rozlišitelné, což je vhodné k zobrazení a porovnání výsledků. Pracujeme s naměřenými data jen pro čtyři zvolené frekvence *60 Hz*, *312 Hz*, *697 Hz* a *1.39 kHz*.

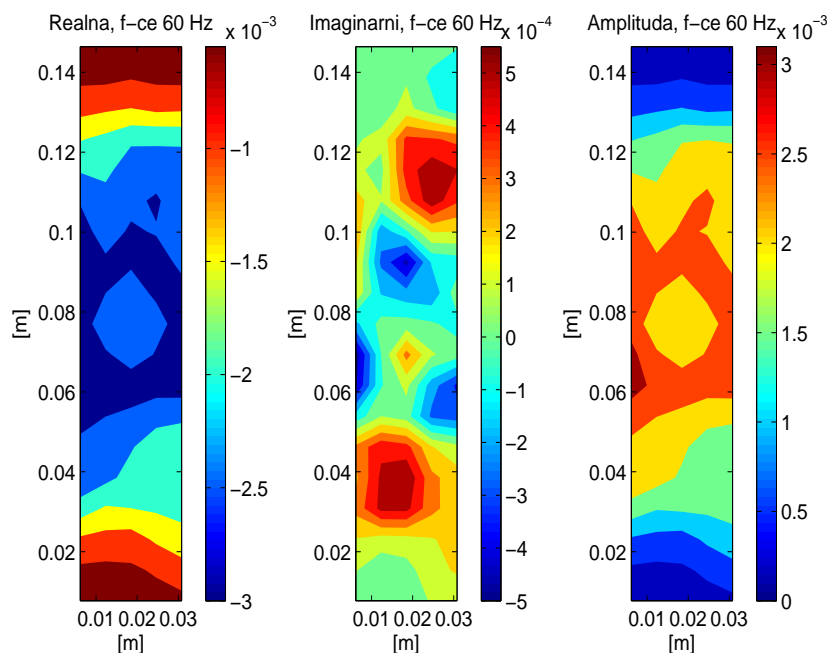
Ukážeme imaginární a reálné složky rychlosti, které zahrnují v sobě fáze pohybu. Obrázek 3.1 je zobrazením akustického pole pro frekvence 60 Hz, na

### 3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

kteřé je dobře vidět souvislost imaginární, reálné složku a amplitudy.

V příloze na obrázcích A.1 a A.2 je zobrazení přímo změřeného zdroje (kmitající kovový plech) pro všechny frekvence. K vykreslení je využita vypočtená absolutní hodnota akustické rychlosti (amplituda), což je vhodné pro porovnání. Fáze může být posunutou a proto porovnávat takové obrázky není možné. Díváme se jen na maximální výchylku kmitání plechu.

Zjištěný tvar vibrační plechu odpovídá teoretickým předpokladům. Největší změny rychlosti jsou soustředěné uprostřed, protože plech byl uchycen na dolním a horním okraji. Dále na tyto hodnoty je aplikovaná akustická holografie.



Obrázek 3.1: Rychlost vibrace plechu pro frekvence 60 Hz. Vykreslený jsou reálná, imaginární a absolutní hodnota (amplituda) rychlosti zdroje [m/s].

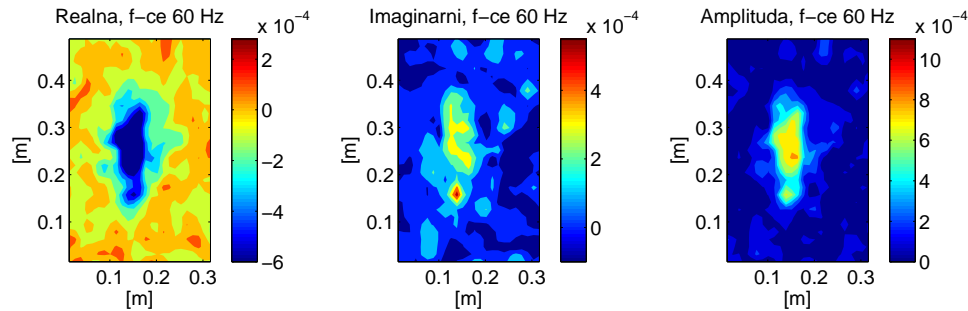
### 3.2 Membrána bez závaží

Byly provedeny celkem 19 měření pro I. membránu k podrobnému prozkoumání vlivu jednotlivých nastavení. Membrána je postupně posunutá od zdroje po krocích 2 cm, vzdálenosti jsou uvedeny v tabulce 2.2 na str. 17.

Jak už bylo uvedeno, měnili se napnutí membrány a vzdálenosti od zdroje, a za výsledek popíšeme vliv různých nastavení.

Prvním problémem bylo vhodně nastavit měřicí mřížku na membráně (tj. body ve kterých vibrometr určuje hodnoty vibrace). Měla by odpovídat rozložení měřících bodů pro zdroj (stejný krok po ose  $x$  a  $y$ ) a celkem obklopit část

kmitající před zdrojem membrány. Konečné nastavení bylo zvoleno s ohledem na délku měření (je ovlivněná počtem bodů) a vhodné zobrazení všech módů vibrace.



Obrázek 3.2: Rychlost kmitání I. membrány pro frekvence 60 Hz. Vykreslený jsou reálná, imaginární a absolutní hodnota (amplituda) akustické rychlosti [m/s].

Na obrázku 3.2 je zobrazení hodnot rychlosti kmitající membrány pro frekvence 60 Hz. Vykresleny jsou reálné a imaginární složky rychlosti i jejich absolutní hodnota (amplituda). Jak už bylo řečeno výše, k porovnání změny obrazu akustického pole se vzdáleností, ukážeme jen amplitudu pro každou frekvenci a všechny vzdálenosti.

V příloze A.4 je zobrazení vývoje měřeného pole s rostoucí vzdáleností od zdroje, ukazujeme nejlépe patrné změny pro frekvence 312 Hz. Taky pro ostatní tři frekvence (obrázky A.3, A.5 a A.6) můžeme vidět jak se zvětšuje pole vytvořené zdrojem a jak klesají naměřené hodnoty akustické rychlosti s rostoucí vzdáleností. Na velké vzdálenosti od zdroje je už příliš velký vliv šumu, proto neukazujeme obrazy pro vzdálenost větší než 9,8 cm, jen maximální 19,8 cm.

Do určité meze (kolem 9 cm od zdroje) je vidět, že vibrace membrány odpovídá vibraci plechu. Po překonání vzdálenosti 9,8 cm hodnoty akustické rychlosti klesly přibližně o 50% oproti hodnotám při minimální vzdálenosti (1,8 cm). Ale ty data ještě mohou být použitelné pro akustickou holografii k predikci tvaru zdroje. Proto membrána byla proměřená i dál až do maximální vzdálenosti, kde hodnoty ztrácejí se v šumu.

Výše popsané chování je celkem podobné pro všechny čtyři zvolené frekvence. Jen pro vysoký kmitočet 1,38 kHz nastalo ztracení dobře rozlišitelného tvaru módu pro menší vzdálenost.

### 3.3 Membrána se závažím

Dále je zajímavé se podívat jaký vliv bude mít napnutí membrány a jestli to odpovídá teoretickým předpokladům a výsledkům předchozích experimentů,

popsáným v podkapitole 1.1.

Proměřený vliv 3 různých zvolených závaží, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.1 na str.16, je ukázán v této podkapitole.

Na obrázku A.7 a) jsou znázorněny amplitudy pro I. membránu bez napnutí a se zatížením 44,9 g ve vzdálenosti 1,8 cm od zdroje pro frekvence 312 Hz. Je vidět, že při větším napnutí membrány se zmenšuje vliv šumu způsobeného vlastními módy membrány, což odpovídá teoretickým předpokladům.

Na obrázku A.7 b) jsou amplitudy pro nenapnutou I. membránu a pro membránu se závažím 273,3 g v minimální vzdálenosti 1,8 cm od zdroje, pro frekvence 60 Hz a 1385 Hz. Pro tato velké napnutí se zmenšuje výchylka, které by mohla dosáhnout membrána bez napnutí. Ale po střední vzdálenosti od zdroje, jak i u nezatížené membrány, tvar vibrace nelze rozlišit kvůli příliš malým hodnotám rychlosti kmitání, proto je tady neuvádíme.

### 3.4 Další membrány

Pro porovnání s první membránou pro II. materiál a III. materiály byly provedeny celkem 10 měření. Pro tři různé vzdálenosti, označené v tabulce 2.2 tučně, a pro napnutí jen některými závaží z 2.1, které byly vhodné pro takto jemné membrány.

Na obrázku A.7 c) jsou znázorněny amplitudy pro II. membránu bez závaží a se závažím 44,9 g ve vzdálenosti 1,8 cm od zdroje pro frekvence 1390 Hz. II. materiál je jemnější a tenčí než první, takže má ještě menší ovlivňující hmotnost. Z obrázku je vidět, že kolem membrány je menší vliv šumu, není ovlivněná celá její plocha. Módy vibrace jsou výraznější než u I. membrány ale rychlost nabývá menších hodnot.

Ve vzdálenosti 10 cm od zdroje pro 1.39 kHz nejde pozorovat módy vibrace ani s přidáním závaží, ale pro nízkou frekvenci tvar ještě je vidět a hodnoty rychlosti klesly o přibližně 50%.

III. membrána má nejmenší hmotnost ze všech a je tolik jemná, že nedalo se jí proměřit bez napnutí (nevisela volně dolů). Přidáním závaží 44,9 g jsme dosáhli volně visející membrány. Na obrázku 3.7 vpravo jsou hodnoty rychlosti pro frekvence 1,38 kHz v minimální vzdálenosti. Neuvádíme obrázek pro maximální vzdálenost, jelikož i vzdálenosti 10 cm není vidět tvar módů membrány jak i u předchozích membrán. Je vidět že v minimální vzdálenosti od zdroje hodnoty rychlosti vibrace jsou větší než jsme pozorovali na I. a II. membráně při všech nastaveních. Neuvádíme obrázek pro maximální vzdálenost, jelikož i při střední vzdálenosti (10 cm) není vidět tvar modu membrány jak i u předchozích membrán (ztrácí se v šumu).

### 3.5 Porovnání s výsledky NAH algoritmu

Jak je popsáno v 2.4 na naměřená data jsme aplikovali implementovaný algoritmus rovinné akustické holografie v blízkém poli bez využití korekce a filtru, což v našem případě není hlavní otázkou. Zde se zabýváme zhodnocením použitelnosti metody měření akustického pole pomocí nanomembrány a skenovacího vibrometru.

Po výpočtu predikovaných hodnot na určité vzdálenosti jsme schopni výsledky porovnat s hodnotami naměřenými pomocí membrány, a určit jestli akustická holografie je použitelná pro tato měření. Ale implementovaný NAH algoritmus nedokonalé počítá hodnoty akustického pole kolem zdroje. Při pokusu využít zpětnou predikci hodnot, měřených pomocí membrány, zpátky na zdroj, jsme dostali nepoužitelné výsledky, kvůli velkému vlivu evanescentních vln v blízkosti zdroje.

Vyzkoušeli jsme predikovat akustické pole kolem zdroje pro zvolené čtyři frekvence (viz hodnoty v podkapitole 2.2) a na všechny vzdálenosti, ve kterých jsme skutečně měřili.

Pro jednotlivý výpočet pomocí funkce NAH vytvořené v Matlabu, potřebujeme zadat na vstup komplexní hodnoty akustické rychlosti měřené na zdroje, které předem byly doplněny nulami o rozměr membrány. Dále počítáme predikce vždy pro jednotlivou frekvenci a vzdálenost od zdroje.

Pro porovnání s tvarem módů změřené membrány jsme využili korelaci a vykreslili závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti, na které jsme měřili a aplikovali NAH.

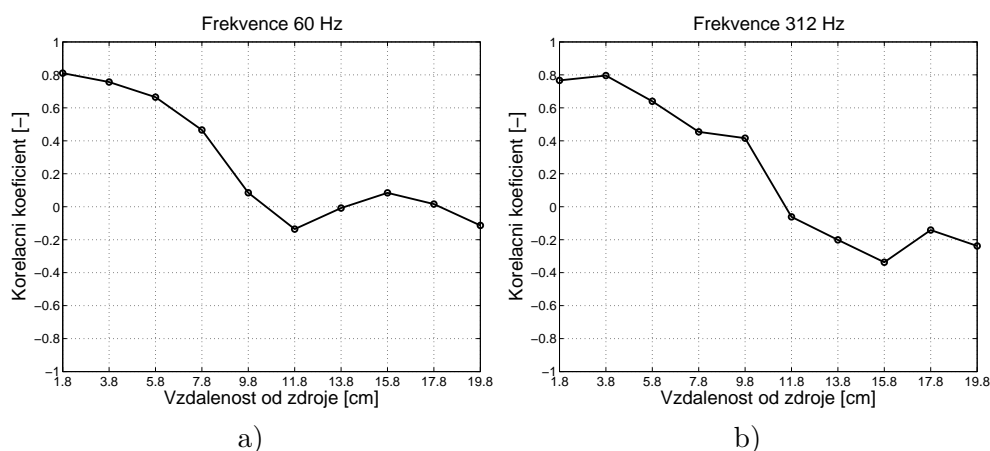
Na obrázku 3.3 a) pro kmitočet 60 Hz je vidět jak podobnost dvou poli postupně klesá se rostoucí vzdáleností. Už po hodnotě 7,8 cm podobnost je velmi mála, což je dle očekávání. Na takto velké vzdálenosti byly naměřené zašuměné hodnoty akustické rychlosti. A je vidět, že na nízkých kmitočtech je měření přesnější než na vyšších.

Pro frekvenci 310 Hz na grafu 3.3 b) je vidět mez, po které hodnoty tvarově už nejsou podobné. Ten se nachází ve vzdálenosti kolem 9,8 cm, což odpovídá mezi rozlišitelností módů i pro naměřené hodnoty (viz 3.2). Může to být způsobeno samotnou funkcí výpočtu korelačního koeficientu, který je větší při lepší podobnosti dvou zobrazení.

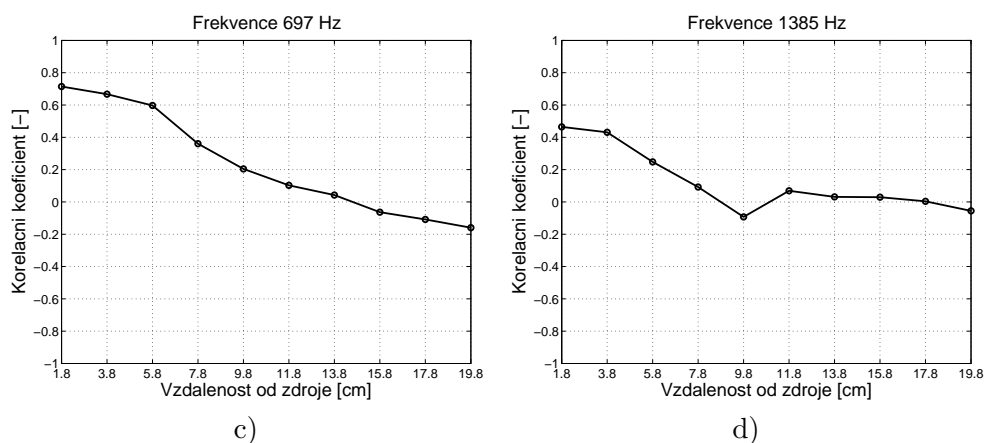
Pro frekvenci 697 Hz na obrázku 3.4 a) hodnota korelace klesá rovnoměrně, ale nejsou příliš vysoká. Stejně jako u menších kmitočtu vzdálenost 9,8 cm je krajní, kde ještě je vidět nějakou podobnost.

A nakonec nejvyšší frekvence, pro kterou byly zpracovány naměřená data je 1,385 kHz, a pro ní korelační koeficient nabývá malých hodnot. Blíží se k nule už na vzdálenosti 7,8 cm. Může to být způsobeno jak velkým zašuměním naměřených dat pro vysokou frekvenci, tak i horším výsledkem aplikace rovinné NAH pro vysoké kmitočty. Pokud korelační koeficient je kolem nuly a nabývá záporných hodnot, to znamená jen, že data nejsou podobná. Je důležitá pro toto porovnání absolutní hodnota koeficientu.

### 3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ



Obrázek 3.3: Závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti od zdroje pro porovnání hodnot naměřených na I. membráně a predikovaných pomocí NAH pro frekvence 60 Hz (obr. a) a 310 Hz (obr. b).

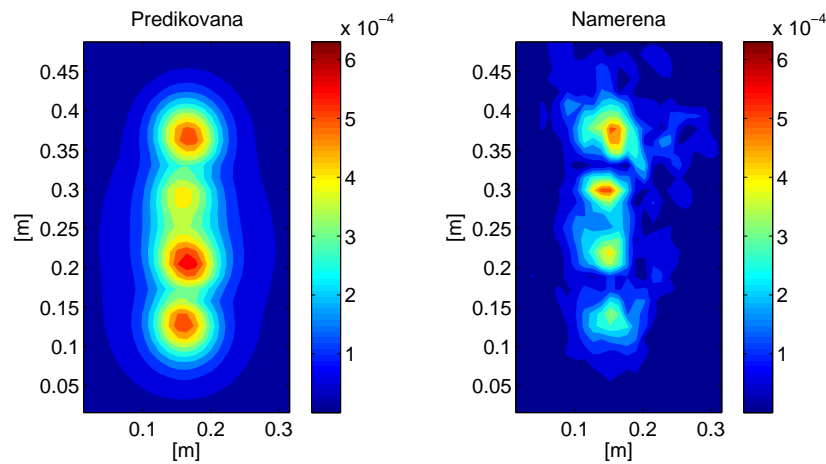


Obrázek 3.4: Závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti od zdroje pro porovnání hodnot naměřených na I. membráně a predikovaných pomocí NAH pro frekvence 697 Hz c) a 1,39 kHz d).

Taky v příloze jsou další varianty porovnání predikovaných hodnot pole s hodnotami naměřenými, a tj. s II a III. membránou, a i s měřením pomocí napnuté membrány (obrázky A.8 a A.9). Korelační koeficient je o hodně menší, než u první nenapnuté membrány.

Omezená vzdálenost použitelnosti akustické holografie a vliv membrány na naměřené akustické pole, odpovídají teoretickým předpokladům a výsledkům předchozích experimentů. I když nebyly využité pokročilé verze rovinné NAH, dalo se jí aplikovat na proměřený zdroj a porovnat s hodnotami akustického pole, měřenými pomocí membrán.





Obrázek 3.5: Porovnání naměřených hodnot na I.membráně ve vzdálenosti 3,8 cm od zdroje a hodnot predikovaných pomocí NAH pro frekvence 312 Hz. Vykreslena je amplituda akustické rychlosti [m/s].

Ale výsledky porovnání ukazují omezení použitelnosti holografie v našem případě. Dále jsou uvedeny výsledky predikce pro dvě krajní situace, jedna z kterých je nejvíce vhodná pro aplikace NAH a druhá nejméně.

Na závěr zhodnotíme že, nejlépe naměřené hodnoty odpovídají vypočteným pro frekvenci 312 Hz ve vzdálenosti od zdroje 3,8 cm. Tvar příslušných akustických polí (amplituda akustické rychlosti predikovaná a naměřená) je zobrazen na obrázku 3.5 a je to nejlepší výsledek aplikaci NAH. Jde jen o porovnání s první membránou bez zatížení.

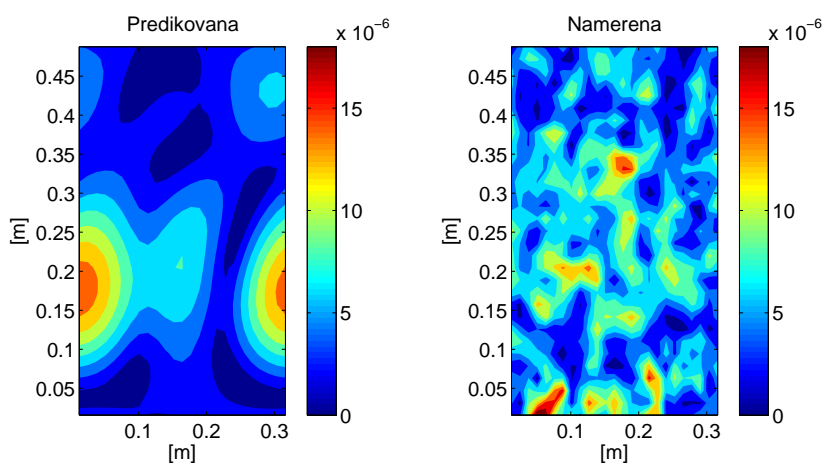
Nejhůřší aplikace NAH jsme dosáhli pro nízké frekvence a velké vzdálenosti. Na obrázku 3.6 je porovnání amplitudy vypočtené akustické rychlosti pole a amplitudy rychlosti naměřené pomocí membrány. Membrána už nezobrazuje na takto velké vzdálenosti akustické pole kolem zdroje a na obrázku je vidět jen šum.

Když jsme aplikovali NAH na naměřené hodnoty přímo na zdroje, matice hodnot pro zdroj by měla být doplněná nulami o velikost matice membrány. Ale pokud membrána při reálném měření byla trochu posunutá vůči zdroje, korelace pro různá posuny matice zdroje by měla vyjít přibližně stejná.

Proto jsme ověřili tuto vlastnost a posouvali matice o 1 bod kolem střední polohy. To znamená, že umístění zdroje bylo uprostřed membrány, a zatím postupně posunuté kolem této polohy, maximálně o 5 bodů. Výsledný korelační koeficient se měnil v závislosti na poloze zdroje, ale jen o malé zanedbatelné hodnoty (přibližně o 10%). Proto NAH je aplikována na případ, kde je zdroj uprostřed membrány a nemělo by to hodně ovlivnit výsledek.

Vypočtené hodnoty akustické rychlosti pomocí algoritmu akustické holografie odpovídají naměřeným pomocí všech třech membrán. Korelační koefi-

### 3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ



Obrázek 3.6: Porovnání hodnot predikovaných pomocí NAH a naměřených hodnot ve vzdálenosti 17,8 cm od zdroje pro frekvence 1,38 kHz. Vykreslena je amplituda akustické rychlosti [m/s].

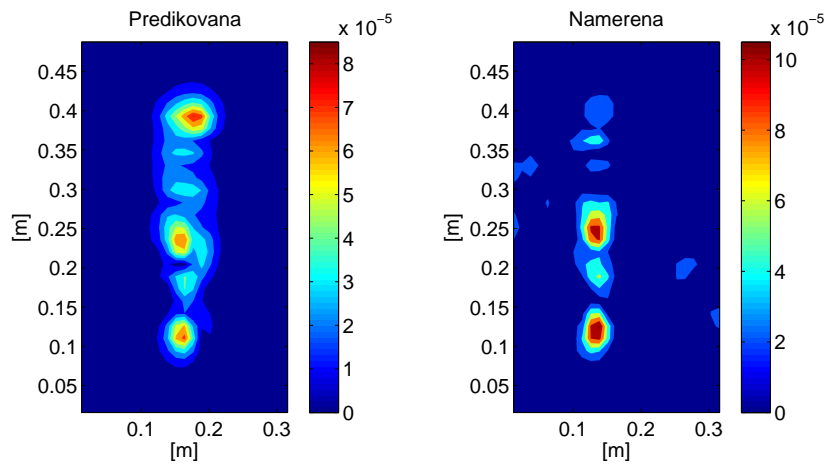
cient nabývá maximální hodnoty 0,8 pro nenapnutou membránu v minimální vzdálenosti od zdroje a pro nízké frekvence. Napnutí hodně mění velikost hodnoty rychlosti (je vyšší), a proto korelační koeficient je menší. Pokud nabývá hodnot větší 0,5 vizuální podobnost tvaru vibrace je dobře viditelná.

V příloze jsou další závislosti korelačního koeficientu na vzdálenosti, tj. pro porovnání s hodnotami naměřenými pomocí dvou dalších membrán a pomocí napnutých membrán různými závaží. Na obrázcích A.8 a) až d) jsou závislosti na vzdálenosti pro tři různé zatížení I. membrány a pro každou frekvenci. Data byla naměřena jen pro tři vzdálenosti, vzhledem k velkému počtu měření.

Při porovnání s měřením na nenapnuté membráně (viz podkapitola 3.3) je vidět, že podobnost s predikovanými hodnoty je stejná. Z toho můžeme předpokládat, že napnutí membrány neovlivnilo reálné hodnoty akustické rychlosti pole.

Na dalších obrázcích A.8 e), f) a A.9 a) až f) jsou výsledky pro hodnoty naměřené pomocí druhé a třetí membrány, které byly jemnější oproti první membráně. Dále je vidět že podobnost s vypočtenými pomocí holografie hodnotami je menší, než u první membránu. Pro případy napnutí membrán i u minimální vzdálenosti od zdroje je korelační koeficient nízký, ale podobnost tvaru módu je ještě dobře vidět i když hodnoty rychlosti jsou docela rozdílné.

Na obrázku 3.7 je porovnání zobrazení predikovaného pole a pole naměřeného III. membránou s malým zatížením. Tvarově obrázky jsou podobné i na frekvenci 1,38 kHz ale pro minimální vzdálenost od zdroje. Korelační koeficient pro tento případ byl kolem 0,3. Tak že porovnání vizuální podobnosti dat a hodnot se liší, což je způsobeno ne moc vhodnou volbou metody porovnání tvaru akustických polí.



Obrázek 3.7: Porovnání hodnot predikovaných pomocí NAH a naměřených hodnot ve vzdálenosti 1,8 cm od zdroje pro frekvence 1,387 kHz. Vykreslená je amplituda akustické rychlosti [m/s].

Do měření byly zahrnuté další chyby, a to jsou například nedokonalý tvar membrán (mohli nerovnoměrně být vzdálené od plechu a mít prohnutí), taky posuny membrány na různé vzdálenosti od plechu byly prováděné ručně a proto nejsou hodnoty vzdálenosti použité při výpočtu NAH moc přesné. Ale však hodnocení těchto výsledků je nejlépe provádět vizuálně a pohybovat, zda vypočtené hodnoty odpovídají realitě.



---

## Závěr

V bakalářské práci jsme experimentálně prozkoumali metodu měření akustické rychlosti na ultralehké membráně pomocí laserového vibrometru. V teoretické části jsme se seznámili s popisem metody a formulaci problému, které nastávají při praktické realizaci konečné membrány. Na naměřená data je aplikována akustická holografie v blízkém poli, jejíž různé způsoby implementace jsou popsány v teoretické části.

Pro vyhodnocení měření akustického pole je využito časového spektra zdroje tvořeného z kovového plechu, umístěného v tuhé desce. Uvedené výsledky měřené na membráně pro jednotlivé kmitočty odpovídají vlastním módům použitého zdroje. Ke snímání akustických veličin je využit měřicí systém POLYTEC-400, kterým disponuje laboratoř.

Výsledky ukazují, že membrána při napnutí lépe odpovídá vibracím zdroje, což může být spojené s vyrušením módů membrány vlivem přidaného závaží. Materiál ze kterého membrána je vyráběna by měl být co nejlehčí, aby minimalizovat vliv její hmotnosti.

Pro překročení určité vzdálenosti naměřené hodnoty se ztrácejí v šumu. Přidání hmotnosti nemá na tu hranici značný vliv, ale ovlivňuje maximální výchylku kmitu. Naměřená data jsou porovnané s výsledky akustické holografie, která je aplikovaná na změřené hodnoty rychlosti přímo na zdroji. Pro malé vzdálenosti od zdroje výsledné predikované hodnoty jsou shodné s naměřenými hodnoty, což je dle očekávání. Některé zajímavé výsledky jsou ukázány a popsány v kapitole 3, ostatní jsou v příloze.

Je možné říct, že membrána je vhodná pro měření akustického pole, ale jsou tam přenášené chyby způsobem implementací měření. Rekonstrukce zvukového pole lépe odpovídá naměřeným hodnotám pro nenapnuté membrány a ve vzdálenostech do 10 cm od zdroje pro nízké kmitočty (60 Hz a 312 Hz).

Všechny požadavky kladené v této práci jsou splněné, a k dalším měřením bych doporučila lepší implementaci algoritmu akustické holografie (např. SONAH), podrobnější měření dalších membrán a využití efektivního přístupu ke zpracování a zobrazení naměřených dat.



---

## Literatura

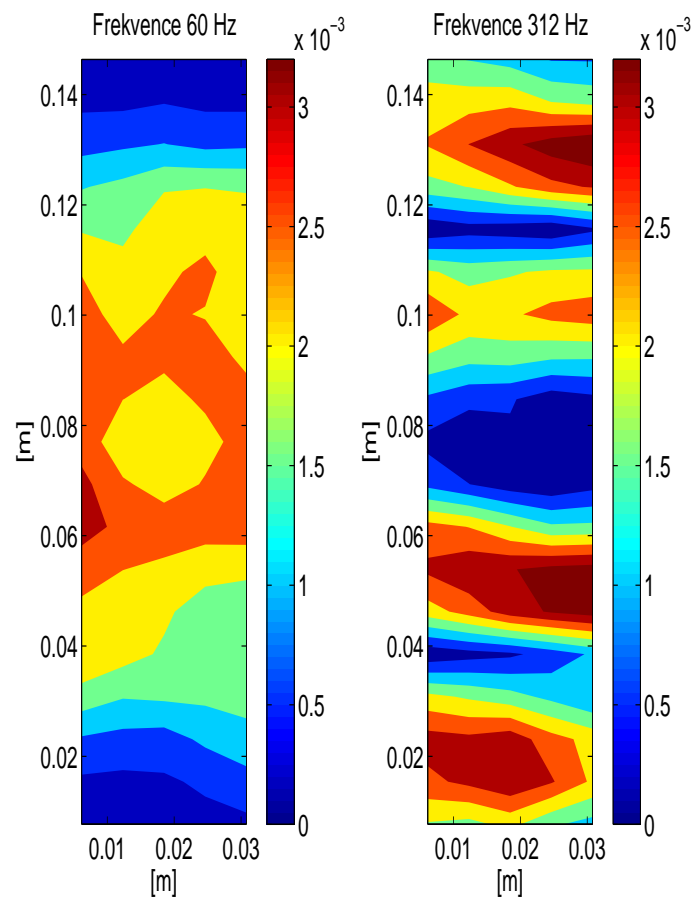
- [1] Leclere Q., L. B.: Nearfield acoustic holography using a laser vibrometer and a light membrane. *J. Acoust. Soc. Am.*, ročník 126(3), 2009: s. 1245–9.
- [2] Antonio A. Pereira, Q. L.: Assessment of acoustic pressure holograms from membrane velocity measurements. *Applied Acoustics*, ročník 71, 2010: s. 583–585.
- [3] Koutný A., Š. P.: Reconstruction of normal surface velocity from measurement of acoustically induced vibration of a thin membrane. *Proc. of Euronoise 2014, Praha*, 2014.
- [4] Leclere Q., L. B.: Particle velocity field measurement using an ultra-light membrane. *Applied Acoustics*, ročník 69, 2008: s. 302–310.
- [5] ZHOU, Z.: *MEMOIRE-THESIS, Acoustic particle velocity measurement by ultra-light membrane and its applications in acoustic holography*. France: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [6] Christopher H.M. Jenkins, U. A. K.: Membrane vibration experiments: An historical review and recent results. *Journal of Sound and Vibration*, ročník 295, 2006: s. 602–613.
- [7] Prezelj J., L. P.: On acoustic very near field measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, ročník 40, 2013: s. 194–207.
- [8] Finn Jacobsen, Y. L.: Near field acoustic holography with particle velocity transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, ročník 118, 2005: s. 3139–3144.
- [9] Williams, E. G.: *Fourier Acoustics. Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*. United Kingdom, Cambridge: Academic Press, 1999.

## LITERATURA

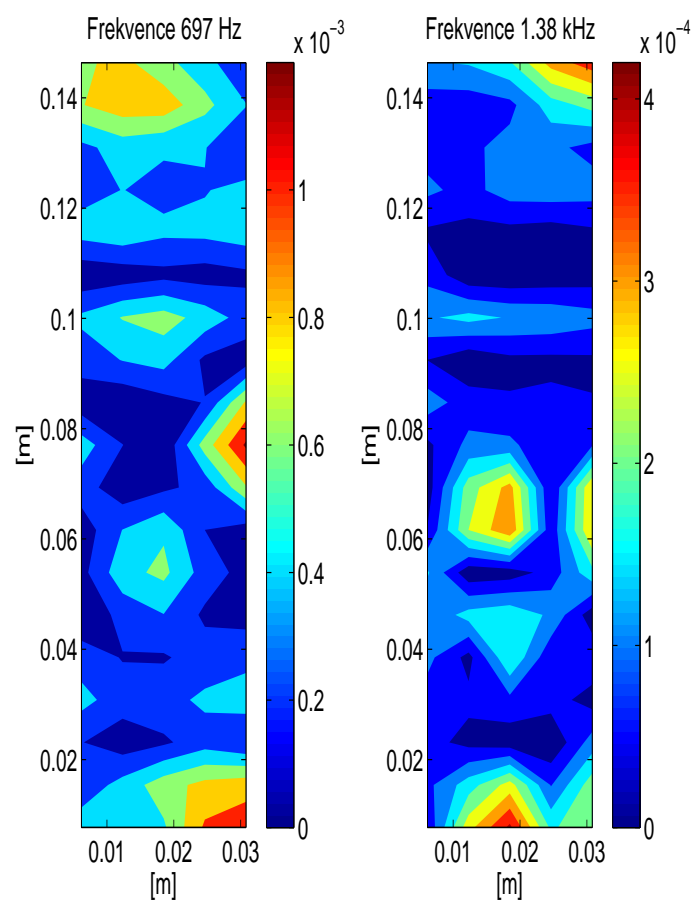
---

- [10] Z., H.: Akustická holografie: prostředek pro bezkontaktní analýzu. *Elektrorevue*, 2005, [online]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05028/index.html>
- [11] Polytec: *Polytec Scanning Vibrometr*. Software Manual.
- [12] Polytec: *Polytec Scanning Vibrometr*. Theory Manual.

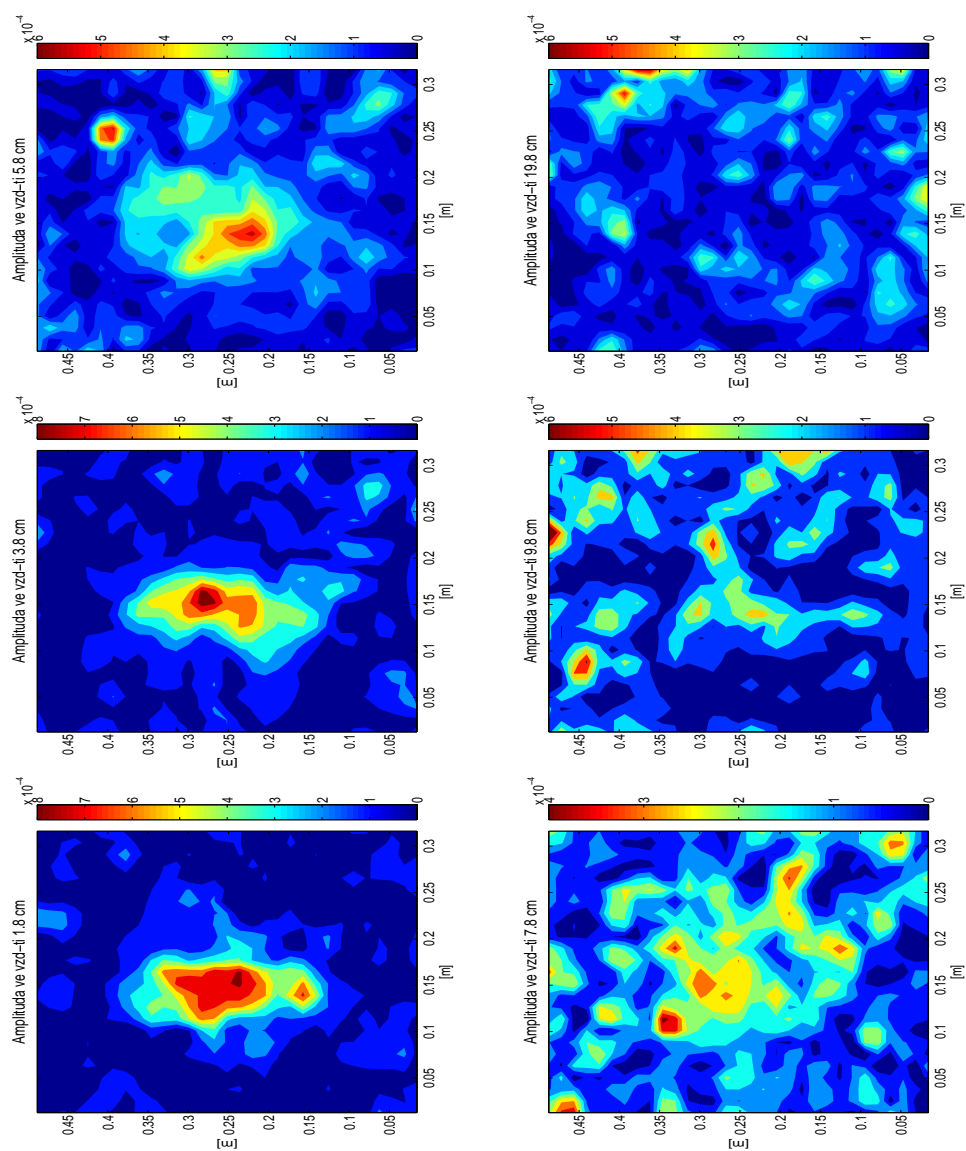


**Grafy**

Obrázek A.1: Rychlost vibrace zdroje [m/s] pro frekvence 60 Hz a 312 Hz.

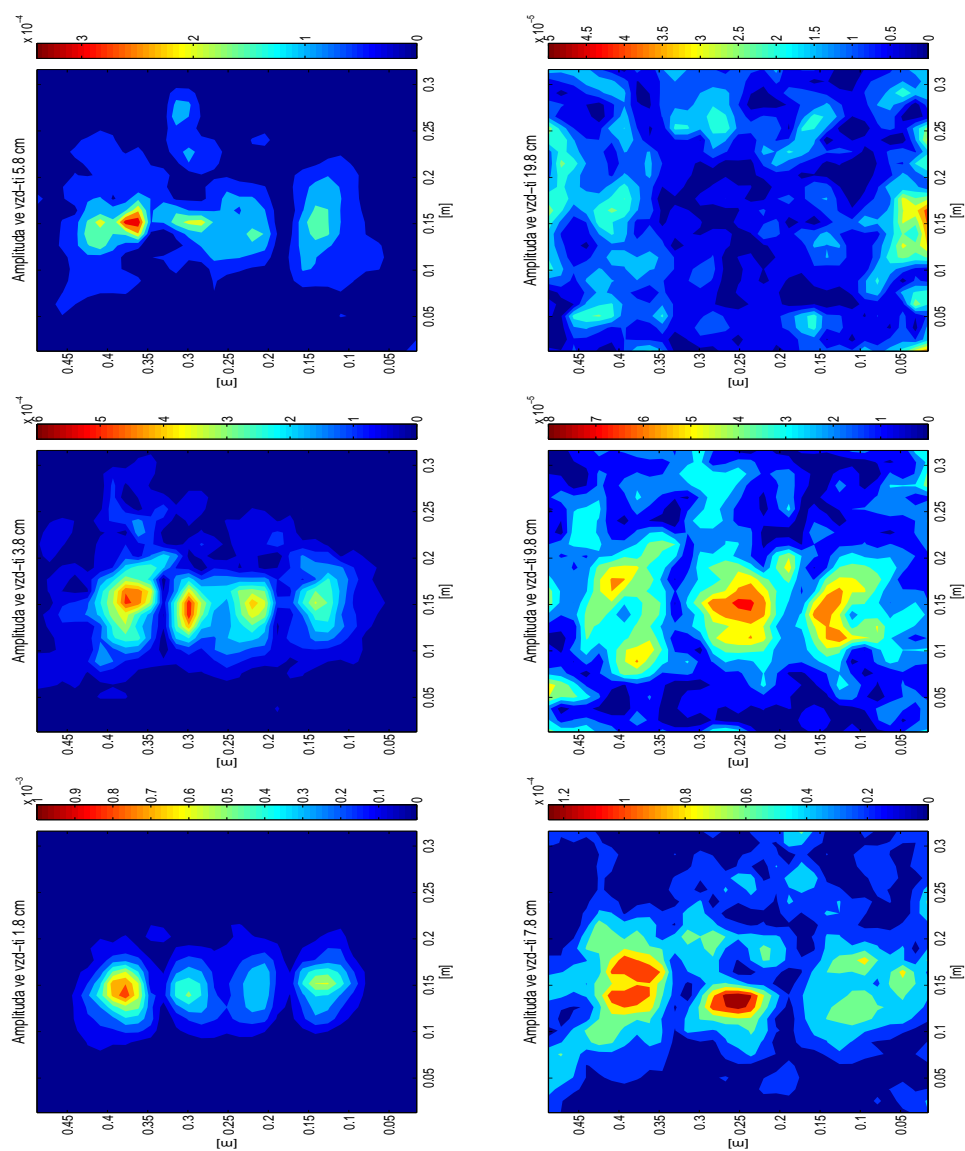


Obrázek A.2: Rychlost vibrace zdroje [m/s] pro frekvence 697 a 1,38 kHz

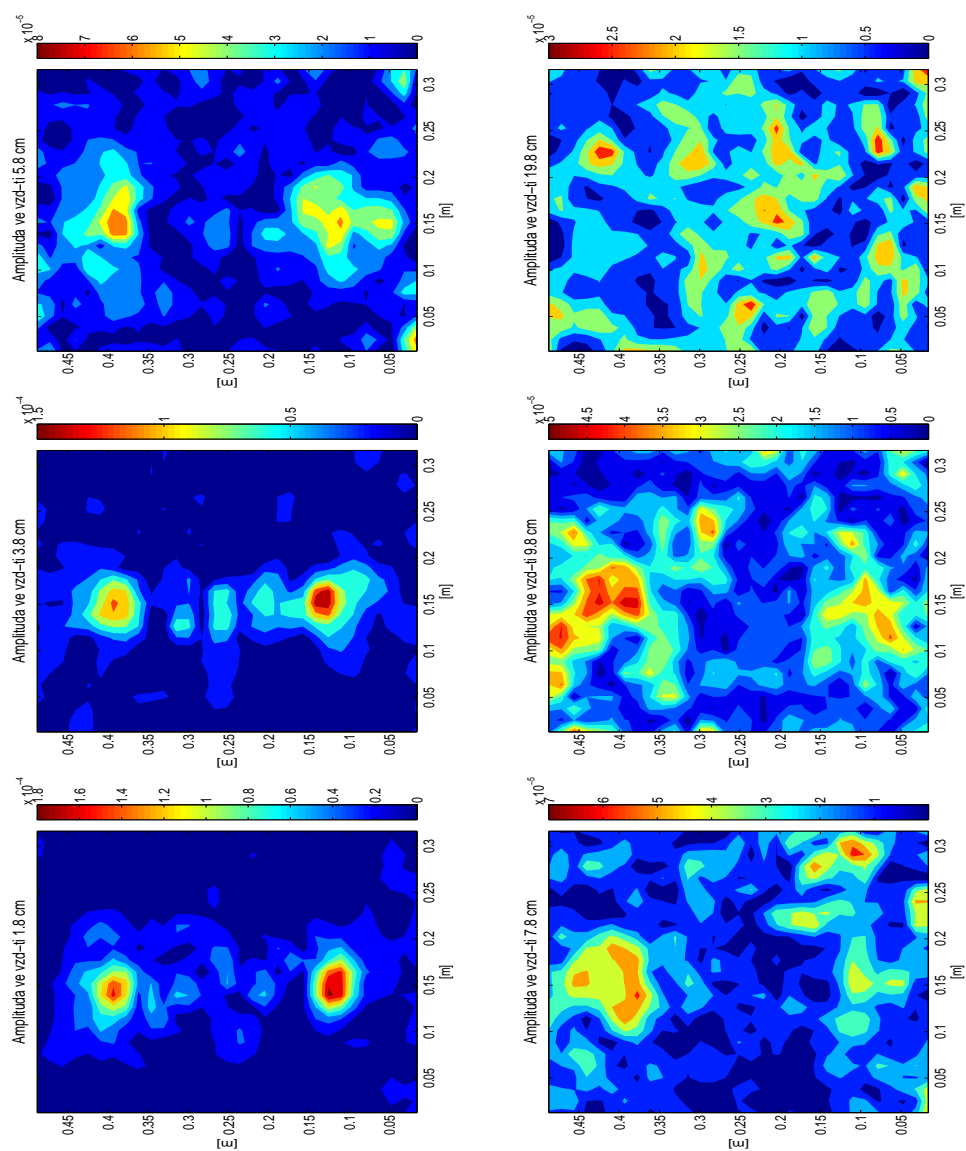


Obrázek A.3: Amplituda (absolutní hodnota) rychlosti kmitání [m/s] I. membrány pro všechny vzdálenosti a pro frekvence 60 Hz.

## A. GRAFY

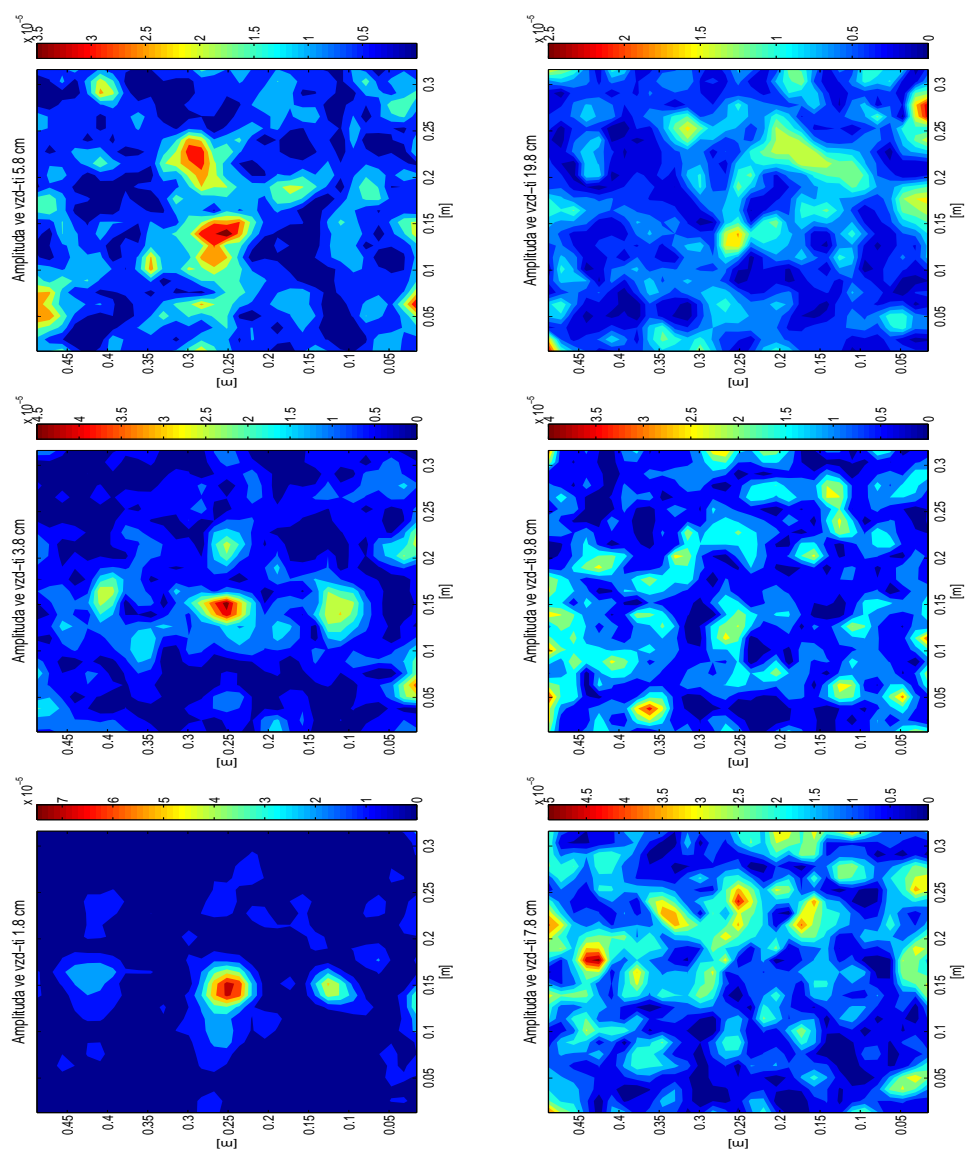


Obrázek A.4: Amplituda (absolutní hodnota) rychlosti kmitání [m/s] I. membrány pro všechny vzdálenosti a pro frekvence 310 Hz.

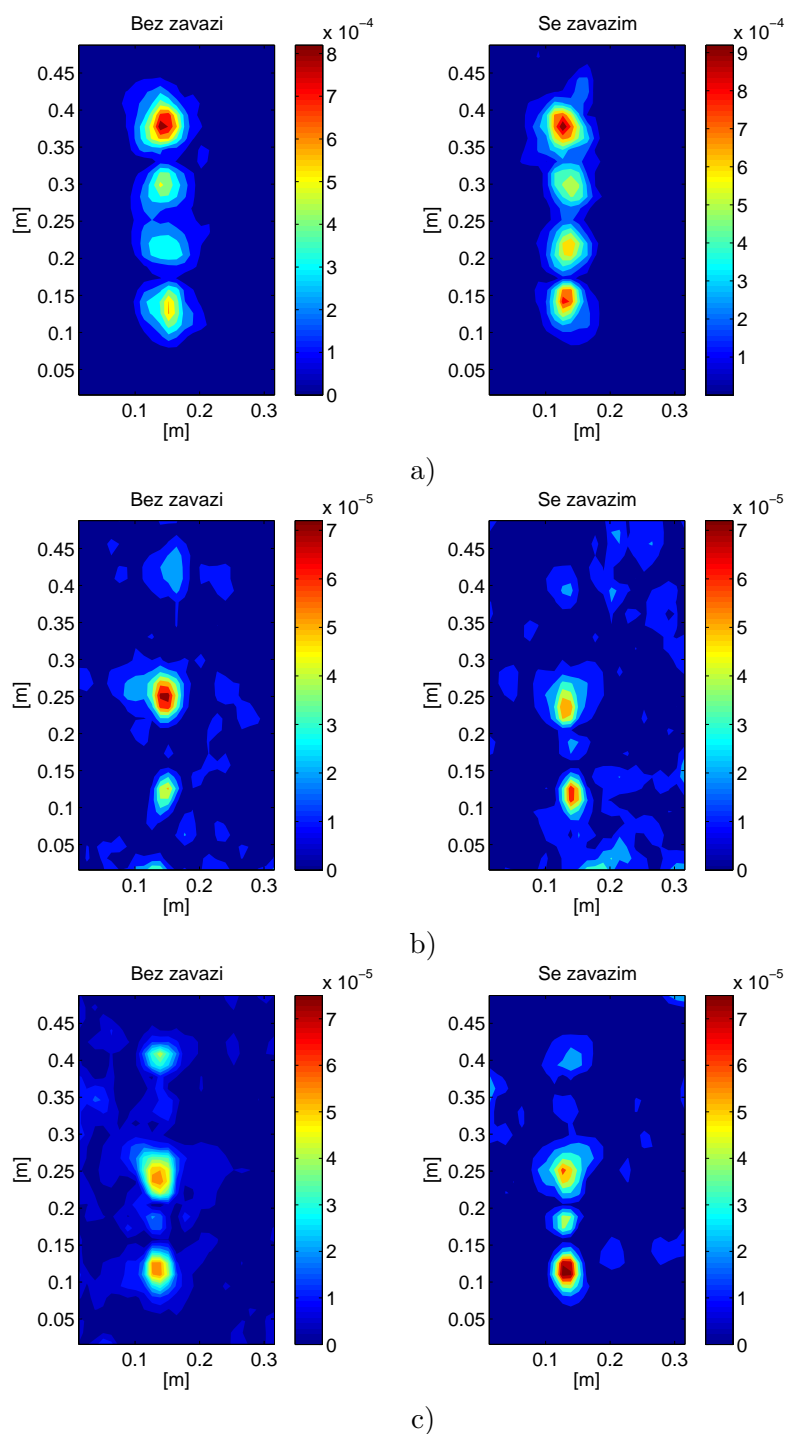


Obrázek A.5: Amplituda (absolutní hodnota) rychlosti kmitání [m/s] I. membrány pro všechny vzdálenosti a pro frekvence 697 Hz.

## A. GRAFY

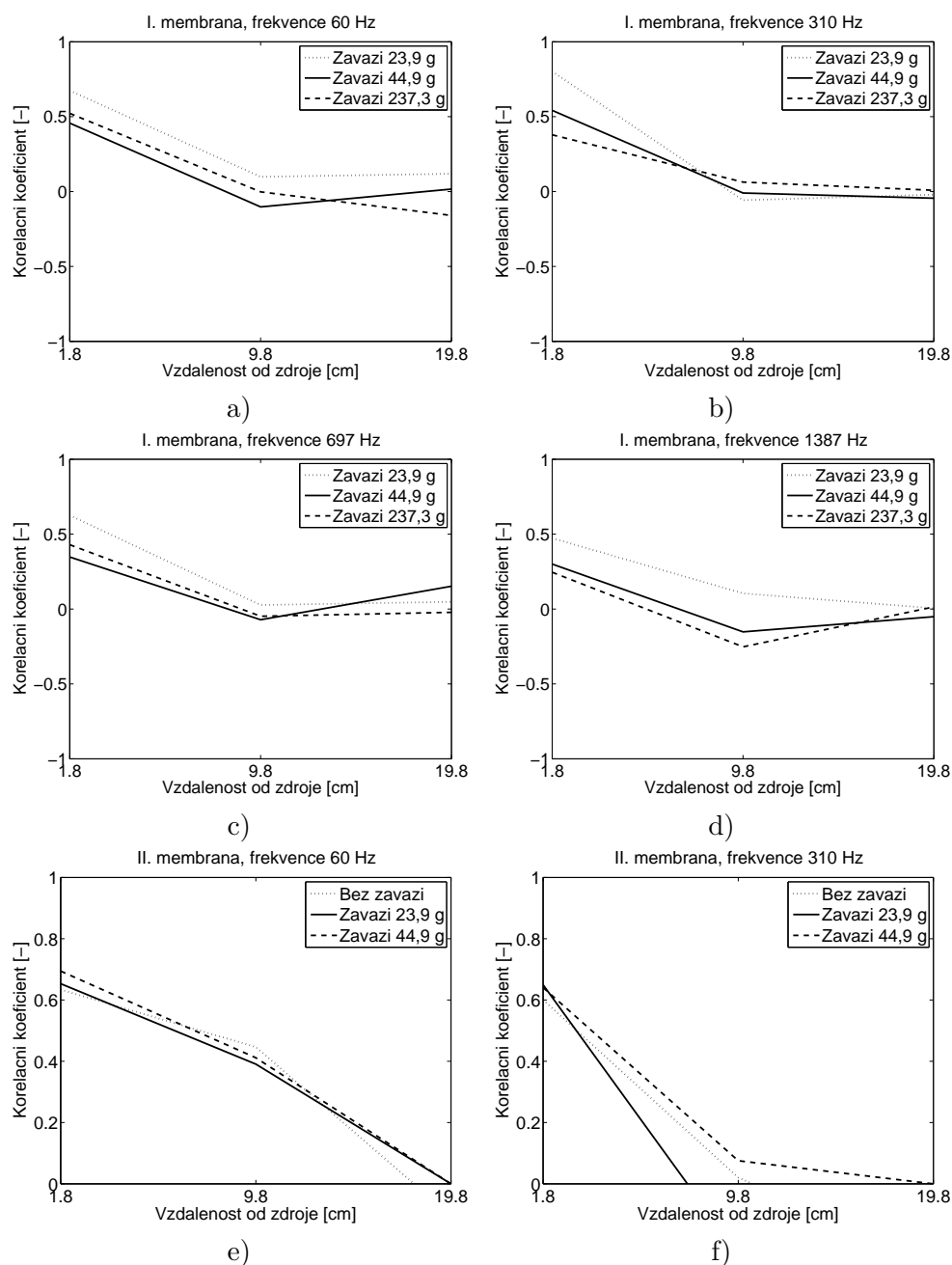


Obrázek A.6: Amplituda (absolutní hodnota) rychlosti kmitání [m/s] I. membrány pro všechny vzdálenosti a pro frekvence 1387 Hz.



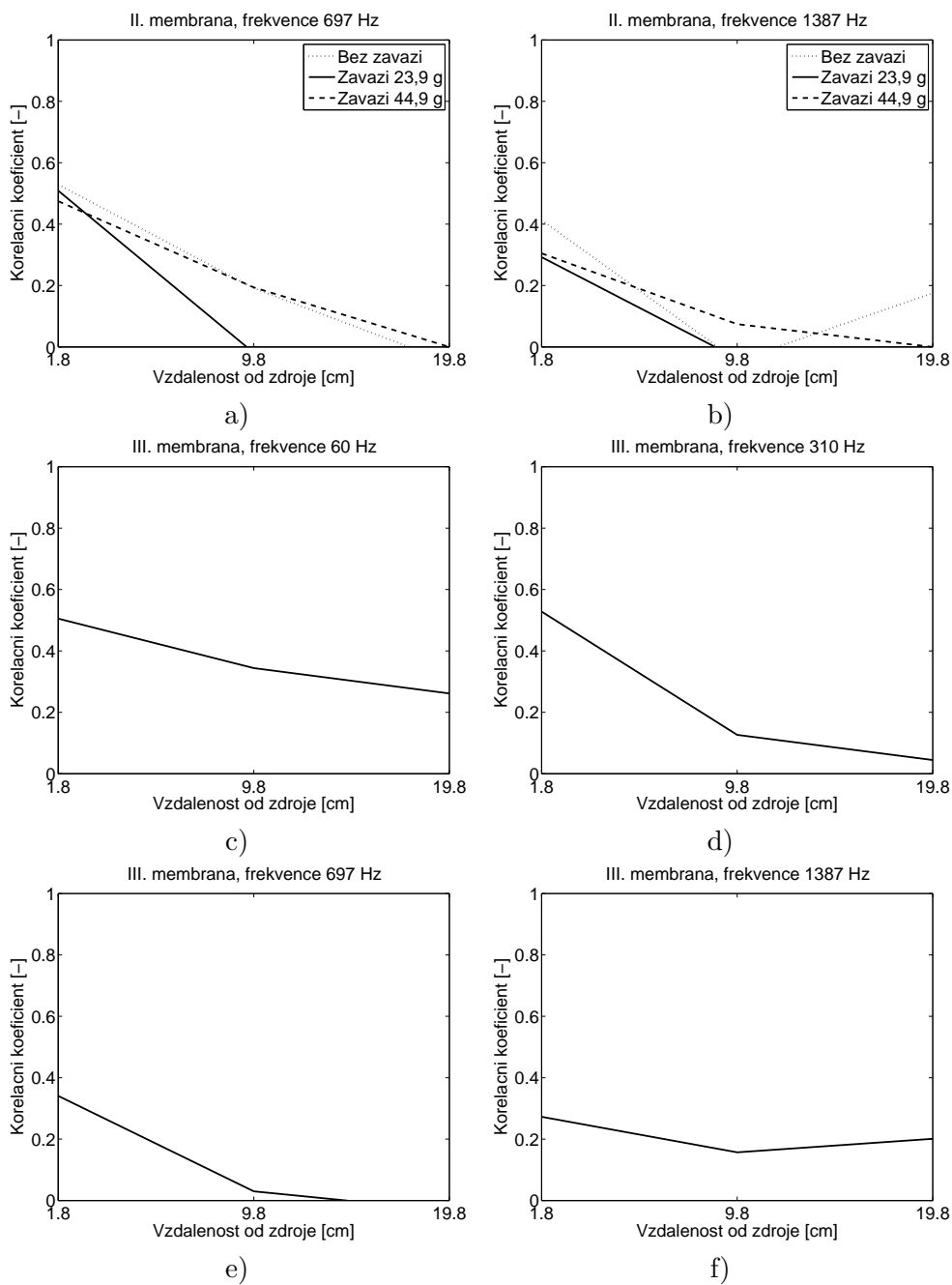
Obrázek A.7: Porovnání membrány se závažím a bez závaží: a) vpravo je I. membrána se zatížením 44,9 g pro frekvence 312 Hz; b) I. membrána se zatížením 273,3 g pro frekvence 1,385 kHz; c) II. membrána se zatížením 44,9 g a pro frekvence 1,385 kHz

## A. GRAFY



Obrázek A.8: Závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti od zdroje pro porovnání hodnot naměřených na I. membráně (ve třech měř. vzdálenostech a s různými závaží) a predikovaných pomocí NAH pro všechny čtyři frekvence (a) až (d). A pro porovnání hodnot naměřených na II. membráně (ve třech měř. vzdálenostech a s různými závaží) a predikovaných pomocí NAH pro frekvence 60 Hz a 310 Hz (e) až (f).





Obrázek A.9: Závislost korelačního koeficientu na vzdálenosti od zdroje pro porovnání hodnot naměřených na II. membráně (ve třech měř. vzdálenostech a s různými závaží) a predikovaných pomocí NAH pro frekvence 697 Hz a 1,38 kHz (a) a (b). A pro porovnání hodnot naměřených na III. membráně (ve třech měř. vzdálenostech) a predikovaných pomocí NAH pro všechny frekvence (c) až (f).



## Seznam použitých zkratk a symbolů

**NAH** Nearfield Acoustic Holography

**FFT** Fast Fourier Transformation

**FAH** Far-field acoustic holography

**PHAN** Planar Nearfield Acoustic Holography

**SONAH** Statistically Optimised Near-field Acoustic Holography

**PSV** Polytec Scanning Vibrometr

$p$  akustický tlak

$k$  vlnové číslo

$c$  rychlost zvuku

$L_x$  rozměr měřeného prostoru po ose  $x$

$L_y$  rozměr měřeného prostoru po ose  $y$

$v$  akustická rychlost

$\omega$  úhlová frekvence

$\rho$  hustota vzduchu



## Obsah přiloženého CD

ermokangThesis2016.....	celý soubor
_ readme.txt .....	stručný popis obsahu CD
_ ermokangThesis2016.pdf.....	text práce ve formátu PDF
_ measuredData .....	soubor s náměřená data v .txt
_ matlabScripts .....	skripty v Matlabu
_ ermokangLatex.....	soubor s práce ve formátu $\LaTeX$
_ ermokangThesis2016.pdf.....	text práce ve formátu PDF