



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# Návrh aktivních laditelných akustických metamateriálů a metapovrchů

## Autoreferát disertační práce

*Studijní program:* P3901 – Aplikované vědy v inženýrství  
*Studijní obor:* 3901V055 – Aplikované vědy v inženýrství

*Autor práce:* **Ing. Jan Václavík**  
*Vedoucí práce:* prof. Ing. Pavel Mokřý, Ph.D.







TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Mechatronics, Informatics  
and Interdisciplinary Studies ■

# Design of active tunable acoustic metamaterials and metasurfaces

## Dissertation thesis summary

*Study programme:* P3901 – Applied Sciences in Engineering  
*Study branch:* 3901V055 – Applied Sciences in Engineering  
*Author:* **Ing. Jan Václavík**  
*Supervisor:* prof. Ing. Pavel Mokrý, Ph.D.





# Design of active tunable acoustic metamaterials and metasurfaces

## Abstract

The Dissertation focuses is focused on a basic research of design methods and fundamental properties of active acoustic and mechanical metamaterials and on a research of method for active control of their parameters in changing operational conditions. Acoustic tunable (active) metamaterials will be constructed as multilayer composite shells with piezoelectric elements. Mechanical tunable (active) metamaterials will be realized as bulk piezoelectric elements. Active control of their acoustic impedance or mechanical properties will be achieved by connecting the piezoelectric elements to active electric shunt circuits with negative impedance converters or digital synthetic impedance. The aim of the dissertation is to achieve extreme values of acoustic impedance or material stiffness, ie zero, infinite or negative, and to study conditions under whis is possible to achive such values. Methods to control the sound field and to control the propagation of the acoustic energy through the metasurface will be analyzed. The stability of acoustic properties of metasurfaces in changing operational conditions will be studied and an adaptive control algorithm will be adapted to increase the such stability. Finally, the above studies will be applied to the issue of general manipulation of the acoustic wave at the interface in accordance with the generalized Snell's law. On the selected case of *beam steering* the design of active acoustic metasurfaces for control of amplitude and phase of acoustic transmission coefficient will be studied.

# Návrh aktivních laditelných akustických metamateriálů a metapovrchů

## Abstrakt

Předkládaná disertační práce je zaměřena na základní výzkum návrhových metod a základních vlastností aktivních akustických a mechanických metamateriálů a dále na výzkum metod pro aktivní řízení jejich parametrů v proměnných provozních podmínkách. Akustické laditelné (aktivní) metamateriály jsou realizovány jako vrstvené kompozitní skořepiny s piezoelektrickými prvky. Mechanické laditelné (aktivní) metamateriály jsou realizovány jako objemové piezoelektrické prvky. Aktivního řízení jejich akustické impedance nebo mechanických vlastností je pak docíleno připojením piezoelektrické části metamateriálu k aktivnímu elektrickému jednobranu se záporným impedančním měničem nebo digitální syntetické impedanci. Cílem disertační práce je docílení extrémálních hodnot akustické impedance či tuhosti materiálu, tj. nulových, nekonečných či záporných, a studium podmínek, za kterých je možné těchto hodnot dosáhnout. Budou studovány metody řízení zvukového pole a toku akustických energií při průchodu metapovrchem a ve volném prostoru. Bude studována stabilita akustických vlastností metapovrchů v proměnných provozních podmínkách a bude aplikován algoritmus adaptivního řízení pro zvýšení této stability. V závěru práce budou výše uvedené studie aplikovány na problematiku obecné manipulace s akustickou vlnou na rozhraní v souladu se zobecněným Snellovým zákonem. Na vybraném případě *odklonu vlny* bude studován návrh aktivních akustických metapovrchů pro řízení amplitudy a fáze akustického přenosu.

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>v</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam zkratk</b>	<b>xiii</b>
<b>Seznam symbolů</b>	<b>xv</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Definice otevřených problémů v oboru a cílů disertační práce . . . . .	2
<b>2 Zařízení na bázi metamateriálů</b>	<b>3</b>
2.1 Mechanický metamateriál pro tlumení vibrací . . . . .	3
2.2 Aktivní akustický metapovrch pro potlačování hluku . . . . .	5
<b>3 Adaptivní metapovrchy</b>	<b>7</b>
3.1 Laditelný akustický metapovrch s pevným nastavením . . . . .	7
3.1.1 Akustické vlastnosti laditelného akustického metapovrchu . . . . .	7
3.1.2 Záporná akustická impedance laditelného akustického meta- povrchu . . . . .	8
3.2 Laditelný akustický metapovrch s automatickým nastavením . . . . .	11
3.2.1 Výsledky experimentu . . . . .	12

<b>4</b>	<b>Metapovrch pro difrakční akustické struktury</b>	<b>15</b>
4.1	Experimentální zařízení pro řízení amplitudy a fáze . . . . .	18
4.2	Výsledky měření na experimentálním zařízení PVDF2 . . . . .	20
4.3	Výsledky měření na experimentálním zařízení MFC2 . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Shrnutí obsahu práce</b>	<b>25</b>
5.1	Shrnutí výsledků modelování aktivních metamateriálů a metapovrchů	25
5.2	Shrnutí měřicích metod . . . . .	26
5.3	Shrnutí adaptivních metapovrchů . . . . .	26
5.4	Shrnutí metapovrchů pro difrakční akustické struktury . . . . .	27
	<b>Použitá literatura</b>	<b>34</b>
<b>A</b>	<b>Seznam publikací</b>	<b>35</b>
A.1	Publikace autora spadající do tématu disertační práce . . . . .	35
A.2	Publikace autora mimo zaměření disertační práce . . . . .	38



## Seznam obrázků

- 2.1 Schéma systému potlačování přenosu vibrací na bázi semiaktivního piezoelektrického tlumení. Systém se skládá ze snímače síly a prvku pro tlumení vibrací o tuhosti  $K$  a koeficientu tlumení  $B$  vloženého mezi zdroj vibrací (shaker) a hmotnost  $M$ , která by měla být vibračně izolována. Amplitudy zdrojových a přenášených vibrací  $u_1$  a  $u_2$  jsou měřeny pomocí akcelerometrů (a). Vibro-izolačním elementem, který je v této práci použit, je piezoelektrický aktuátor s kapacitou  $C_S$  připojený k bočníku se zápornou kapacitou  $C_{NC}$ . (b) . . . . . 4
- 2.2 3D model uvažovaného aktivního akustického metapovrchu, který je tvořen zakřivenou skleněnou deskou vetknutou za okraje do tuhého ocelového rámu. Na povrch desky jsou přilepeny piezoelektrické aktuátory typu MFC (Macro Fiber Composite). Na skleněnou desku dopadá zvuková vlna akustického tlaku, což způsobuje její deformaci (vibrace). Následkem je rozdělení dopadající vlny na prošlou a odraženou, přičemž nedochází k významné absorpci energie. . . . . 5
- 3.1 Frekvenční závislosti akustické ztráty (a) a amplitudy vibrací (b) akustického metapovrchu tvořeného zakřivenou skleněnou skořepinu s MFC aktuátory ve frekvenčním rozsahu od 230 Hz do 400 Hz. Amplituda vibrací je normalizovaná na tlakovou diferenci mezi přední a zadní stranou metapovrchu. Křivky s prázdnými a plnými kruhovými značkami odpovídají akustické ztrátě měřené metodami LDV a FSDH při odpojeném obvodu negativní impedance. Křivky s trojúhelníkovými a čtvercovými značkami odpovídají měřením s připojeným obvodem nastaveným pro minimum přenosu na frekvencích 247 Hz a 258 Hz dle rovnic (3.1(a)) a (3.1(b)). Graf (a) ukazuje, že se působením připojeného obvodu zvýšila akustická ztráta TL o 36,6 dB při 247,0 Hz a o 25,0 dB při 257,9 Hz. . . . . 9
- 3.2 Profil amplitudy vibračního módu akustického metapovrchu měřený metodou FSDH na frekvenci 258 Hz s odpojeným (a) a připojeným (b) obvodem negativní impedance. (Měření provedl Ing. Pavel Psota, Ph. D. a Ing. Roman Doleček, Ph. D.) . . . . . 10

3.3	Reálná (a) a imaginární (b) část inverzní specifické akustické impedance $1/z_m$ (v m $\mu\text{Pa}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) laditelného akustického metamateriálu vynesené v závislosti na frekvenci a absolutní hodnotě parametru $ \alpha $ . Červené čáry označují nulové hodnoty reálných a imaginárních částí $1/z_m$ . Průsečík červených křivek vyznačuje optimální nastavení obvodu negativní impedance, při kterém byla dosažena přenosová ztráta 40 dB. . . . .	10
3.4	Horní (a) a spodní (b) pohled na akustický metapovrch použitý v experimentu s adaptivního řízení tuhosti. Skládá se ze zakřivené skleněné desky upevněné v pevném ocelovém rámu. Piezoelektrické aktuátory a senzory typu MFC jsou přilepeny na horní i spodní povrch skleněné skořepiny. . . . .	11
3.5	Schéma zapojení adaptivního akustického metapovrchu (AAMS) v experimentu adaptivního řízení tuhosti, resp. $z_m$ a TL. Dvěma kanály měřicího systému (NI-DAQ, PC) jsou snímána napětí MFC aktuátorů a snímačů. Na schématu nejsou vyneseny kanály použité pro akustická měření, snímající akustické tlaky a amplitudu vibrací povrchu. Bočník AAMS ve formě digitální syntetické impedance emuluje obvod s impedancí $Z_{\text{NC}} = (-R_0 - X_{C_0})\ R_2$ . . . . .	12
3.6	Časová závislost akustické ztráty AAMS na frekvenci 260 Hz při fixním a adaptivním režimu provozu obvodu negativní kapacity (NC) v experimentu s měnícími se provozními podmínkami AAMS. V oblasti označené <i>Heater ON</i> byl zapnut teplovzdušný zdroj. V okamžiku $T=1600$ s byl spuštěn algoritmus automatického nastavení parametrů, který po cca 300 s obnovil TL na původní hodnotu. . . . .	13
3.7	Ukázka funkce adaptivního akustického metapovrchu. Barva konturového grafu označuje absolutní hodnotu rychlosti částic v blízkosti adaptivního akustického metapovrchu. Modrá a červená barva odpovídají minimálním a maximálním hodnotám této rychlosti. Čárkované čáry jsou vrstevnice fázového rozdílu signálů rychlosti a napětí na svorkách aktuátorů. Vynesené body označují hodnoty elektrických parametrů $-C_0$ a $-R_1$ ekvivalentního elektrického obvodu emulovaného v DSI v průběhu času experimentu. Barva bodů odpovídá rychlosti jejich změny, resp. jejich vzdálenosti od předchozího bodu při konstantním intervalu vzorkování ( <i>černá</i> =nejrychlejší). . . . .	13
4.1	(a) Ilustrace změny směru šíření vlny po průchodu rozhraním měnícím fází v závislosti na příčné poloze $x$ . $z_a$ je specifická akustická impedance prostředí, $z_m$ akustická impedance rozhraní a $\varphi(x)$ je inkrement fáze, kterou akustická vlna získá po průchodu rozhraním. (b) Aproximace spojitého, lineárního průběhu inkrementu fáze akustické vlny po průchodu rozhraním pomocí schodové funkce odpovídající diskretním AAMS. . . . .	16

- 4.2 Ideový model válcově zakřivené membrány použitý pro analýzu možností nezávislého řízení poměru akustických tlaků  $p_t/p_i$ . Membrána je definována poloměrem křivosti  $R$  a tloušťkou materiálu  $h$ . . . . . 16
- 4.3 Modelové závislosti (a) absolutní hodnoty a (b) fáze přenosu akustického tlaku ( $p_t/p_i$ ) válcově zakřivené membrány na *parametrech externího obvodu*  $R_S$  a  $C_S$ . Doplněné přímkou odpovídají vztahu  $C_S = \text{Re}([i\omega(Z_{\text{CRIT}} - R_S)]^{-1})$ , kde *červená* odpovídá  $Z_{\text{CRIT}} = Z_S(-1 + k^2)^{-1}$  a prochází bodem maximální tuhosti membrány, *zelená* odpovídá  $Z_{\text{CRIT}} = -Z_S$  a tudíž prochází bodem nulové tuhosti membrány.  $Z_S$  je impedance aktuátoru. Pomocí parametrů  $R_S$  a  $C_S$  je možné vybrat vhodnou kombinaci amplitudy a fáze, ovšem s úvahou stability zvoleného pracovního bodu. . . . . 17
- 4.4 Modelové závislosti (a) absolutní hodnoty a (b) fáze přenosu akustického tlaku ( $p_t/p_i$ ) válcově zakřivené membrány na *reálné a imaginární složce parametru*  $\alpha$ . Doplněné přímkou odpovídají vztahu  $C_S = \text{Re}([i\omega(Z_{\text{CRIT}} - R_S)]^{-1})$ , kde *červená* odpovídá  $Z_{\text{CRIT}} = Z_S(-1 + k^2)^{-1}$  a prochází bodem maximální tuhosti membrány, *zelená* odpovídá  $Z_{\text{CRIT}} = -Z_S$  a tudíž prochází bodem nulové tuhosti membrány.  $Z_S$  je impedance aktuátoru. . . . . 18
- 4.5 Elektrické náhradní schéma zkoumaných AAMS pro řízení fáze a amplitudy prošlé akustické vlny. Bočník AAMS je tvořen DSI (digitální syntetickou impedancí) emulující obvod s impedancí  $Z_{NC} = (R_1 + X_{C_2}) || R_2$ . . . . . 18
- 4.6 (a) Druhý experimentální model AAMS označený jako *PVDF2* s modifikovaným rámem z 3D tištěného PETG rámem a PVDF fólií (KUREHA CORPORATION) o tloušťce 40  $\mu\text{m}$ . Ta je připevněna k rámu pomocí kaptonové lepicí pásky. AAMS je připevněný k víku akustického boxu. (b) Detail čtvrtého experimentálního modelu AAMS *MFC2* se sklolaminátovou skořepinou s MFC aktuátorem pevně přilepeným k 3D tištěnému PETG rámu, efektivně tvořícím vetknuté uložení. AAMS je označený jako *MFC2*. Rozměry skořepiny jsou 75×60 mm. AAMS je zasazen do víka akustického boxu vyztuženého kovovými profily. . . . . 19
- 4.7 Mapa amplitudy (a) a fáze (b) akustického přenosu  $p_t/p_i$  v rovině komplexních hodnot  $\alpha$ . Červeně je vyznačena teoretická hranice stability, která je použita pro rozdělení pracovních bodů na stabilní (nízké hodnoty  $\text{Re}(\alpha)$ ) a nestabilní (vyšší hodnoty  $\text{Re}(\alpha)$ ). . . . . 20
- 4.8 Plocha možných kombinací amplitudy a fáze přenesené vlny experimentálního AAMS *PVDF2* změřená při  $f = 205$  Hz,  $R_2 = 250$  k $\Omega$ . Modře jsou vyznačené pracovní body vyhodnocené jako stabilní, červeně pak nestabilní. Oblast stabilních pracovních bodů je lépe definovaná, avšak malá, zejména v rozsahu amplitud. . . . . 21

- 4.9 Mapa amplitudy (a) a fáze (b) akustického přenosu  $p_t/p_i$  v rovině komplexních hodnot  $\alpha$ . Červeně je vyznačena teoretická hranice stability, černě pak body označené jako nestabilní. . . . . 22
- 4.10 Plocha možných kombinací amplitudy a fáze přenesené vlny experimentálního AAMS MFC2 změřená při  $f = 1000$  Hz,  $R_2 = 170$  k $\Omega$ . Modře jsou vyznačeny pracovní body odpovídající stabilní oblasti v rovině komplexních hodnot  $\alpha$ , červeně pak nestabilní. Oblast je uzavřená a dobře rozdělená, tudíž indikuje dobrou použitelnost pro aplikaci řízení fáze a amplitudy. . . . . 22
- 4.11 Data pro 4 závislosti parametru (a)  $R_1 = f(\varphi_{C_t})$  a (b)  $C_2 = f(\varphi_{C_t})$  náhradní impedance bočnicku MFC2, která budou používána řízení fáze akustického přenosu  $\varphi_{C_t} = f(R_1, C_2)$ . Body jsou vynesena vybraná naměřená data stabilních pracovních bodů pro zvolenou hodnotu  $|C_t|$  s tolerancí  $\pm 2,5\%$ . Křivky pak odpovídají polynomiálním závislostem parametrů  $R_1$  a  $C_2$  nafitovaným do vybraných dat. Polynomiální závislosti jsou výhodné pro programové řízení přenosu AAMS. 23
- 4.12 Ilustrace trajektorií pracovních bodů polynomiálních závislostí  $R_1 = f(\varphi_{C_t})$  a  $C_2 = f(\varphi_{C_t})$  vytvořených pro řízení fáze akustického přenosu  $C_t = p_t/p_i$ . Vykresleny jsou trajektorie pro 4 hodnoty  $|C_t|$  rovny 0,2; 0,25; 0,3 a 0,35. V podkladu jsou vyneseny (a)  $|C_t|$  a (b)  $\arg(C_t)$ . Černými tečkami je v obou grafech vyznačena oblast nestabilních pracovních bodů. Trajektorie představují parametricky popsané vrstevnice amplitud akustického přenosu. . . . . 23

## Seznam zkratek

AEC	Active Elasticity Control (Aktivní řízení tuhosti)
AMM	Acoustic metamaterial (Akustický metamateriál)
AMS	Acoustic metasurface (Akustický metapovrch)
AAMM	Active acoustic metamaterial (Aktivní akustický metamateriál)
AAMS	Active acoustic metasurface (Aktivní akustický metapovrch)
AMMM	Active mechanical metamaterial (Aktivní mechanický metamateriál)
APSD	Active piezoelectric shunt damping
AVC	Active vibration control (Aktivní řízení vibrací)
DHI	Digital holographic interferometry (Digitální holografická interferometrie)
DSI	Digital synthetic impedance (Digitální syntetická impedance)
LDV	Laser Doppler vibrometer (Laserový dopplerovský vibrometr)
MFC	Macro fiber composite
NC	Negative capacitor (Kondenzátor se zápornou kapacitou)
NER	Negative elasticity regime (Režim záporné elasticity)
PSD	Piezoelectric shunt damping (Tlumení piezoelektrickými prvky s bočníkem)
NID	Noise isolation device (Zařízení pro odstínění hluku)



## Seznam symbolů

$TL$	Akustická přenosová ztráta
$p$	Akustický tlak
$c$	Rychlost zvuku ve vzduchu
$Y$	Youngův modul
$Q$	Mechnická jakost
$\rho$	Hustota
$B$	Objemový modul pružnosti
$Z$	Akustická impedance
$v$	Okamžitá rychlost nebo rychlost částic
$S$	Plocha
$C_r$	Reflexní koeficient
$C_t$	Transmisní koeficient
$\omega$	Úhlová frekvence
$E_i$	Intenzita elektrického pole
$D_i$	Elektrická indukce
$S_{ij}$	Mechanická deformace
$T_{ij}$	Mechanické napětí
$\varepsilon_{ik}$	Permitivita
$d_{ikl}$	Piezoelektrický koeficient
$s_{ijkl}$	Elastická poddajnost
$F$	Síla
$K$	Tuhost
$d^{(s)}$	Piezoelektrický koeficient ve režimu senzoru
$d^{(a)}$	Piezoelektrický koeficient ve režimu aktuátoru
$M$	Hmotnost
$C_S$	Kapacita aktuátoru
$C_{NC}$	Záporný kondenzátor nebo kapacita
$u$	Amplituda vibrací
$R$	Elektrický odpor





# 1 Úvod

Hluk a vibrace. To jsou jevy, které negativně ovlivňují jak osobní pohodu člověka, tak i funkci strojů a zařízení. Některé typy hluků a vibrací jsou naopak chtěné či pozitivně přijímané. Takovým příkladem může být *příjemné ticho*. Mezi příklady příjemného ticha lze zařadit například šum listů v korunách stromů v jarním vánku, svěží zurčení potůčku v horkém letním dni, ranní zpěv ptáků, nebo bzukot hmyzu na rozkvetlé jarní louce. Požadavek na příjemné ticho představuje v současné době hlavní motivaci při potlačování hluku v životním prostředí. V nově vznikající koncepci tzv. *soundscape planning* [1], je pozornost zaměřena na zvuky, které lidé chtějí nebo preferují slyšet a akustické prostředí je považováno za nedílnou součást životního prostředí. Absolutního ticha není to, co chceme ve venkovním či vnitřním akustickém prostředí dosáhnout. Implementace této nové koncepce vyžaduje nový přístup k potlačování hluku. Strategie absolutního potlačení všech hluků vytváří nepřírozené zvukové prostředí a je překonávána možnostmi, které nabízí moderní technologie. Ty umožňují realizovat nový přístup, jenž dokáže eliminovat pouze vybrané, nežádoucí hluky a zpříjemnit zvukové prostředí v kontrolovaném prostoru.

Uskutečnění výše zmíněných principů *soundscape planning* je podmíněna výzkumem a vývojem efektivních nástrojů pro přesné a detailní řízení šíření zvuku v kontrolovaném prostoru. Jednou z možných variant takovýchto nástrojů je pokročilé řízení přenosu zvuku přes akustická rozhraní. Takto pokročilé řízení zvukového pole a šíření zvukových vln skrz rozhraní však vyžaduje takové hodnoty akustických či mechanických vlastností tohoto rozhraní, které nejsou v přírodě pozorovány. Akustická rozhraní s těmito vlastnostmi se pak nazývají *akustické metamateriály* (AMM) [4, 3, 2, 5].

V případě tlumení vibrací není typickým kritériem otázka komfortu, ale konstrukčních limitů. Pasivní vibroizolační prvky dokáží a spolehlivě eliminovat velkou část nechtěných vibrací, avšak za cenu konstrukčně neakceptovatelných rozměrů či hmotnosti. Rozměr a hmotnost lze minimalizovat použitím vhodných materiálů, které je možné definovat (hustota, komplexní modul pružnosti, frekvenční charakteristiky apod.). Výsledkem může být materiál s parametry či kombinací parametrů, které nejsou přirozeně dostupné. Příkladem mohou být požadavky na velmi nízké, vysoké či negativní moduly pružnosti v určitém frekvenčním pásmu, tj. velmi podobné požadavky jako v případě akustických metamateriálů, a vede na *mechanický metamateriál* (MM).

V rámci této disertační práce je pozornost zaměřena na speciální formu AMM,

kteřé tvořív rozhraní mezi dvěma akustickými médii. Poprvé byla tato forma akustických metamateriálů zkonstruována a pojmenována jako *akustický metapovrch* (angl. Acoustic Metasurface, AMS) v práci [6]. Od té doby se AMS staly předmětem intenzivního výzkumu v oblasti akustiky, což vedlo k mnoha zajímavým výsledkům publikovaným v prestižních vědeckých časopisech jako Nature Materials [8, 7], Nature Communications [9, 10, 11], atd. Téma je stále živé a generuje mnoho nových otázek v souvislosti s rozšiřujícím množstvím aplikací těchto principů.

## 1.1 Definice otevřených problémů v oboru a cílů disertační práce

Přes mnoho pozoruhodných vlastností a zajímavých fyzikálních jevů, které se v AMS odehrávají, vykazují i dvě zásadní nevýhody: (i) AMS obvykle fungují pouze v úzkém frekvenčním rozsahu kolem své vnitřní rezonanční frekvence; (ii) vnitřní rezonanční frekvenci obvykle nelze změnit, jakmile je AMS vyroben. Za účelem odstranění těchto nevýhod bude v níže předkládané disertační práci důkladně rozpracován koncept *adaptivních akustických metapovrchů* (angl. Adaptive Acoustic Metasurfaces, AAMS). Na základě toho jsou definované následující výzkumné cíle disertační práce:

1. Vývoj metod umožňujících aktivní řízení akustické (nebo mechanické) impedance dvourozměrných struktur za měnících se provozních podmínek a v širokém frekvenčním rozsahu.
2. Konstrukce takových systémů, které představují rovinné akustické metamateriály. To znamená, že hodnoty určitých akustických parametrů konstruovaných struktur jsou extrémní, tj. *velmi nízké, velmi vysoké* nebo *záporné*.
3. Analýza metod pro optimální návrh elektronických výkonových obvodů, které minimalizují spotřebu elektrické energie.
4. Analýza stability aktivních akustických metamateriálů a metapovrchů.
5. Konstrukce laditelných aktivních akustických metapovrchů a jejich využití v systémech pro řízení zvukového pole s využitím principů zobecněného Snellova zákona.

## 2 Zařzení na bázi metamateriálů

Konstrukce zařízení představující aktivních metamateriál (AMM) je po teoretické stránce velmi jednoduchá. Jedná se pouze o spojení piezoelektrického aktuátoru s elektrickým bočníkem. Vzhledem ke stabilitě elektroniky, vzájemným vazbám elektroakustických převodníků či požadavkům na energetickou účinnost, je konstrukce reálného zařízení na bázi aktivního metamateriálu poměrně složitý problém. Z tohoto důvodu byly, pro potřeby této disertační práce, analyzovány dva specifické typy takových zařízení. - tzv. *mechanickém metamateriálu pro tlumení vibrací* a *aktivní akustický metapovrch pro tlumení hluku a řízení zvukového pole*.

### 2.1 Mechanický metamateriál pro tlumení vibrací

Na obrázku 2.1(a) je schéma mechanické části vibro-izolačního systému, který představuje jednu elementární konstrukční jednotku *aktivního mechanického metamateriálu* (AMMM). K teoretické analýze energetických toků v AMMM a vyhodnocení účinnosti izolace vibrací byl vytvořen model dynamické odezvy tohoto systému, založený na metodice prezentované v klasické literatuře [12].

Přenos vibrací viskoelastickým prvkem o tuhosti  $K$  se ztrátovým činitelem  $B$  na objekt o hmotnosti  $M$  je dán (i) pohybovou rovnicí pro hmotu  $M$  a (ii) stavovou rovnicí viskoelastického prvku:

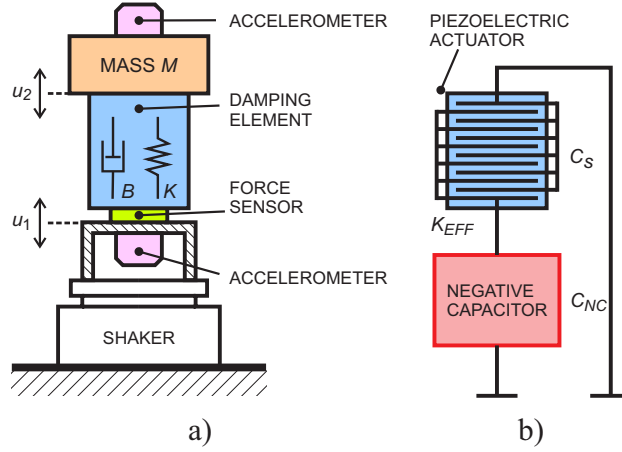
$$M \frac{d^2 u_2}{dt^2} + F = 0, \quad (2.1)$$

$$F + B \frac{d(u_1 - u_2)}{dt} + K(u_1 - u_2) = 0, \quad (2.2)$$

kde  $F$  označuje sílu přenášenou na objekt skrz vibroizolační (viskoelastický) element. Z rovnic (2.1) lze získat vztah pro přenos vibrací:

$$TR = \left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \omega_0 \sqrt{\frac{Q^2 \omega_0^2 + \omega^2}{Q^2 (\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2 \omega_0^2}}, \quad (2.3)$$

kde  $Q = \sqrt{MK}/B$  odpovídá mechanickému činiteli jakosti a symbol  $\omega_0 = \sqrt{K/M}$  značí rezonanční frekvenci.



**Obr. 2.1:** Schéma systému potlačování přenosu vibrací na bázi semiaktivního piezoelektrického tlumení. Systém se skládá ze snímače síly a prvku pro tlumení vibrací o tuhosti  $K$  a koeficientu tlumení  $B$  vloženého mezi zdroj vibrací (shaker) a hmotnost  $M$ , která by měla být vibračně izolována. Amplitudy zdrojových a přenášených vibrací  $u_1$  a  $u_2$  jsou měřeny pomocí akcelerometrů (a). Vibro-izolačním elementem, který je v této práci použit, je piezoelektrický aktuátor s kapacitou  $C_S$  připojený k bočníku se zápornou kapacitou  $C_{NC}$ . (b)

Časová závislost přenášené síly  $F(t)$  pro danou úhlovou frekvenci  $\omega$  je:

$$F(t) = \operatorname{Re} (F_0 e^{i\omega t}) = \frac{\omega_0 A_1 M}{Q^2 (\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2 \omega_0^2} \times \{ [Q^2 (\omega_0^2 - \omega^2) + \omega^2] \omega_0 \cos(\omega t) + \omega^3 Q \sin(\omega t) \}, \quad (2.4)$$

kde  $A_1$  označuje amplitudu zrychlení vstupních vibrací. Amplituda síly  $F_0$  může být zjednodušena na vztah:

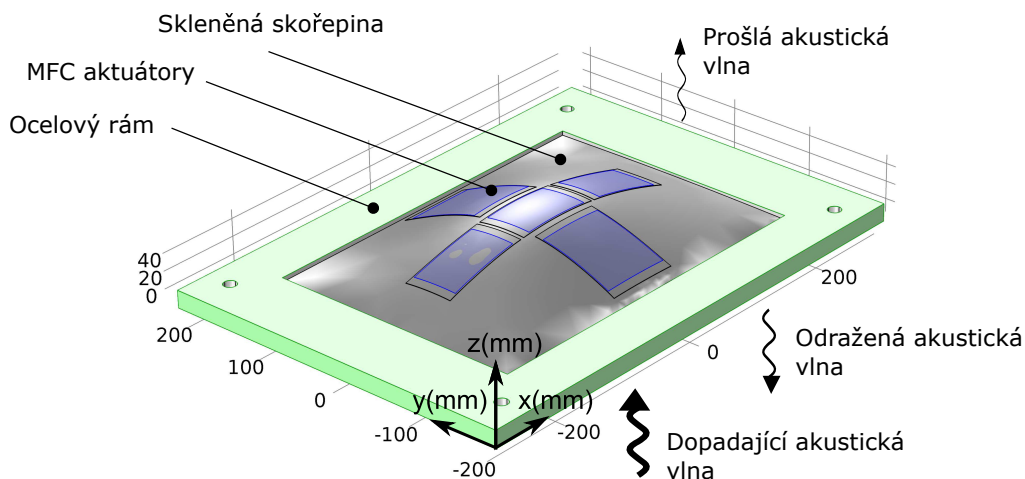
$$F_0 = A_1 M \left[ 1 + \frac{Q\omega^2}{Q(\omega_0^2 - \omega^2) + i\omega\omega_0} \right], \quad (2.5)$$

kde  $i = \sqrt{-1}$ .

Mechanický vstupní výkon systému je dán střední hodnotou skalárního součinu okamžité síly  $F(t)$  generované vibračním stolkem a okamžitou rychlostí  $v_1(t) = (A_1/\omega) \sin(\omega t)$  stolku přes jednu periodu  $T = 2\pi/\omega$  pohybu:

$$P_{mi} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) v_1(t) dt = \frac{(1/2) \omega_0 \omega^2 A_1^2 M Q}{Q^2 (\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2 \omega_0^2}. \quad (2.6)$$

Z rovnice je patrné, že nad rezonanční frekvenci  $\omega_0$ , lze přenos vibrací a mechanický vstupní výkon aproximovat jako  $TR \approx \omega_0 / (\omega Q)$  a  $P_{mi} = \omega_0 A_1^2 M Q / (2\omega^2 Q)$ . Se snižující se hodnotou tuhosti  $K$ , dochází k posunu rezonanční frekvence  $\omega_0$  směrem k nižším frekvencím a zároveň tak klesá i hodnota přenosu  $TR$  harmonických vibrací pro úhlové frekvence  $\omega > \omega_0$ .



**Obr. 2.2:** 3D model uvažovaného aktivního akustického metapovrchu, který je tvořen zakřivenou skleněnou deskou vetknutou za okraje do tuhého ocelového rámu. Na povrch desky jsou přilepeny piezoelektrické aktuátory typu MFC (Macro Fiber Composite). Na skleněnou desku dopadá zvuková vlna akustického tlaku, což způsobuje její deformaci (vibrace). Následkem je rozdělení dopadající vlny na prošlou a odraženou, přičemž nedochází k významné absorpci energie.

Lze tak snadno realizovat prvek, který dovoluje elektronické řízení jeho efektivní tuhosti, vyžadující pouze piezoelektrický aktuátor připojený k bočníku se specifickou hodnotou záporné kapacity. Ten umožňuje, pomocí metod aktivního řízení tuhosti dosáhnout *nulových* či dokonce *záporných* hodnot efektivní tuhosti  $K$ .

## 2.2 Aktivní akustický metapovrch pro potlačování hluku

Jednou z řešených oblastí disertační práce je analýza vlastností a studium metod pro aktivní řízení akustické impedance velkých plošných struktur AAMS. Stejně jako v případě AMMM, je účinným způsobem řízení akustické impedance vibrační struktury AAMS použití piezoelektrických převodníků, které jsou připojeny k pasivním nebo aktivním elektronickým bočnicím.

V této práci je uvažován AAMS, který se skládá ze zakřivené skleněné desky tloušťky  $h_g$  o reciproké hodnotě poloměru křivosti  $\xi$ . Zakřivená skleněná deska je upevněna na svých okrajích v tuhém ocelovém rámu o vnitřních rozměrech  $a$  a  $b$ . Na horním povrchu skleněné desky jsou připevněny piezoelektrické kompozitní aktuátory typu MFC o tloušťce  $h_{\text{MFC}}$ , jak je znázorněno na obrázku 2.2. Další informace o těchto aktuátorech lze nalézt v [13].

Konfigurace MFC byla zvolena na základě analýz provedených [14] a podrobného měření tvarů vibračních módů AAMS pomocí digitální holografické interferometrie (DHI) [15] Tato konfigurace je na znázorněna v obr. 2.2 a dovoluje, při vhodném zapojení elektrod aktuátorů, potlačení většiny nízkofrekvenčních vibračních módů.

Podle analytického modelu obecně zakřivené skleněné skořepiny pravoúhlého půdorysu a FEM modelu planární a zakřivené skleněné desky publikovaném v [16], lze specifickou akustickou impedanci zakřivené obdélníkové skleněné skořepiny, ve frekvenčním rozsahu blízko nejnižší rezonanční frekvence, aproximovat vztahem:

$$z_m(\omega) \approx \frac{\pi^2 (G \zeta + 2Yh\xi^2 - (1 - \nu)\rho h\omega^2)}{8i\omega a^2 b^2 (1 - \nu)}, \quad (2.7)$$

kde

$$\zeta = \pi^4 (1 - \nu)^2 (1 + \nu) [1/b^2 + 1/a^2]^2, \quad (2.8)$$

$$Y = \frac{Y_g h_g + Y_{\text{MFC}} h_{\text{MFC}}}{h_g + h_{\text{MFC}}}, \quad (2.9)$$

$$G = \frac{Y_g^2 h_g^4 + Y_{\text{MFC}}^2 h_{\text{MFC}}^4 + 2Y_g Y_{\text{MFC}} h_g h_{\text{MFC}} (2h_g^2 + 3h_g h_{\text{MFC}} + 2h_{\text{MFC}}^2)}{12(1 - \nu^2)(Y_g h_g + Y_{\text{MFC}} h_{\text{MFC}})} \quad (2.10)$$

kde  $Y_g$ ,  $\nu$  a  $\rho$  jsou modul pružnosti, Poissonovo číslo a hustota materiálu skleněné skořepiny. Symbol  $Y_{\text{MFC}}$  označuje modul pružnosti piezoelektrického MFC aktuátoru,  $\omega$  je úhlovou frekvencí dopadající zvukové vlny. Ze vztahů (2.7)-(2.10) je snadno odvoditelné, že čím vyšší je efektivní hodnota modulu pružnosti MFC aktuátoru, tím vyšší je hodnota specifické akustické impedance  $z_m$  celého AAMS.

Za účelem získání experimentálních dat byl zkonstruován model výše popsaného AAMS znázorněný na obr. 2.2. Skleněná skořepina modelu byla vyrobena technikou zvanou *lehnutí skla* na přesně vyfrézovanou ocelovou formu. Na vnější stranu skleněné skořepiny pak byly epoxidovým lepidlem připevněny MFC aktuátory. V rámci úvodních experimentů, byly elektrody všech MFC aktuátorů spojeny paralelně a připojeny k obvodu záporné kapacity, což je nejjednodušší a zároveň použitelná konfigurace pro základní módy kmitů této sestavy. Skleněná skořepina s aktuátory je při experimentech typicky upínána do připraveného kovového rámu ilustrovaného na obr. 2.2.

## 3 Adaptivní metapovrchy

V této kapitole je pozornost zaměřena na aktivní a adaptivní řízení vlastností modelů metamateriálů a metapovrchů na bázi piezoelektrických aktuátorů. V první části jsou shrnuty výsledky experimentů s aktivním řízení efektivních vlastností metamateriálu, tj. změny frekvenční pozice minima akustického přenosu, resp. maxima tuhosti a dosažení negativní akustické impedance vykazované modelem metamateriálu. Druhá část je věnována adaptivnímu řízení vlastností metamateriálu, tak aby byl potlačen negativní vliv měnících se podmínek okolního prostředí na požadované funkční charakteristiky, např. akustickou přenosovou ztrátu.

### 3.1 Laditelný akustický metapovrch s pevným nastavením

Experimenty probíhaly na akustickém metapovrchu popsaném v kapitole 2.2. Testovaný AAMM tvoří víko zvukotěsného boxu s reproduktorem UNI-PEX P-500, který je zdrojem zvukové vlny dopadající na metapovrch. Mikrofon IN, uvnitř bedny a mikrofon OUT, umístěný vně zvukotěsné boxu, měří rozdíl akustických tlaků  $\Delta p$ . Amplituda rychlosti vibrací  $v$  středního bodu metapovrchu je měřena laserovým dopplerovským vibrometrem Ometron VH-1000-D. Z těchto hodnot je určena akustická impedance  $z_m \approx \Delta p/v$ . Hodnota akustické ztráty je pak určena výrazem  $TL = 20 \log_{10} |1 + z_m/2z_a|$ .

Za účelem nalezení přesného nastavení obvodu negativní impedance byla nejprve změřena frekvenční charakteristika elektrické impedance paralelně propojených MFC aktuátorů pomocí impedančního analyzátoru ve frekvenčním rozsahu od 100 Hz do 5 kHz odpovídajícím předpokládanému rozsahu akustických měření.

#### 3.1.1 Akustické vlastnosti laditelného akustického metapovrchu

Měřením akustické ztráty identifikována frekvence  $\omega_r = 286 \text{ Hz}$  vykazující minimální hodnotou akustické ztráty, která odpovídá prvnímu dominantnímu vibračnímu režimu zakřivené skleněné skořepiny. Pro experiment byly vybrány dvě hod-

noty frekvence  $\omega_0$ , konkrétně 247 Hz a 258 Hz, které jsou pod rezonanční frekvencí  $\omega_r$ .

Následně byla změřena frekvenční závislost akustické ztráty pro nastavení obvodu negativní impedance odpovídající frekvencím výše. Výsledkem jsou frekvenční závislosti ztráty akustického přenosu a amplitudy vibrací akustického metapovrchu zobrazené na obr. 3.1(a) a 3.1(b).

Jak bylo předesláno, v tomto systému byly měřeny tvary vibračních módů pomocí metody digitální holografie (TAFSDH). Změřené rozložení amplitud vibrací na povrchu akustického metapovrchu bylo použito pro výpočet specifické akustické impedance a akustické ztráty. Obrázek 3.2, který byl naměřen a interpretován Pavlem Psotou a Romanem Dolečkem, ukazuje profil vibračního módu na frekvenci 258 Hz s odpojeným 3.2(a) a připojeným 3.2(b) obvodem. Při této frekvenci byly amplitudy vibrací středního bodu 715,2 nm (odpojený obvod) a 87,8 nm (připojený obvod). Získaná data ukazují, že metoda FSDH dobře koresponduje s akustickým měřením a měřením pomocí dopplerovského vibrometru.

### 3.1.2 Záporná akustická impedance laditelného akustického metapovrchu

Jednou z dalších zajímavých vlastností, kterou může metamateriál vykazovat, je negativní hodnota některého z materiálových parametrů. Pro ověření této možnosti byl realizován experiment spočívající v nalezení takových parametrů obvodů negativní impedance, které vedou na negativní akustickou impedanci modelu akustického metapovrchu.

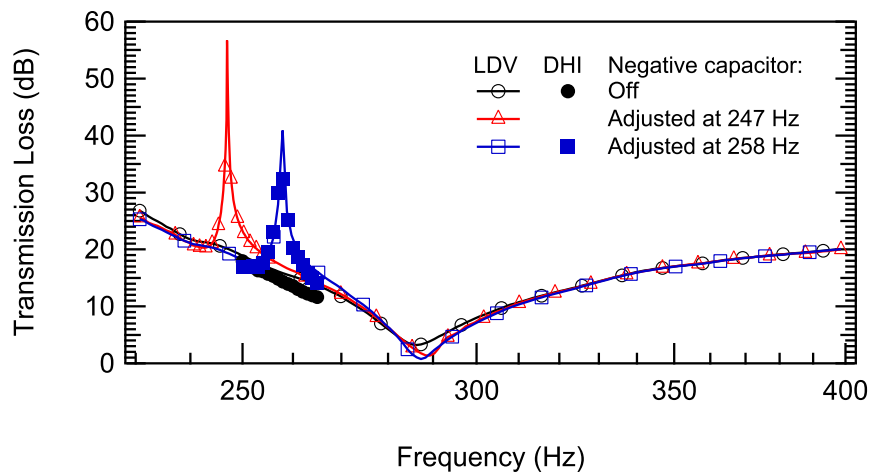
Pro analýzu režimu negativní elasticity akustického metamateriálu je vhodné vyjádřit inverzní specifickou akustickou impedanci v blízkosti optimálního nastavení obvodu negativní impedance:

$$\frac{1}{z_m} \approx \frac{192i\omega(1 - k^2 + \alpha)}{\pi^2 k^2 h_{\text{MFC}} Y_{\text{MFC}} [12\xi + h_{\text{MFC}}^2 (h_g + h_{\text{MFC}}) \zeta]}. \quad (3.1)$$

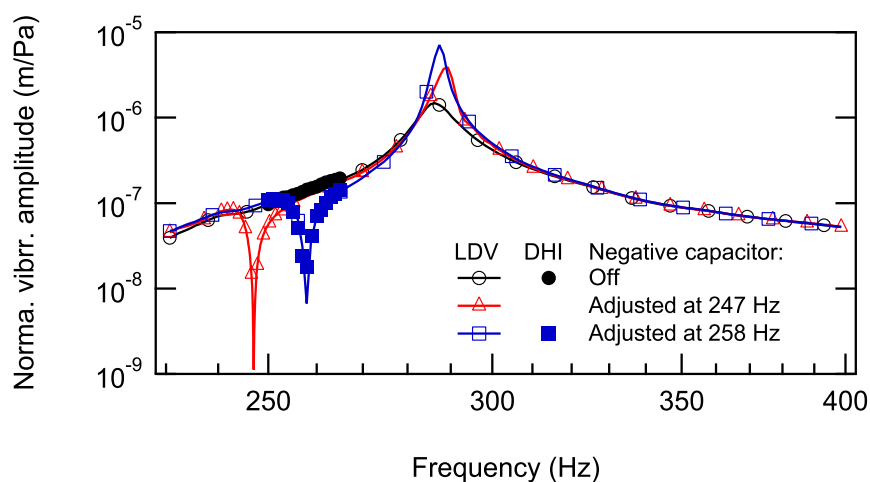
Z výše uvedené rovnice (3.1) plyne, že  $1/z_m$  může měnit své znaménko díky obecné poloze komplexního koeficientu  $\alpha = C/C_S$  a možnosti jeho přiblížení bodu  $(1 - k^2)$  z různých směrů komplexní roviny.

Výsledek měření na AAMS je zobrazen na obr. 3.3(a) a 3.3(b) ve formě reálné a imaginární části inverzní specifické akustické impedance  $1/z_m$  akustického metapovrchu vynesené v závislosti na frekvenci a absolutní hodnotě parametru  $|\alpha|$ . Červené čáry označují pozice nulových hodnot reálných a imaginárních částí  $1/z_m$ . Průsečík těchto křivek odpovídá optimálnímu nastavení parametrů negativní impedance připojené k MFC aktuátorům. Modré a červené barvy označují oblasti, kde byly naměřené hodnoty  $1/z_m$  záporné či kladné. Z rovnice (3.1) pak vyplývá, že v záporných hodnot  $1/z_m$  roviny frekvence- $|\alpha|$ , musel model akustického metamateriálu vykazovat negativní efektivní elasticitu.



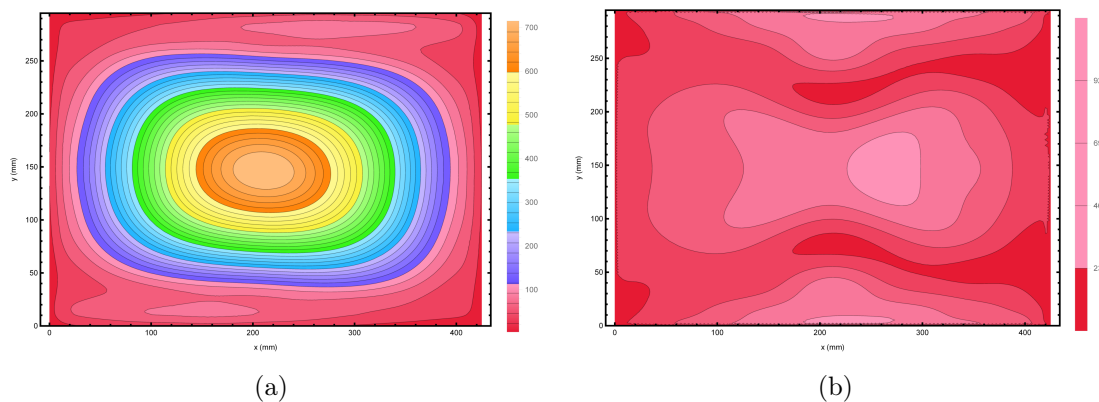


(a)

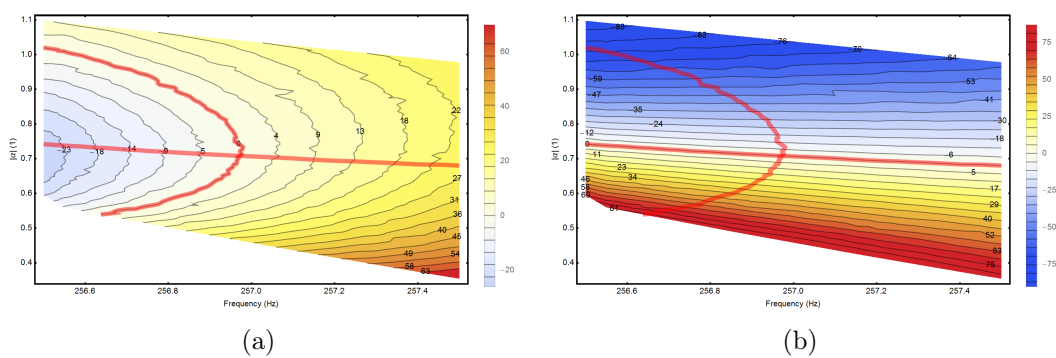


(b)

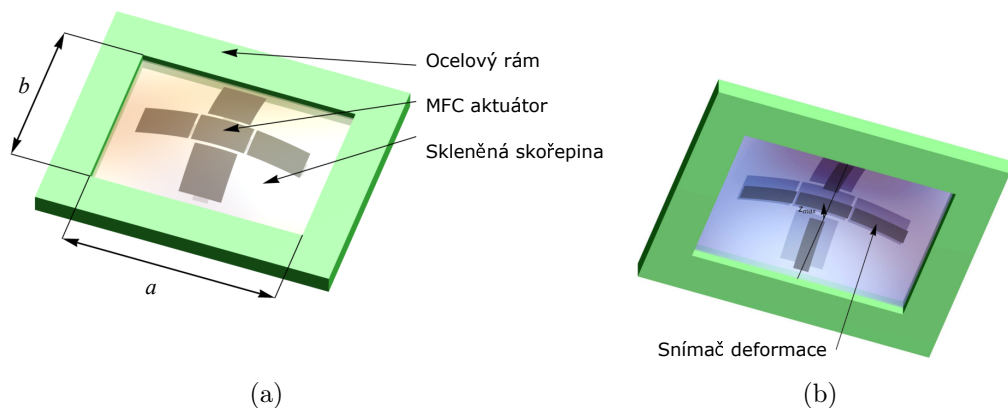
**Obr. 3.1:** Frekvenční závislosti akustické ztráty (a) a amplitudy vibrací (b) akustického meta-povrchu tvořeného zakřivenou skleněnou skořepinou s MFC aktuátory ve frekvenčním rozsahu od 230 Hz do 400 Hz. Amplituda vibrací je normalizovaná na tlakovou diferenci mezi přední a zadní stranou meta-povrchu. Křivky s prázdnými a plnými kruhovými značkami odpovídají akustické ztrátě měřené metodami LDV a FSDH při odpojeném obvodu negativní impedance. Křivky s trojúhelníkovými a čtvercovými značkami odpovídají měřením s připojeným obvodem nastaveným pro minimum přenosu na frekvencích 247 Hz a 258 Hz dle rovnic (3.1(a)) a (3.1(b)). Graf (a) ukazuje, že se působením připojeného obvodu zvýšila akustická ztráta TL o 36,6 dB při 247,0 Hz a o 25,0 dB při 257,9 Hz.



**Obr. 3.2:** Profil amplitudy vibračního módu akustického metapovrchu měřený metodou FSDH na frekvenci 258 Hz s odpojeným (a) a připojeným (b) obvodem negativní impedance. (Měření provedl Ing. Pavel Psota, Ph. D. a Ing. Roman Doleček, Ph. D.)



**Obr. 3.3:** Reálná (a) a imaginární (b) část inverzní specifické akustické impedance  $1/z_m$  (v  $\mu\text{Pa}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) laditelného akustického metamateriálu vynesené v závislosti na frekvenci a absolutní hodnotě parametru  $|\alpha|$ . Červené čáry označují nulové hodnoty reálných a imaginárních částí  $1/z_m$ . Průsečík červených křivek vyznačuje optimální nastavení obvodu negativní impedance, při kterém byla dosažena přenosová ztráta 40 dB.



**Obr. 3.4:** Horní (a) a spodní (b) pohled na akustický metapovrch použitý v experimentu s adaptivního řízení tuhosti. Skládá se ze zakřivené skleněné desky upevněné v pevném ocelovém rámu. Piezoelektrické aktuátory a senzory typu MFC jsou přilepeny na horní i spodní povrch skleněné skořepiny.

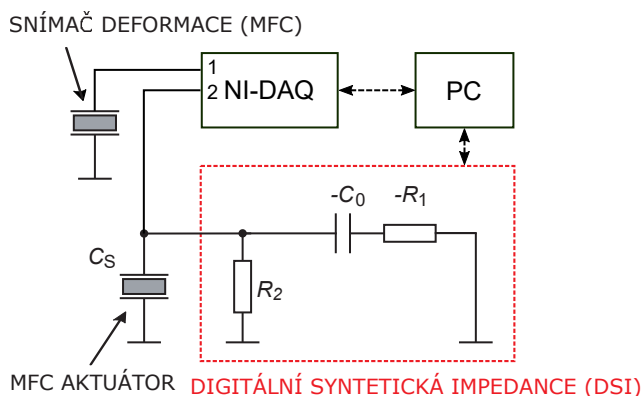
## 3.2 Laditelný akustický metapovrch s automatickým nastavením

Navzdory zjevným výhodám AAMS, je velkou překážkou jejich použití vysoká citlivost na nastavení parametrů obvodu negativní impedance. V případě použití piezoelektrických aktuátorů má největší vliv změna teploty aktuátorů, která vede k významné změně dielektrických vlastností hmoty aktuátoru a tím pádem i jeho elektrického náhradního modelu. To bylo inspirací pro níže uvedenou práci, která byla zaměřena na problém samočinného nastavení aktivního akustického metamateriálu v laboratorním experimentu simulující systém pro izolaci hluku.

V experimentu byl použit adaptivní akustický metapovrch (AAMS), jehož konstrukce je zobrazena na obr. 3.4. Vychází s AAMS popsáném v kapitole 2.2 a je doplněn o dodatečné MFC aktuátory nalepené na spodní straně skleněné skořepiny. Akustický metapovrch byl připojen k obvodu negativní impedance dle obr. 3.5. V tomto případě byla použita digitální syntetická impedance (DSI), jejíž algoritmus umožňuje emulovat přenos jednoduchého elektrického obvodu s téměř libovolnými hodnotami parametrů součástek. Systém DSI vyvinul Ing. Jakub Nečásek [17].

Piezoelektrické aktuátory MFC na AAMS byly spojeny paralelně a připojeny k svorkám DSI. Změna provozní teploty, která má ovlivňovat parametry AAMS, byla zajištěna teplovzdušným ventilátorem.

V programovém prostředí MATLAB na PC, byl implementován iterativní algoritmus založený na pracích [19, 18, 20] pro automatické udržení maxima efektivní tuhosti.



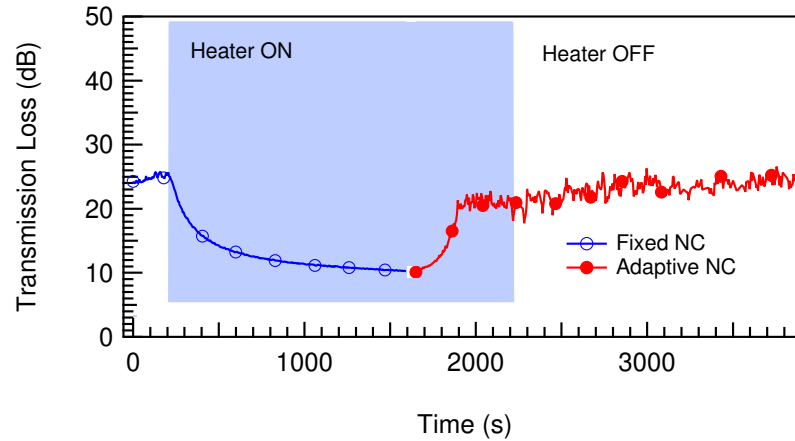
**Obr. 3.5:** Schéma zapojení adaptivního akustického metapovrchu (AAMS) v experimentu adaptivního řízení tuhosti, resp.  $z_m$  a TL. Dvěma kanály měřicího systému (NI-DAQ, PC) jsou snímána napětí MFC aktuátorů a snímačů. Na schématu nejsou vyneseny kanály použité pro akustická měření, snímající akustické tlaky a amplitudu vibrací povrchu. Bočník AAMS ve formě digitální syntetické impedance emuluje obvod s impedancí  $Z_{NC} = (-R_0 - X_{C_0}) \parallel R_2$ .

### 3.2.1 Výsledky experimentu

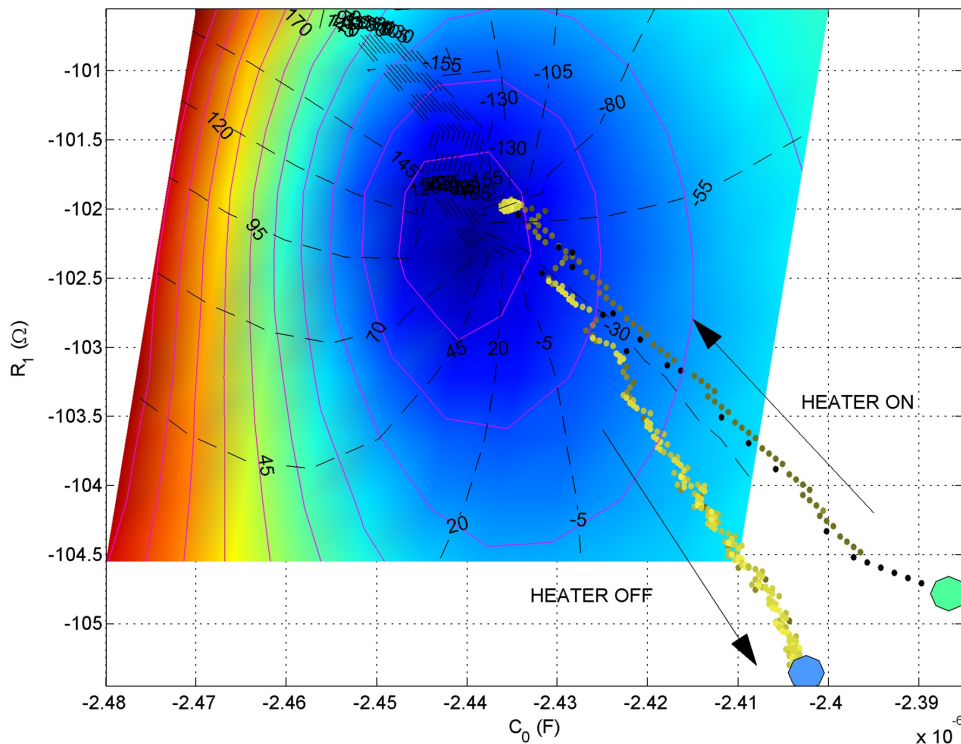
Graf na obr. 3.6 ukazuje, ve zjednodušené formě, efekt adaptivního řízení akustické ztráty AAMS. Jde o časovou závislost akustické ztráty při harmonickém buzení na frekvenci 260 Hz při dvou režimech řízení obvodu negativní impedance se současnou změnou pracovních podmínek. Algoritmus dokázal s vysokou přesností korigovat hodnoty elektrických parametrů elektrického obvodu v simulovaného v DSI tak, aby byla splněna podmínka maximální efektivní tuhosti.

Na obr. 3.7 je zobrazena funkce adaptivního algoritmu AAMS z pohledu parametrů připojené impedance. Barva konturového grafu ukazuje absolutní hodnotu rychlosti povrchu AAMS (měřeno LDV) jako funkci efektivních parametrů  $C_0$  a  $R_1$  ekvivalentního elektrického obvodu, který je emulován DSI. Graf rychlosti odpovídá situaci zvýšené teploty v čase 1600 s v obr. 3.6.

Hodnoty parametrů  $C_0$  a  $R_1$  elektrického obvodu emulovaného DSI indikují žluté až černé body vynesené v grafu. Body v grafu jsou vyneseny s konstantními vzdálenostmi v čase a dávají představu o funkci iteračního procesu automatické korekce parametrů DSI. Je patrné, že algoritmus míří k minimu plochy amplitudy vibrací, kde setrvává po dobu, kdy je zapnutý teplovzdušný ventilátor. Odtud se vrací do nového klidového bodu pro vypnutí ventilátoru (2200 s).



**Obr. 3.6:** Časová záznam závislost akustické ztráty AAMS na frekvenci 260 Hz při fixním a adaptivním režimu provozu obvodu negativní kapacity (NC) v experimentu s měnicími se provozními podmínkami AAMS. V oblasti označené *Heater ON* byl zapnut teplovzdušný zdroj. V okamžiku  $T=1600$  s byl spuštěn algoritmus automatického nastavení parametrů, který po cca 300 s obnovil TL na původní hodnotu.



**Obr. 3.7:** Ukázka funkce adaptivního akustického metapovrchu. Barva konturového grafu označuje absolutní hodnotu rychlosti částic v blízkosti adaptivního akustického metapovrchu. Modrá a červená barva odpovídají minimálním a maximálním hodnotám této rychlosti. Čárkované čáry jsou vrstevnice fázového rozdílu signálů rychlosti a napětí na svorkách aktuátorů. Vynesené body označují hodnoty elektrických parametrů  $-C_0$  a  $-R_1$  ekvivalentního elektrického obvodu emulovaného v DSI v průběhu času experimentu. Barva bodů odpovídá rychlosti jejich změny, resp. jejich vzdálenosti od předchozího bodu při konstantním intervalu vzorkování (*černá*=nejrychlejší).



## 4 Metapovrch pro difrakční akustické struktury

Zajímavou vlastností, kterou AMM nabízí, je možnost současného řízení a amplitudy a fáze prošlé akustické vlny. To umožňuje obecnější manipulaci s tvarem výsledné akustické vlny a použití AAMS pak přináší schopnost dynamických změn. Jednou z možných aplikací komplexního řízení přenosu je *ohyb* akustické vlny vytvořením akustického rozhraní, které mění fázi prošlé či odražené vlny v závislosti na poloze na tomto rozhraní, jak je schematicky znázorněno na obr. 4.1(a). Tento efekt je popisován zobecněným Snellovým zákonem:

$$\frac{1}{c_1} \sin \varphi_t(x) = \frac{1}{k_0} \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} + \frac{1}{c_2} \sin \varphi_i(x), \quad (4.1)$$

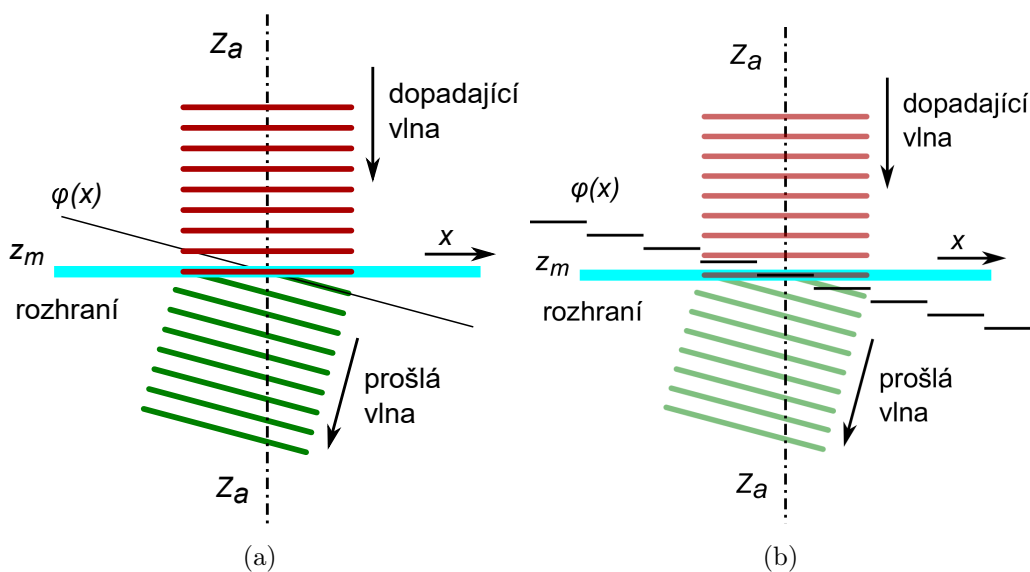
kde  $\varphi_t(x)$ ,  $\varphi_i(x)$  jsou úhly prošlé a dopadající vlny a  $\Phi(x)$  je inkrement fáze na rozhraní. Pro náš případ je  $\Phi(x) = \xi x$ , kde  $\xi$  představuje lineární gradient fáze podél rozhraní. Změnu fáze podél rozhraní lze realizovat pomocí soustavy AAMS s možností nezávislého řízení fáze. Jednotlivé AAMS pak představují diskrétní fázové kroky, aproximující požadovaný průběh změny fáze (obr. 4.1(b)). Společně pak tvoří akustické rozhraní, umožňující změnu směru šíření prošlé vlny v širokém rozsahu vhodným nastavením parametrů jednotlivých AAMS.

Jednou z možností konstrukce AAMS s nezávislého řízení amplitudy i fáze je rozhraní tvořené válcově zakřivenou piezoelektrickou membránou, jak je ilustrované na obr. 4.2. Hodnocenou veličinou je poměr akustických tlaků před a membránou. Za předpokladu stejného akustického prostředí ( $z_{a1}$ ,  $z_{a2}$ ) na obou stranách membrány, je tento poměr vyjádřitelný pomocí specifické akustické impedance membrány  $Z$ :

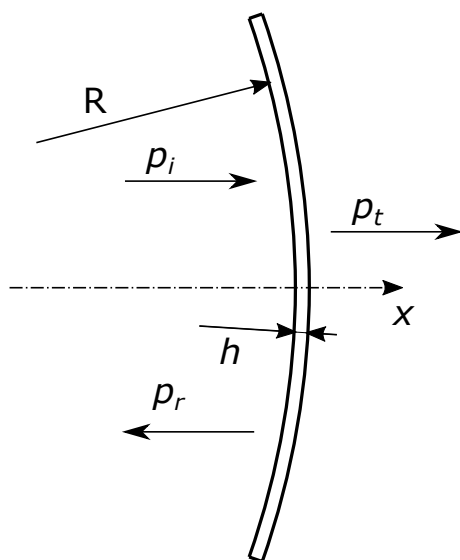
$$\frac{p_i}{p_t} = 1 + \frac{z_m}{2z_a}, \quad (4.2)$$

kde  $p_t$  a  $p_i$  je akustický tlak vlny prošlé resp. dopadající na membránu a  $z_a$  je charakteristická akustická impedance okolního média (vzduchu). Specifická akustická impedance membrány, v závislosti na frekvenci  $\omega$ , je funkcí tloušťky materiálu  $h$ , hustoty materiálu membrány  $\rho$ , Youngova modulu pružnosti  $Y$  a poloměru křivosti  $R$  [21]:

$$z_m = i\omega\rho h \left( 1 - \frac{Y}{\omega^2 \rho R^2} \right). \quad (4.3)$$

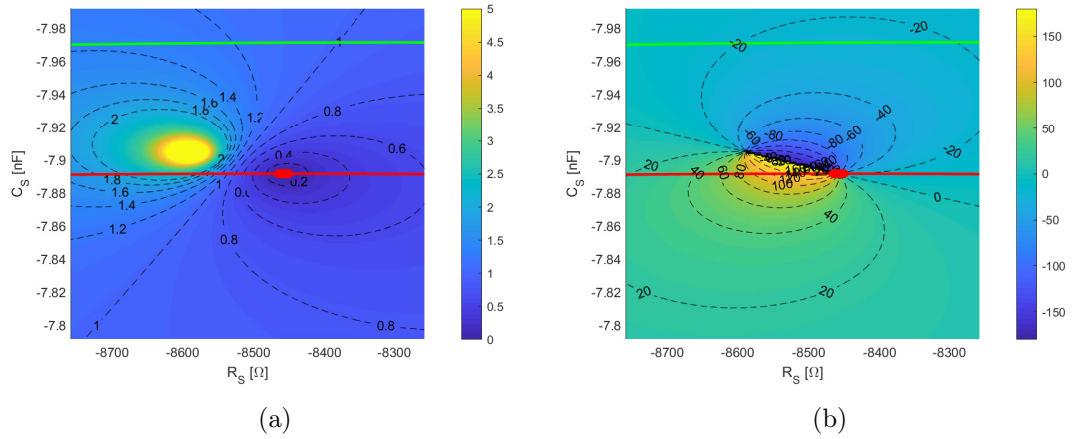


**Obr. 4.1:** (a) Ilustrace změny směru šíření vlny po průchodu rozhraním měnícím fázi v závislosti na příčné poloze  $x$ .  $z_a$  je specifická akustická impedance prostředí,  $z_m$  akustická impedance rozhraní a  $\varphi(x)$  je inkrement fáze, kterou akustická vlna získá po průchodu rozhraním. (b) Aproximace spojitého, lineárního průběhu inkrementu fáze akustické vlny po průchodu rozhraním pomocí schodové funkce odpovídající diskretním AAMS.



**Obr. 4.2:** Ideový model válcově zakřivené membrány použitý pro analýzu možností nezávislého řízení poměru akustických tlaků  $p_t/p_i$ . Membrána je definována poloměrem křivosti  $R$  a tloušťkou materiálu  $h$ .





**Obr. 4.3:** Modelové závislosti (a) absolutní hodnoty a (b) fáze přenosu akustického tlaku ( $p_t/p_i$ ) válcově zakřivené membrány na *parametrech externího obvodu*  $R_S$  a  $C_S$ . Doplňené přímky odpovídají vztahu  $C_S = \text{Re}\left([i\omega(Z_{\text{CRIT}} - R_S)]^{-1}\right)$ , kde červená odpovídá  $Z_{\text{CRIT}} = Z_S(-1 + k^2)^{-1}$  a prochází bodem maximální tuhosti membrány, zelená odpovídá  $Z_{\text{CRIT}} = -Z_S$  a tudíž prochází bodem nulové tuhosti membrány.  $Z_S$  je impedance aktuátoru. Pomocí parametrů  $R_S$  a  $C_S$  je možné vybrat vhodnou kombinaci amplitudy a fáze, ovšem s úvahou stability zvoleného pracovního bodu.

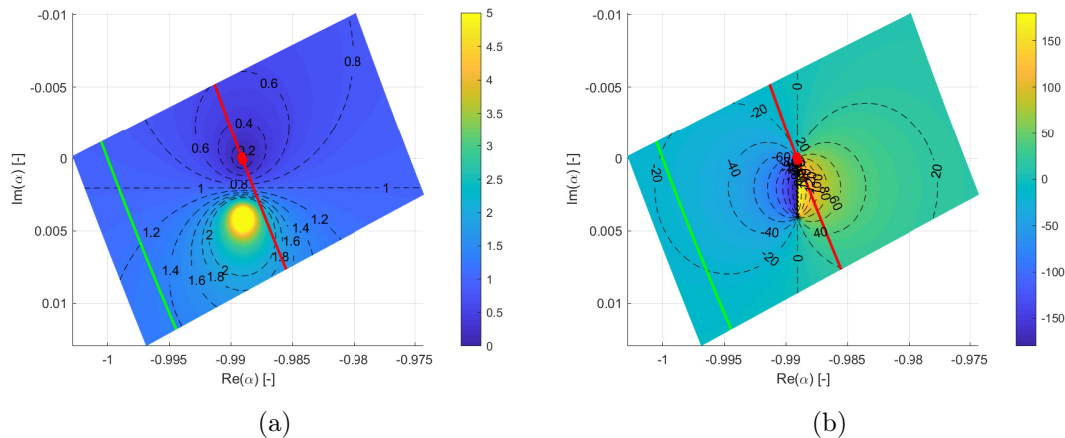
Youngova modulu pružnosti  $Y$  je řízený hodnotou  $\alpha$  a tudíž je možné, pro zvolenou hodnotu  $p_t/p_i$ , vyjádřit požadovanou hodnotu  $\alpha$ , ze vztahu pro specifickou akustickou impedanci (4.3):

$$\alpha\left(\omega, \frac{p_t}{p_i}\right) = k^2 \left\{ 1 + \left[ \frac{\omega}{Y} \left( \omega\rho + i\frac{R^2}{h} 2z_a \left( \frac{p_i}{p_t} - 1 \right) \right) - 1 \right]^{-1} \right\} - 1. \quad (4.4)$$

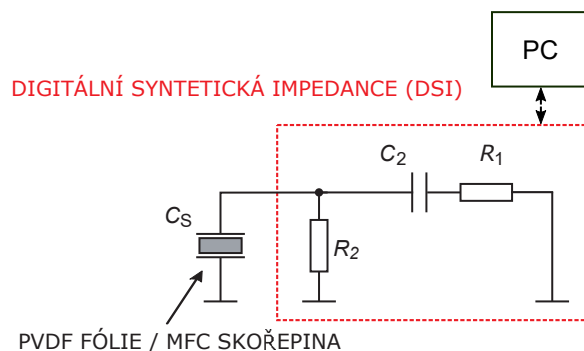
V závislosti na realizaci bočníku lze pak vyjádřit hodnoty součástek či parametrů nutných k dosažení požadované hodnoty  $p_t/p_i$ .

Amplitudové a fázové vlastnosti akustického přenosu membrány připojené k obvodu negativní impedance lze dobře demonstrovat grafy na obr. 4.3 a obr. 4.4. Ty ukazují závislost amplitudy a fáze poměru  $p_t/p_i$  na hodnotě parametru  $\alpha$  zobrazeném v komplexní rovině resp. rezistivní a kapacitní složce externího obvodu negativní impedance  $R_S + (i\omega C_S)^{-1}$ . Pro výpočet byl zvolen model odpovídající experimentálnímu AAMS s PVDF membránou.

Mimo bod maximální tuhosti membrány, tj. minima přenosu, je v závislostech na obr. 4.3 a obr. 4.4 je patrný další významný bod, kde amplituda akustického přenosu dosahuje hodnoty větších než 1. Jedná se o oblasti záporných hodnot specifické akustické impedance membrány  $Z$ . Maxima, resp.  $\infty$ , dosahuje při  $Z = -2z_a$ . Tento režim je atraktivní pro manipulaci s fází přenesené vlny, bohužel však prakticky nevyužitelný díky efektu silné zpětné vazby, která vede k nestabilitě takového systému. Maximum bylo záměrně oříznuto na hodnotě  $|p_t/p_i| = 5$ .



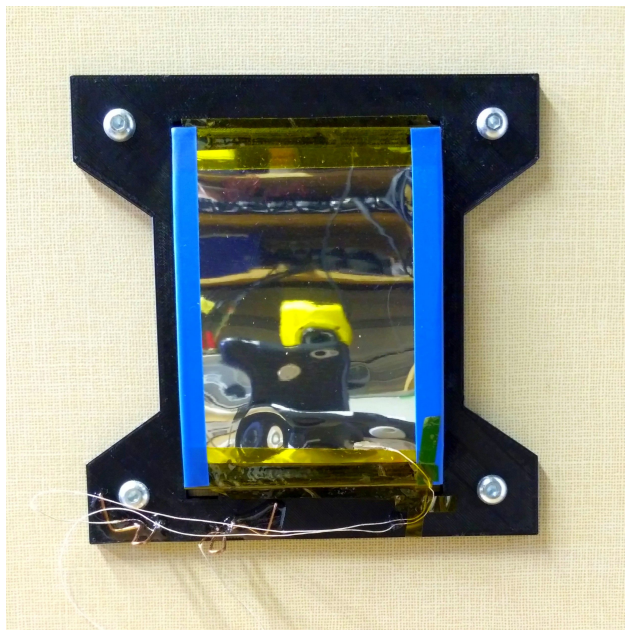
**Obr. 4.4:** Modelové závislosti (a) absolutní hodnoty a (b) fáze přenosu akustického tlaku ( $p_t/p_i$ ) válcově zakřivené membrány na reálné a imaginární složce parametru  $\alpha$ . Doplněné přímky odpovídají vztahu  $C_S = \text{Re}([i\omega(Z_{\text{CRIT}} - R_S)]^{-1})$ , kde červená odpovídá  $Z_{\text{CRIT}} = Z_S(-1 + k^2)^{-1}$  a prochází bodem maximální tuhosti membrány, zelená odpovídá  $Z_{\text{CRIT}} = -Z_S$  a tudíž prochází bodem nulové tuhosti membrány.  $Z_S$  je impedance aktuátoru.



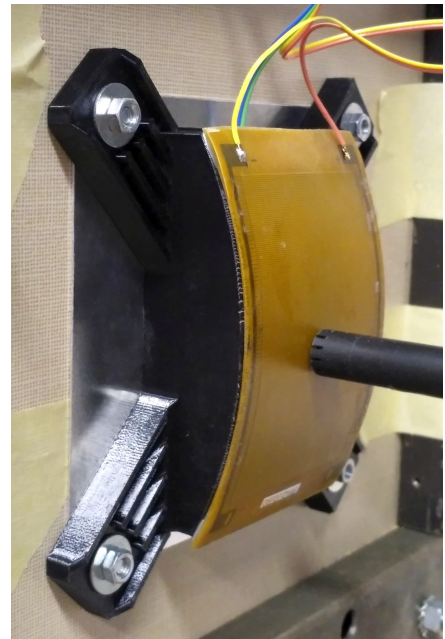
**Obr. 4.5:** Elektrické náhradní schéma zkoumaných AAMS pro řízení fáze a amplitudy prošlé akustické vlny. Bočník AAMS je tvořen DSI (digitální syntetickou impedancí) emulující obvod s impedancí  $Z_{NC} = (R_1 + X_{C_2}) \parallel R_2$ .

## 4.1 Experimentální zařízení pro řízení amplitudy a fáze

Pro ověření výše uvedených principů bylo realizováno experimentální zařízení s válcovou membránou resp. skořepinou. Postupně vznikly 4 varianty zařízení, dvě s PVDF membránou a dvě s tuhou MFC skořepinou zobrazené na obr. 4.6(a) a 4.6(b). Membrány a skořepiny jsou doplněny obvodem záporné impedance ve formě digitální syntetické impedance (DSI), jak je zobrazeno na obr. 4.5. Digitální syntetická impedance imitovala obvod  $Z_{NC} = (R_1 + (i\omega C_2)^{-1}) \parallel R_2$ .

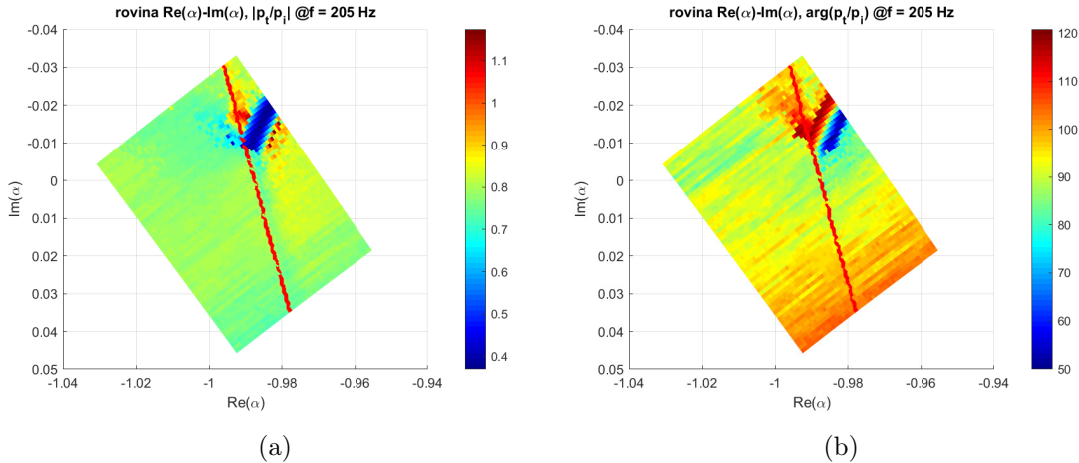


(a)



(b)

**Obr. 4.6:** (a) Druhý experimentální model AAMS označený jako *PVDF2* s modifikovaným rámem z 3D tištěného PETG rámem a PVDF fólií (KUREHA CORPORATION) o tloušťce  $40\ \mu\text{m}$ . Ta je připevněna k rámu pomocí kaptonové lepicí pásky. AAMS je připevněný k víku akustického boxu. (b) Detail čtvrtého experimentálního modelu AAMS *MFC2* se sklolaminátovou skořepinou s MFC aktuátorem pevně přilepeným k 3D tištěnému PETG rámu, efektivně tvořícím vetknuté uložení. AAMS je označený jako *MFC2*. Rozměry skořepiny jsou  $75 \times 60\ \text{mm}$ . AAMS je zasazen do víka akustického boxu vyztuženého kovovými profily.



**Obr. 4.7:** Mapa amplitudy (a) a fáze (b) akustického přenosu  $p_t/p_i$  v rovině komplexních hodnot  $\alpha$ . Červeně je vyznačena teoretická hranice stability, která je použita pro rozdělení pracovních bodů na stabilní (nízké hodnoty  $\text{Re}(\alpha)$ ) a nestabilní (vyšší hodnoty  $\text{Re}(\alpha)$ ).

## 4.2 Výsledky měření na experimentálním zařízení PVDF2

Na základě testů byla pro měření závislosti  $C_t = f(R_1, C_2)$  vybrána oblast  $R_1$  v intervalu  $-21782$  až  $-26480 \Omega$  a  $C_2$  v intervalu  $10,31$  až  $-10,81 \text{ nF}$ .

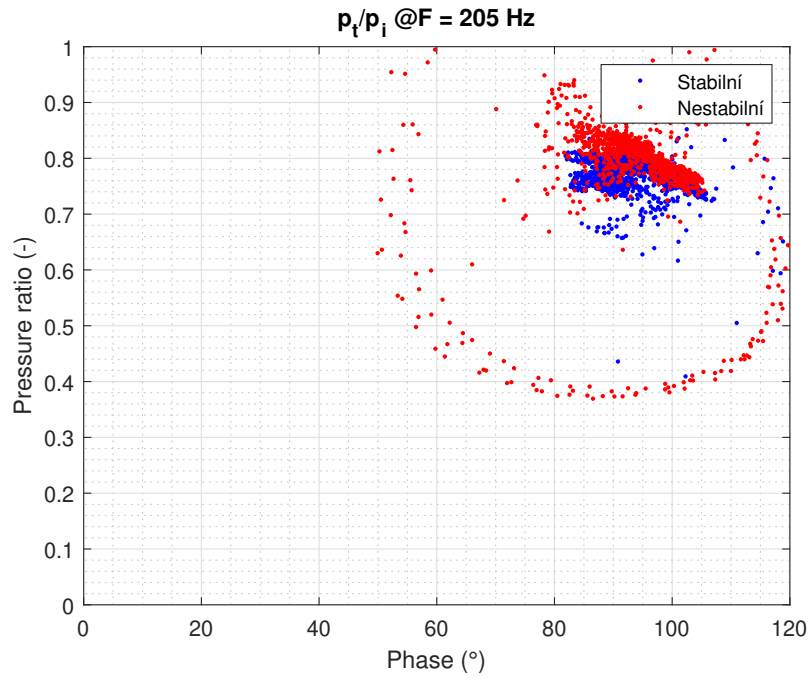
Následně byla změřena amplituda a fáze  $C_t$  zobrazená na obr. 4.7. Z ní pak byly, pomocí výše popsané hranice stability, vybrány stabilní a nestabilní pracovní body zobrazené na obr. 4.8.

Mapa amplitud a fází pracovních bodů  $C_t$  je, ve srovnání s měřením na *PVDF1*, výrazně kompaktnější. Užitečná pracovní oblast má fázový rozsah cca.  $\Delta\varphi = 20^\circ$  v rozsahu amplitud  $|C_t|$  od  $0,68$  až  $0,8$ . Výsledek je silně ovlivněn vhodnou volbou hranice stability a impedančním rozlišením použité *DSI*, díky nízké hodnotě  $k^2$ , vedoucí k požadavku na relativní velikost ladícího kroku impedance menší než  $10^{-3}$ .

## 4.3 Výsledky měření na experimentálním zařízení MFC2

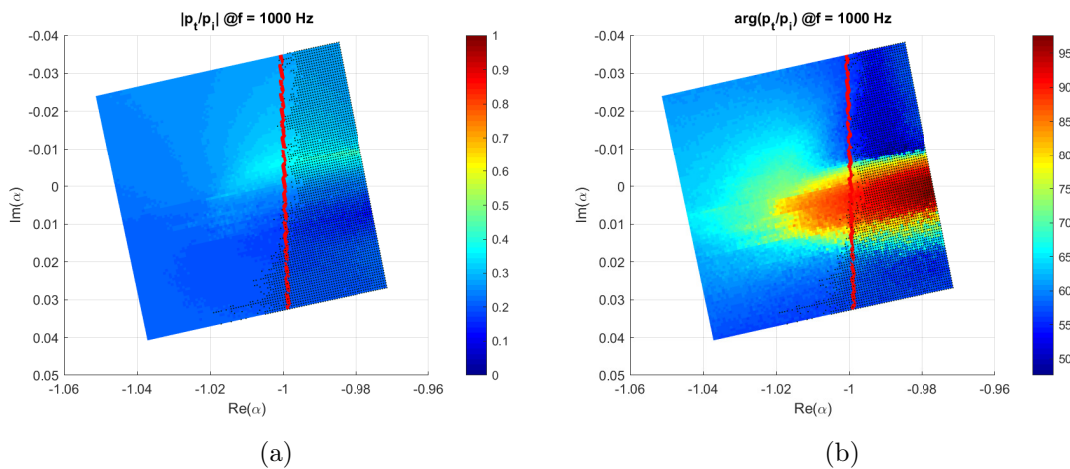
Pro měření efektu řízení amplitudy a fáze  $C_t$  byla zvolena frekvence  $1000 \text{ Hz}$ . Pomocí modelu impedance aktuátoru a sady měření byl určen rozsah parametrů  $R_1 = -1300$  až  $-2300 \Omega$  a  $C_2 = -10,11$  až  $-10,81 \text{ nF}$  v okolí  $\alpha = -1$ . Výsledná mapa naměřených pracovních bodů, rozdělená pomocí mapy stability, je na obr. 4.10.

Naměřená oblast je kompaktní a blíže korespondující s předpoklady o chování systému. Rozsah naměřených fází je cca.  $\Delta\varphi = 35^\circ$  v rozsahu amplitud

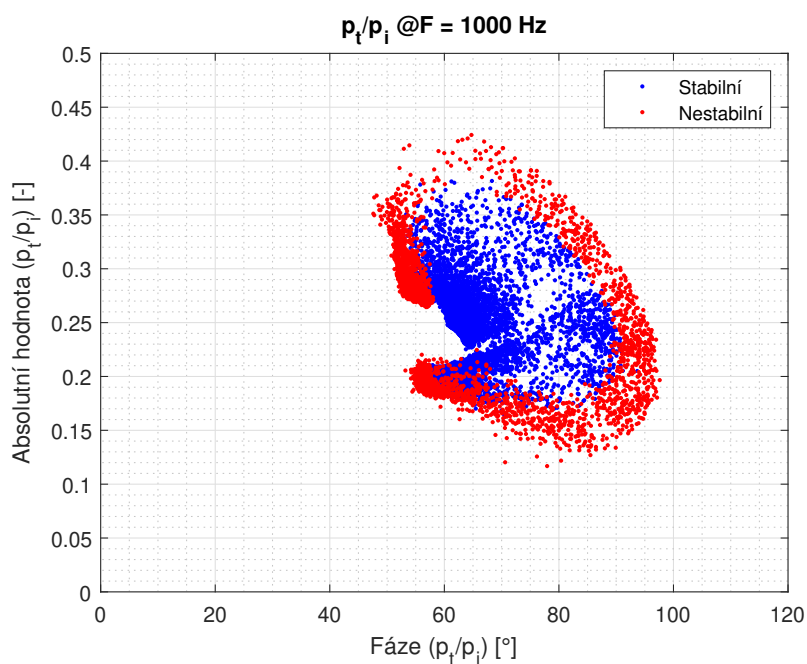


**Obr. 4.8:** Plocha možných kombinací amplitudy a fáze přenesené vlny experimentálního AAMS PVDF2 změřená při  $f = 205$  Hz,  $R_2 = 250$  k $\Omega$ . Modře jsou vyznačené pracovní body vyhodnocené jako stabilní, červeně pak nestabilní. Oblast stabilních pracovních bodů je lépe definovaná, avšak malá, zejména v rozsahu amplitud.

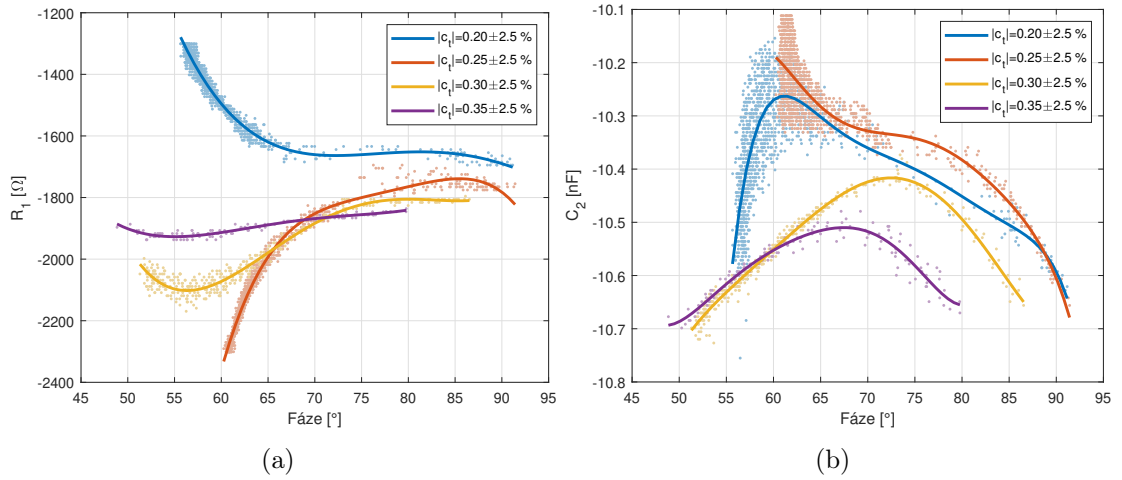
$|C_t| = 0,2$  až  $0,35$ . Z mapy pracovních bodů byly vybrány oblasti s konstantní  $|C_t| = (0,2; 0,25; 0,3; 0,35)$  s tolerancí  $\pm 2,5\%$ , ze kterých byly fitováním určeny polynomiální závislosti  $R_1(\varphi_{C_t})$  a  $C_2(\varphi_{C_t})$  graficky vyneseny na obr. 4.11(a) a obr. 4.11(b). Polynomiální závislosti  $R_1(\varphi_{C_t})$  a  $C_2(\varphi_{C_t})$  jsou přibližným parametrickým popisem vrstevnic  $|C_t|$  (s tolerancí  $\pm 2,5\%$ ). Takto také byly vyneseny do grafů na obr. 4.12, kde je patrné, po jakých trajektoriích se musí pohybovat  $R_1, C_2$  při řízení fáze akustického přenosu MFC2. Pro příklad jsou níže uvedeny polynomiální závislosti parametrů pro  $|C_t| = 0,25$ :



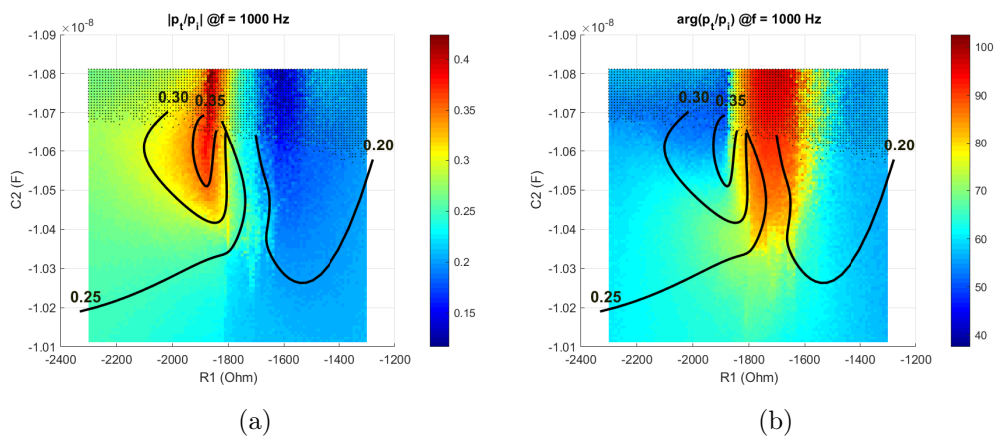
**Obr. 4.9:** Mapa amplitudy (a) a fáze (b) akustického přenosu  $p_t/p_i$  v rovině komplexních hodnot  $\alpha$ . Červeně je vyznačena teoretická hranice stability, černě pak body označené jako nestabilní.



**Obr. 4.10:** Plocha možných kombinací amplitudy a fáze přenesené vlny experimentálního AAMS MFC2 změřená při  $f = 1000 \text{ Hz}$ ,  $R_2 = 170 \text{ k}\Omega$ . Modře jsou vyznačené pracovní body odpovídající stabilní oblasti v rovině komplexních hodnot  $\alpha$ , červeně pak nestabilní. Oblast je uzavřená a dobře rozdělená, tudíž indikuje dobrou použitelnost pro aplikaci řízení fáze a amplitudy.



**Obr. 4.11:** Data pro 4 závislosti parametru (a)  $R_1 = f(\varphi_{C_t})$  a (b)  $C_2 = f(\varphi_{C_t})$  náhradní impedance bočníku *MFC2*, která budou používána řízení fáze akustického přenosu  $\varphi_{C_t} = f(R_1, C_2)$ . Body jsou vynesena vybraná naměřená data stabilních pracovních bodů pro zvolenou hodnotu  $|C_t|$  s tolerancí  $\pm 2, 5\%$ . Křivky pak odpovídají polynomiálním závislostem parametrů  $R_1$  a  $C_2$  naititovaným do vybraných dat. Polynomiální závislosti jsou výhodné pro programové řízení přenosu AAMS.



**Obr. 4.12:** Ilustrace trajektorií pracovních bodů polynomiálních závislostí  $R_1 = f(\varphi_{C_t})$  a  $C_2 = f(\varphi_{C_t})$  vytvořených pro řízení fáze akustického přenosu  $C_t = p_t/p_i$ . Vykresleny jsou trajektorie pro 4 hodnoty  $|C_t|$  rovny 0,2; 0,25; 0,3 a 0,35. V podkladu jsou vyneseny (a)  $|C_t|$  a (b)  $\arg(C_t)$ . Černými tečkami je v obou grafech vyznačena oblast nestabilních pracovních bodů. Trajektorie představují parametricky popsané vrstevnice amplitud akustického přenosu.





## 5 Shrnutí obsahu práce

V této kapitole jsou shrnuty klíčové výsledky disertační práce.

### 5.1 Shrnutí výsledků modelování aktivních metamateriálů a metapovrchů

V práci byla představena dvě zařízení reprezentující aktivní mechanický metamateriál (AMMM) a aktivní akustický metapovrch (AAMS), která jsou tvořena piezoelektrickým aktuátorem připojeným k elektrickému bočníku. Pro tato zařízení byly vytvořeny matematické modely, který byly využity k analýze jejich mechanických, elektrických a akustických vlastností. V případě AMMM byl matematický model využit k odvození analytických vzorců pro výpočet požadovaných hodnot jednotlivých součástek elektronického obvodu bočníku, které umožní docílení nulové (absolutně měkké) nebo nekonečné (absolutně tuhé) efektivní pružnosti systému.

Pro aktivní akustický metapovrch (AAMS), který je tvořen skleněnou skořepinou s připevněnými MFC aktuátory, byl vytvořen matematický model, který umožnil dostatečně jednoduchý a přesný popis akustických veličin systému v okolí první rezonanční frekvence. Tento zjednodušený popis zahrnuje závislosti na změně efektivní tuhosti aktuátorů jakožto efektu připojeného bočníku, díky čemuž bylo možné analyzovat vliv toho jevu měření akustických veličin.

Pro analýzu energetických toků v systémech AMMM jejich celkové energetické účinnosti, byly sestaveny dvě implementace záporné kapacity pro aktivní metamateriály a to s lineárními a spínanými stupni výkonových zesilovačů. Prokázalo, že s oběma implementacemi syntetické impedance je možné dosáhnout stejného účinku na frekvenční závislost propustnosti vibrací.

Na těchto zařízeních bylo provedeno podrobné měření a analýza mechanických a elektrických toků energie mezi AMMM a zdrojem vibrací. V experimentu, využívajícím zkonstruovaný AMMM pro izolaci vibrací, dosahovala špičková hodnota mechanické energie vstupující do AMMM ze zdroje vibrací hodnoty  $76 \mu\text{W}$ . Elektrický výkon, dodávaný ze napájecího zdroje, byl přibližně  $100 \text{ mW}$  v případě lineárního a  $10 \text{ mW}$  v případě spínaného koncového stupně obvodu záporné kapacity. Pomocí syntetické impedance se spínaným výkonovým zesilovačem je tedy možné

snížit elektrický příkon zařízení pro izolaci vibrací o více než 90 %, přesto je celková energetická účinnost menší než 1 %.

## 5.2 Shrnutí měřicích metod

K hodnocení vlastností zkonstruovaného AAMS byl sestaven laboratorní systém pro jednoduché a rychlé měření specifické akustické impedance materiálu či zařízení (AAMS), z nichž je možné přímým výpočtem určit hodnotu akustické přenosové ztráty TL a specifické akustické impedance  $z_m$ .

Problematika vizualizace jednotlivých vibračních módů AAMS byla adresována implementací jedné z metod digitální holografie. Jedná se o metodu Time Averaged Frequency Shifted Digital Holography (TAFSDH), která umožňuje měřit amplitudy vibrací na jedné frekvenci, ale s vysokým prostorovým rozlišením. Získané hodnoty byly v dobrém souhlasu s výsledky měření LDV, které poskytuje vysoké frekvenční rozlišení v jediném bodě. Alternativou k této metodě je například skenovací LDV, která však poskytuje informaci s nízkým prostorovým rozlišením. Pro experimentální testování AAMS, kdy je systém testován na jedné nebo málo vybraných frekvencích, představuje TAFSDH vhodný doplněk LDV či alternativu ke skenovacím LVD.

## 5.3 Shrnutí adaptivních metapovrchů

S použitím zkonstruovaného AAMS byly testovány možnosti aktivní změny vlastností akustického metamateriálu ve zvolené frekvenční oblasti. Prostřednictvím cílených změn parametrů aktivního bočnicku bylo dosaženo dvou významných cílů:

- (i) Maximalizace akustické přenosové ztráty TL na vybraných frekvencích (247 Hz a 258 Hz) při optimálním fixním nastavení parametrů bočnicku.
- (ii) Nastavení parametrů akustického metamateriálu prostřednictvím parametrů bočnicku tak, že vykazuje negativní tuhost a současně i negativní akustickou impedanci.

Prokázalo se, že pomocí aktivních bočníků se zápornou kapacitou lze do značné míry řídit efektivní elastické vlastnosti akustických metamateriálů s piezoelektrickými vrstvami v souladu s principy metody aktivního řízení tuhosti.

Pro eliminaci vlivu změny pracovních podmínek (teploty) na hodnotu TL AAMS, byl implementován iterativní řídicí algoritmus pro automatické přizpůsobení elektrických parametrů bočnicku. Experimentálně byla prokázána schopnost nejen udržení požadovaných hodnot efektivních parametrů AAMS při změnách teploty, ale i jejich automatickému obnovení při rozladění systému.

## 5.4 Shrnutí metapovrchů pro difrakční akustické struktury

Byly představeny metody použití AAMS jako nástroje k řízení fáze a amplitudy akustické vlny prošlé rozhraním, kdy jednou z možných aplikací je změna směru šíření vlny pomocí řízení fáze prošlé akustické vlny v závislosti na poloze na AAMS. Lineární změna fáze není pomocí AAMS realizovatelná, ale je možná její stupňovitá aproximace pomocí diskretních AAMS. Vliv diskretizace byl, pro vybraný případ, kvantifikován použitím teorie difrakční účinnosti mřížek. Difrakovaná část energie představuje představuje méně než 15 % pro změnu směru  $\psi < \pi/4$  při použití 4 a více segmentů na rozměr odpovídající vlnové délce dopadající vlny.

Pro praktickou demonstraci změny šíření vlny na rozhraní byly zvoleny AAMS ve formě zakřivených membrán resp. skořepin. Pro ně byly vytvořeny teoretické modely a teoretický předpis pro řízení amplitudy a fáze pomocí parametrů negativního bočníku. Zjednodušený ani složitější model, vycházející ze zavedeného popisu partiální diferenciální rovnicí pohybu membrány, nebyl schopen předpovědět akustické vlastnosti zkonstruovaných AAMS změřených při experimentech. Důvody tohoto nesouladu jsou zejména odlišnosti materiálových modelů membrán a skořepin, které pravděpodobně mají své vlastní frekvenční závislosti vlastnosti a také v nedokonalosti fyzických realizací modelů AAMS.

V souladu s teoretickými modely byly zkonstruovány a charakterizovány dva AAMS s PVDF membránou a dva AAMS s MFC skořepinou s přibližně podobnými rozměry. MFC skořepina i PVDF membrána tvoří piezoelektrický aktuátor a byla doplněna bočníkem se formě DSI (digitální syntetická impedance). U modelů s s PVDF membránou se výrazně projevoval nesouhlas mezi teorií a experimentálně zjištěnými hodnotami, způsobený jak nedokonalostí vlastních konstrukcí modelů tak i omezenou detailností teoretického modelu. Modely s MFC skořepinou vykazovaly lepší soulad s teoretickými předpoklady. Řízení amplitudy a fáze  $C_t$  bylo prokazatelně a úspěšně demonstrováno na 2. modelu AAMS s MFC skořepinou.

Hlavním výsledkem je zmapování oblasti parametrů bočníku pro výše uvedený model AAMS s MFC skořepinou, ve které lze stabilně řídit přenos  $C_t$  a to v rozsahu  $\Delta(\varphi) = 35^\circ$  pro amplitudy v rozsahu  $|C_t|=0,2$  až  $0,35$ . Pro čtyři hodnoty  $|C_t| = (0, 2; 0, 25; 0, 3; 0, 35)$  byly určeny polynomiální závislosti  $R_1(\varphi_{C_t})$  a  $C_2(\varphi_{C_t})$ , které dovolují zkonstruovat jeden segment metapovrchu pro manipulaci s prošlou akustickou vlnou dle požadavků Snellova zákona.



## Použitá literatura

- [1] Alan Lex Brown. „Soundscape planning as a complement to environmental noise management“. In: *Proceedings of the 43rd International Congress on Noise Control Engineering*. Melbourne, AUSTRALIA: Australian Acoustical Society, lis. 2014, s. 912–1 – 912–10. URL: [http://www.acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/INTERNOISE2014/papers/p912.pdf](http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/INTERNOISE2014/papers/p912.pdf).
- [2] Ping Sheng et al. „Dynamic mass density and acoustic metamaterials“. en. In: *Physica B: Condensed Matter* 394.2 (květ. 2007), s. 256–261. ISSN: 09214526. DOI: [10.1016/j.physb.2006.12.046](https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.12.046). URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921452606019120> (cit. 23. 03. 2015).
- [3] Nicholas Fang et al. „Ultrasonic metamaterials with negative modulus“. In: *Nature Materials* 5.6 (červ. 2006). WOS:000237968100016, s. 452–456. ISSN: 1476-1122. DOI: [10.1038/nmat1644](https://doi.org/10.1038/nmat1644). URL: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nmat1644>.
- [4] Jensen Li a C. Chan. „Double-negative acoustic metamaterial“. en. In: *Physical Review E* 70.5 (lis. 2004), 055602(R). ISSN: 1539-3755, 1550-2376. DOI: [10.1103/PhysRevE.70.055602](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.055602). URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.70.055602> (cit. 23. 03. 2015).
- [5] Frédéric Bongard, Hervé Lissek a Juan R. Mosig. „Acoustic transmission line metamaterial with negative/zero/positive refractive index“. en. In: *Physical Review B* 82.9 (zář. 2010), s. 094306. ISSN: 1098-0121, 1550-235X. DOI: [10.1103/PhysRevB.82.094306](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.094306). URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.82.094306> (cit. 23. 03. 2015).
- [6] Pai-Yen Chen et al. „Acoustic scattering cancellation via ultrathin pseudo-surface“. In: *Applied Physics Letters* 99.19 (lis. 2011). WOS:000297030200028, s. 191913. ISSN: 0003-6951. DOI: [10.1063/1.3655141](https://doi.org/10.1063/1.3655141).
- [7] Mathias Fink. „Acoustic metamaterials nearly perfect sound absorbers“. In: *Nature Materials* 13.9 (zář. 2014). WOS:000341343500011, s. 848–849. ISSN: 1476-1122.
- [8] Guancong Ma et al. „Acoustic metasurface with hybrid resonances“. In: *Nature Materials* 13.9 (zář. 2014). WOS:000341343500018, s. 873–878. ISSN: 1476-1122. DOI: [10.1038/nmat3994](https://doi.org/10.1038/nmat3994). URL: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nmat3994>.

- [9] Yangbo Xie et al. „Wavefront modulation and subwavelength diffractive acoustics with an acoustic metasurface“. In: *Nature Communications* 5 (lis. 2014). WOS:000345913600017, s. 5553. ISSN: 2041-1723. DOI: [10.1038/ncomms6553](https://doi.org/10.1038/ncomms6553).
- [10] Yongyao Chen et al. „Enhanced acoustic sensing through wave compression and pressure amplification in anisotropic metamaterials“. In: *Nature Communications* 5 (říj. 2014). WOS:000343985000001, s. 5247. ISSN: 2041-1723. DOI: [10.1038/ncomms6247](https://doi.org/10.1038/ncomms6247).
- [11] Romain Fleury, Dimitrios Sounas a Andrea Alu. „An invisible acoustic sensor based on parity-time symmetry“. In: *Nature Communications* 6 (led. 2015). WOS:000348741900003, s. 5905. ISSN: 2041-1723. DOI: [10.1038/ncomms6905](https://doi.org/10.1038/ncomms6905).
- [12] S. O. Reza Moheimani a Andrew J Fleming. *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*. English. London: Springer, 2006. ISBN: 978-1-84628-332-1 1-84628-332-9 1-84628-331-0 978-1-84628-331-4. URL: <http://public.eblib.com/EBLPublic/PublicView.do?ptiID=303693> (cit. 16. 01. 2014).
- [13] W. K. Wilkie et al. „Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications“. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. Ed. J. H. Jacobs. Sv. 3991. Červ. 2000, s. 323–334.
- [14] Katerina Novakova et al. „Planar acoustic metamaterials with the active control of acoustic impedance using a piezoelectric composite actuator“. In: *2013 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATIONS OF FERROELECTRIC AND WORKSHOP ON THE PIEZORESPONSE FORCE MICROSCOPY (ISAF/PFM)*. IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric / Workshop on the Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/PFM), Prague, CZECH REPUBLIC, JUL 21-25, 2013. IEEE, čvc 2013, s. 317–320. ISBN: 978-1-4673-5996-2 978-1-4673-5994-8. DOI: [10.1109/ISAF.2013.6748720](https://doi.org/10.1109/ISAF.2013.6748720). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6748720>.
- [15] Pavel Psota et al. „Measurement of vibration mode structure for adaptive vibration suppression system by digital holography“. In: *2013 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLICATIONS OF FERROELECTRIC AND WORKSHOP ON THE PIEZORESPONSE FORCE MICROSCOPY (ISAF/PFM)*. IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric / Workshop on the Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/PFM), Prague, CZECH REPUBLIC, JUL 21-25, 2013. IEEE, čvc 2013, s. 214–217. ISBN: 978-1-4673-5996-2 978-1-4673-5994-8. DOI: [10.1109/ISAF.2013.6748749](https://doi.org/10.1109/ISAF.2013.6748749). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6748749>.
- [16] Katerina Novakova, Pavel Mokry a Jan Vaclavík. „Application of piezoelectric macro-fiber-composite actuators to the suppression of noise transmission through curved glass plates“. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 59.9 (zář. 2012), s. 2004–2014. ISSN: 0885-3010. DOI: [10.1109/TUFFC.2012.2420](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2420). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6306022> (cit. 03. 01. 2013).

- [17] J. Nečásek, J. Václavík a P. Marton. „Digital synthetic impedance for application in vibration damping“. en. In: *Review of Scientific Instruments* 87.2 (ún. 2016), s. 024704. ISSN: 0034-6748, 1089-7623. DOI: [10.1063/1.4942085](https://doi.org/10.1063/1.4942085). URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/87/2/10.1063/1.4942085> (cit. 04. 09. 2016).
- [18] Milos Kodejska et al. „Adaptive vibration suppression system: an iterative control law for a piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor“. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control* 59.12 (pros. 2012), s. 2785–2796. ISSN: 0885-3010. DOI: [10.1109/TUFFC.2012.2520](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2520). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6373802>.
- [19] Tomáš Sluka et al. „Sound shielding by a piezoelectric membrane and a negative capacitor with feedback control“. English. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 55.8 (srp. 2008), s. 1859–1866. ISSN: 0885-3010. DOI: [10.1109/TUFFC.2008.869](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.869).
- [20] Kateřina Steiger et al. „Adaptive acoustic metasurfaces for the active sound field control“. In: *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics*. Buenos Aires: Asociación de Acústicos Argentinos, zář. 2016, ICA2016–597. ISBN: 978-987-24713-6-1. URL: <http://www.ica2016.org.ar/ica2016proceedings/ica2016/ICA2016-0597.pdf>.
- [21] Pavel Mokry, Eichi Fukada a Kohei Yamamoto. „Noise shielding system utilizing a thin piezoelectric membrane and elasticity control“. In: *Journal of Applied Physics* 94.1 (2003), s. 789–796. ISSN: 00218979. DOI: [10.1063/1.1583152](https://doi.org/10.1063/1.1583152). URL: <http://link.aip.org/link/JAPIAU/v94/i1/p789/s1&Agg=doi>.
- [22] Nikola Vujic, Donald J. Leo a Douglas K. Lindner. „Power flow analysis for amplifier design and energy harvesting“. In: *Proc. SPIE 4697, Smart Structures and Materials 2002: Damping and Isolation*. Ed. Gregory S. Agnes. San Diego, CA, USA, červ. 2002, s. 109–120. DOI: [10.1117/12.472647](https://doi.org/10.1117/12.472647). URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=883094> (cit. 10. 06. 2014).
- [23] Douglas K. Lindner, Nikola Vujic a Donald J. Leo. „Comparison of drive amplifier for piezoelectric actuators“. In: *Proc. SPIE 4332, Smart Structures and Materials 2001: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. Ed. Anna-Maria R. McGowan. Newport Beach, CA, USA, červ. 2001, s. 281–291. DOI: [10.1117/12.429667](https://doi.org/10.1117/12.429667). URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=908179> (cit. 10. 06. 2014).
- [24] Renato Spagnolo. *Manuale di acustica applicata*. it. UTET Università, 2001. ISBN: 978-88-7750-710-5.
- [25] C. A. Gallo et al. „Piezoelectric actuators applied to neutralize mechanical vibrations“. In: *Journal of Vibration and Control* 18.11 (říj. 2011), s. 1650–1660. ISSN: 1077-5463, 1741-2986. DOI: [10.1177/1077546311422549](https://doi.org/10.1177/1077546311422549). URL: <http://jvc.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1077546311422549> (cit. 28. 01. 2014).

- [26] B de Marneffe a A Preumont. „Vibration damping with negative capacitance shunts: theory and experiment“. In: *Smart Materials and Structures* 17.3 (červ. 2008), s. 035015. ISSN: 0964-1726, 1361-665X. DOI: [10.1088/0964-1726/17/3/035015](https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/035015). URL: <http://stacks.iop.org/0964-1726/17/i=3/a=035015?key=crossref.79109fcde049d49da4a9727570077996> (cit. 26. 09. 2017).
- [27] Pavel Mokry, Eichi Fukada a Kohei Yamamoto. „Sound absorbing system as an application of the active elasticity control technique“. In: *Journal of Applied Physics* 94.11 (pros. 2003), s. 7356–7362. ISSN: 0021-8979. DOI: [10.1063/1.1625100](https://doi.org/10.1063/1.1625100). URL: <http://link.aip.org/link/JAPIAU/v94/i11/p7356/s1&Agg=doi>.
- [28] Munehiro Date, Masayuki Kutani a Shigeru Sakai. „Electrically controlled elasticity utilizing piezoelectric coupling“. In: *Journal of Applied Physics* 87.2 (2000), s. 863–868. DOI: [10.1063/1.371954](https://doi.org/10.1063/1.371954).
- [29] T. Sluka, P. Mokry a H. Lissek. „A theory of sound transmission through a clamped curved piezoelectric membrane connected to a negative capacitor“. In: *International Journal of Solids and Structures* 47.17 (2010), s. 2260–2267. ISSN: 0020-7683. DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2010.04.019](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.04.019). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768310001496> (cit. 22. 02. 2013).
- [30] Tomáš Sluka a Pavel Mokrý. „Feedback control of piezoelectric actuator elastic properties in a vibration isolation system“. English. In: *Ferroelectrics* 351 (2007). 8th European Conference on Applications of Polar Dielectrics (ECAPD-8), Metz, FRANCE, SEP 05-08, 2006, s. 51–61. ISSN: 0015-0193. DOI: [10.1080/00150190701353051](https://doi.org/10.1080/00150190701353051).
- [31] Douglas K. Lindner a Sriram Chandrasekaran. „Power system design issues for smart materials“. In: *Proc. SPIE 3668, Smart Structures and Materials 1999: Smart Structures and Integrated Systems*. Ed. Norman M. Wereley. Newport Beach, CA, USA, červ. 1999, s. 805–813. DOI: [10.1117/12.350756](https://doi.org/10.1117/12.350756). URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=982192> (cit. 10. 06. 2014).
- [32] A. J. Fleming a S. O. R. Moheimani. „Power harvesting piezoelectric shunt damping“. In: *Proc. IFAC Symposium on Mechatronic Systems*. Berkeley, CA, pros. 2002. URL: <http://www.precisionmechatronicslab.com/wp-content/publications/C02d.pdf>.
- [33] Pavel Mokry. „100 years of piezoelectric materials in acoustics: From a sonar to active metasurfaces“. In: *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics*. Buenos Aires: Asociación de Acústicos Argentinos, zář. 2016, ICA2016–535. ISBN: 978-987-24713-6-1. URL: [http://ica2016.org.ar/website/wp-content/uploads/ICA2016\\_Proceedings.pdf](http://ica2016.org.ar/website/wp-content/uploads/ICA2016_Proceedings.pdf).
- [34] P. Mokrý et al. „Noise suppression in curved glass shells using macro-fiber-composite actuators studied by the means of digital holography and acoustic measurements“. en. In: *AIP Advances* 5.2 (ún. 2015), s. 027132. ISSN: 2158-



3226. DOI: [10.1063/1.4913624](https://doi.org/10.1063/1.4913624). URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/adva/5/2/10.1063/1.4913624> (cit. 14. 03. 2015).
- [35] Werner S. Weiglhofer a A. Lakhtakia, ed. *Introduction to complex mediums for optics and electromagnetics*. Bellingham, Wash: SPIE Optical Engineering Press, 2003. ISBN: 978-0-8194-4947-4.
- [36] Christopher C. Fuller, Sharon Elliott a P. A. Nelson. *Active control of vibration*. en. Academic Press, ún. 1996. ISBN: 978-0-08-052591-4.
- [37] A. Jakob a M. Moser. „Active control of double-glazed windows. Part II: Feedback control“. In: *Applied Acoustics* 64.2 (ún. 2003), s. 183–196. ISSN: 0003-682X. DOI: [10.1016/S0003-682X\(02\)00071-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(02)00071-3).
- [38] D. Russell Luke, James V. Burke a Richard G. Lyon. „Optical Wavefront Reconstruction: Theory and Numerical Methods“. en. In: *SIAM Review* 44.2 (led. 2002), s. 169–224. ISSN: 0036-1445, 1095-7200. DOI: [10.1137/S003614450139075](https://doi.org/10.1137/S003614450139075). URL: <http://epubs.siam.org/doi/10.1137/S003614450139075> (cit. 06. 04. 2021).
- [39] E Fukada et al. „Elasticity control of curved piezoelectric polymer films“. en. In: *Ferroelectrics* 320.1 (2005), s. 471–481. ISSN: 0015-0193. DOI: [10.1080/00150190590966720](https://doi.org/10.1080/00150190590966720). URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00150190590966720>.
- [40] Herve Lissek, Xavier Meynial a C. Guigou-Carter. „Development of active materials with adaptive acoustic impedance“. In: ed. Brian Culshaw. Břez. 2003, s. 89–94. DOI: [10.1117/12.508676](https://doi.org/10.1117/12.508676). URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=892342> (cit. 25. 03. 2015).
- [41] J. P. Carneal a C. R. Fuller. „An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems“. In: *Journal Of Sound And Vibration* 272.3-5 (květ. 2004), s. 749–771. ISSN: 0022-460X. DOI: [10.1016/S0022-460X\(03\)00418-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00418-8).
- [42] G. J. Swanson. *Binary Optics Technology: The Theory and Design of Multi-Level Diffractive Optical Elements*: en. Tech. zpr. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, srp. 1989. DOI: [10.21236/ADA213404](https://doi.org/10.21236/ADA213404). URL: <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA213404> (cit. 02. 04. 2021).
- [43] Hidekazu Kodama et al. „A study of sound shielding control of curved piezoelectric sheets connected to negative capacitance circuits“. English. In: *Journal of Sound and Vibration* 311.3-5 (dub. 2008), s. 898–911. ISSN: 0022-460X. DOI: [10.1016/j.jsv.2007.09.035](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.09.035). URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X07007857>.
- [44] Benjamin S Beck, Kenneth A Cunefare a Manuel Collet. „The power output and efficiency of a negative capacitance shunt for vibration control of a flexural system“. In: *Smart Materials and Structures* 22.6 (červ. 2013), s. 065009. ISSN: 0964-1726, 1361-665X. DOI: [10.1088/0964-1726/22/6/065009](https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/6/065009). URL: <http://stacks.iop.org/0964-1726/22/i=6/a=065009?key=crossref.a1a328bcd3fcc03ae44f969663c366d4> (cit. 20. 07. 2013).

- [45] Bogdan-Ioan Popa, Lucian Zigoneanu a Steven A. Cummer. „Tunable active acoustic metamaterials“. en. In: *Physical Review B* 88.2 (čvc 2013). WOS:000321856400002, s. 024303. ISSN: 1098-0121. DOI: [10.1103/PhysRevB.88.024303](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.024303). URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.88.024303>.
- [46] Y. Y. Li a L. Cheng. „Active noise control of a mechanically linked double panel system coupled with an acoustic enclosure“. In: *Journal of Sound and Vibration, Short Communication* 297 (2006), s. 1068–1074.
- [47] Wael Akl a Amr Baz. „Multi-cell active acoustic metamaterial with programmable bulk modulus“. en. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 21.5 (břez. 2010). WOS:000275169600005, s. 541–556. ISSN: 1045-389X. DOI: [10.1177/1045389X09359434](https://doi.org/10.1177/1045389X09359434). URL: <http://jim.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1045389X09359434>.
- [48] P. Psota et al. „Measurement of piezoelectric transformer vibrations by digital holography“. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 59.9 (zář. 2012), s. 1962–1968. ISSN: 0885-3010. DOI: [10.1109/TUFFFC.2012.2414](https://doi.org/10.1109/TUFFFC.2012.2414). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6306016> (cit. 03. 12. 2013).
- [49] A. Jakob a M. Moser. „Active control of double-glazed windows. Part I: Feedforward control“. In: *Applied Acoustics* 64.2 (ún. 2003), s. 163–182. ISSN: 0003-682X. DOI: [10.1016/S0003-682X\(02\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(02)00070-1).
- [50] Jan Vaclavik a Pavel Mokry. „Measurement of mechanical and electrical energy flows in the semiactive piezoelectric shunt damping system“. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 23.5 (břez. 2012), s. 527–533. ISSN: 1045-389X. DOI: [10.1177/1045389X12436730](https://doi.org/10.1177/1045389X12436730). URL: <http://jim.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1045389X12436730>.
- [51] R. A. Shelby. „Experimental Verification of a Negative Index of Refraction“. In: *Science* 292.5514 (dub. 2001), s. 77–79. ISSN: 00368075, 10959203. DOI: [10.1126/science.1058847](https://doi.org/10.1126/science.1058847). URL: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1058847> (cit. 26. 09. 2017).
- [52] Ping Sheng. „Metamaterials acoustic lenses to shout about“. In: *Nature Materials* 8.12 (pros. 2009). WOS:000272066800007, s. 928–929. ISSN: 1476-1122. DOI: [10.1038/nmat2573](https://doi.org/10.1038/nmat2573).

## A Seznam publikací

### A.1 Publikace autora spadající do tématu disertační práce

#### Články v časopisech s IF

1. J. Nečásek, J. Václavík, and P. Marton. Digital synthetic impedance for application in vibration damping. *Review of Scientific Instruments*, 87(2), 2016. doi: 10.1063/1.4942085.
2. P. Psota, V. Lédl, R. Doleček, P. Mokrý, P. Vojtíšek, and J. Václavík. Comprehensive time average digital holographic vibrometry. *Optical Engineering*, 55(12), 2016. doi: 10.1117/1.OE.55.12.121726.
3. P. Mokrý, P. Psota, K. Steiger, J. Václavík, R. Doleček, V. Lédl, and M. Šulc. Noise suppression in curved glass shells using macro-fiber-composite actuators studied by the means of digital holography and acoustic measurements. *AIP Advances*, 5(2), 2015. doi: 10.1063/1.4913624.
4. M. Kodejška, P. Mokry, V. Linhart, J. Vaclavik, and T. Sluka. Erratum: Adaptive vibration suppression system: An iterative control law for a piezoelectric actuator shunted by a negative capacitor (IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (2012 59 (2785-2796))). *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 61(7):1243–1244, 2014. doi: 10.1109/TUFFFC.2014.3025.
5. J. Václavík, M. Kodejška, and P. Mokrý. Wall-plug efficiency analysis of semi-active piezoelectric shunt damping systems. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 22(11):2582–2590, 2014. doi: 10.1177/1077546314548910.
6. K. Nováková, P. Mokrý, and J. Václavík. Application of piezoelectric macro-fiber-composite actuators to the suppression of noise transmission through curved glass plates. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 59(9):2004–2014, 2012. doi: 10.1109/TUFFFC.2012.2420.
7. M. Kodejška, P. Mokrý, V. Linhart, J. Václavík, and T. Sluka. Adaptive vibration suppression system: An iterative control law for a piezoelectric actuator

shunted by a negative capacitor. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 59(12):2785–2796, 2012. doi: 10.1109/TUFFC.2012.2520.

8. J. Václavík and P. Mokrý. Measurement of mechanical and electrical energy flows in the semiactive piezoelectric shunt damping system. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(5):527–533, 2012. doi: 10.1177/1045389X12436730.

## Články ve sbornících konferencí

9. J. Václavík, J. Nečásek, P. Mokrý, and K. Steiger Acoustic beam steering by means of the active acoustic metasurface with an array of piezoelectric membranes and local control of acoustic impedance. In *Proceedings 26th International Congress on Sound and Vibration 2019, ICSV 2019: Montréal*, 2019. ISSN 2329-3675.
10. J. Václavík, J. Nečásek, P. Mokrý, and K. Steiger Active acoustic metasurface with an array of piezoelectric membranes and local control of acoustic impedance. In *Proceedings 25th International Congress on Sound and Vibration 2018, ICSV 2018: Hiroshima Calling*, 2018. ISSN 2329-3675.
11. P. Mokrý, J. Václavík, J. Nečásek, P. Psota, K. Steiger, and D. Vápenka. Adaptive acoustic metasurfaces for the noise shielding. In *24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017*, 2017.
12. J. Nečásek, J. Václavík, and P. Marton. Comparison of analog front-ends for digital synthetic impedance device. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics, ECMSM 2017*, 2017. doi: 10.1109/ECMSM.2017.7945916.
13. J. Nečásek, J. Václavík, and P. Marton. Fast and portable precision impedance analyzer for application in vibration damping. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics, ECMSM 2015*, 2015. doi: 10.1109/ECMSM.2015.7208693.
14. P. Mokrý, K. Steiger, J. Václavík, P. Psota, R. Doleček, P. Márton, M. Kodejška, and M. Černík. Noise shielding using active acoustic metamaterials with electronically tunable acoustic impedance. In *INTERNOISE 2014 - 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World Through Noise Control*, 2014.
15. M. Kodejška, J. Václavík, and P. Mokrý. A system for the vibration suppression in the broad frequency range using a single piezoelectric actuator shunted by a

- negative capacitor. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, ISAF 2010, Co-located with the 10th European Conference on the Applications of Polar Dielectrics, ECAPD 2010*, 2010. doi: 10.1109/ISAF.2010.5712225.
16. V. Lédl, J. Václavík, R. Doleček, and V. Kopecký. Frequency shifted digital holography for the measurement of vibration with very small amplitudes. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1253, pages 415–419, 2010. doi: 10.1063/1.3455485.
  17. H. Lissek, R. Boulandet, M. Černík, J. Václavík, and P. Mokrý. Design of switching amplifier used in negative impedance disposal for the active control of transducer’s acoustic impedance. In *16th International Congress on Sound and Vibration 2009, ICSV 2009*, volume 3, pages 1362–1368, 2009.
  18. P. Mokrý, M. Kodejška, and J. Václavík. Recent trends in application of piezoelectric materials to vibration control. In *Recent Advances in Mechatronics 2008-2009*, pages 251–256, 2009.
  19. K. Nováková, P. Mokrý, J. Václavík, and V. Lédl. Analysis of noise transmission through the window glass plate and its control using the Macro Fiber Composite actuator. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, ISAF 2010, Co-located with the 10th European Conference on the Applications of Polar Dielectrics, ECAPD 2010*, 2010. doi: 10.1109/ISAF.2010.5712229.
  20. K. Nováková, P. Psota, R. Doleček, V. Lédl, P. Mokrý, J. Václavík, P. Márton, and M. Černík. Planar acoustic metamaterials with the active control of acoustic impedance using a piezoelectric composite actuator. In *2013 Joint IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectric and Workshop on Piezoresponse Force Microscopy, ISAF/PFM 2013*, pages 317–320, 2013. doi: 10.1109/ISAF.2013.6748720.
  21. P. Psota, V. Lédl, R. Doleček, J. Václavík, and V. Kopecký. Improved holographic method for vibration amplitude measurement from nano to micro-scale. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1600, pages 228–236, 2014. doi: 10.1063/1.4879587.
  22. P. Psota, V. Lédl, P. Vojtíšek, J. Václavík, R. Doleček, and P. Mokrý. Advanced time average holographic method for measurement in extensive vibration amplitude range with quantitative single-pixel analysis. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9508, 2015. doi: 10.1117/12.2185059.
  23. K. Steiger, P. Mokrý, J. Václavík, and M. Kodejška. Wide frequency range noise shield using curved glass plates with piezoelectric macro fiber composite actuators. In *2014 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric, International Workshop on Acoustic Transduction Materials and*

*Devices and Workshop on Piezoresponse Force Microscopy, ISAF/IWATMD/-PFM 2014*, 2014. doi: 10.1109/ISAF.2014.6923011.

24. J. Václavík, P. Mokřý, and P. Márton. Design of wall-plug efficiency optimized semi-active Piezoelectric Shunt Damping systems. In *2013 Joint IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectric and Workshop on Piezoresponse Force Microscopy, ISAF/PFM 2013*, pages 325–328, 2013. doi: 10.1109/ISAF.2013.6748748.

## A.2 Publikace autora mimo zaměření disertační práce

### Články v časopisech s IF

1. J. Hlubuček, J. Lukeš, J. Václavík, and K. Žídek Enhancement of CASSI by a zero-order image employing a single detector. *Applied Optics*, Jan. 2021 doi: 10.1364/AO.414402.
2. J. Hlubuček, J. Budasz, J. Václavík, and K. Žídek. Construction of a vacuum ultraviolet transmission spectrometer. *ACC Journal*, vol. 24, pp. 17–23, Jun. 2018. doi: 10.15240/tul/004/2018-1-002.
3. K. Žídek, J. Hlubuček, P. Horodyská, J. Budasz, and J. Václavík. Analysis of sub-bandgap losses in TiO<sub>2</sub> coating deposited via single and dual ion beam deposition. *Thin Solid Films*, 626:60–65, 2017. doi: 10.1016/j.tsf.2017.02.036.
4. R. Doleček, P. Psota, V. Lédl, T. Vít, J. Václavík, and V. Kopecký. General temperature field measurement by digital holography. *Applied Optics*, 52(1): A319–A325, 2013. doi: 10.1364/AO.52.00A319.
5. P. Mokřý, P. Psota, K. Steiger, J. Václavík, R. Doleček, D. Vápenka, and V. Lédl. Ferroelectric domain pattern in barium titanate single crystals studied by means of digital holographic microscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(25), 2016. doi: 10.1088/0022-3727/49/25/255307.
6. J. Václavík and M. Novák. Current oscillations in lighting systems with discharge lamps. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(17):3237–3241, 2005. doi: 10.1088/0022-3727/38/17/S27.
7. T. Vít, R. Melich, J. Václavík, and V. Lédl. Design of precise lightweight mirror. *Applied Mechanics and Materials*, 284-287:2717–2722, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.2717.

## Články ve sbornících konferencí

8. J. Václavík, M. Veselý, and R. Doleček. Optical design of the RODES hyperspectral LWIR imager. In *Proc. SPIE 11385, Optics and Measurement International Conference 2019*, 113850L (30 December 2019) doi: 10.1117/12.2547353.
9. J. Budasz, J. Hutka, and J. Václavík. Optical properties of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  deposited by IBAD and its usage in interference filters. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9442, 2015. doi: 10.1117/12.2176920.
10. J. Budasz, J. Hutka, and J. Václavík. Losses in  $\text{Ti}_2\text{SiO}_2$  multilayer coatings. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10151, 2016a. doi: 10.1117/12.2257232.
11. J. Budasz, J. Junek, and J. Václavík. Broadband antireflective coating for NEOSTED. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10151, 2016b. doi: 10.1117/12.2257233.
12. K. Žídek and J. Václavík. Imaging in laser spectroscopy by a single-pixel camera based on speckle patterns. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10151, 2016. doi: 10.1117/12.2256988.
13. K. Žídek, O. Denk, J. Hlubuček, and J. Václavík. Compact and robust hyperspectral camera based on compressed sensing. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10151, 2016. doi: 10.1117/12.2250268.
14. J. Hlubuček, D. Vápenka, P. Horodyska, and J. Václavík. Control of chemical composition of PZT thin films produced by ionbeam deposition from a multicomponent target. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10151, 2016. doi: 10.1117/12.2257331.
15. P. Horodyska, J. Hlubuček, K. Žídek, and J. Václavík. Influence of oxygen on the quality of the PZT thin films prepared by IBS. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10151, 2016. doi: 10.1117/12.2257224.
16. R. Melich, P. Psota, V. Léd, and J. Václavík. Irregular surfaces - Measurements and ZEMAX simulations. In *EPJ Web of Conferences*, volume 48, 2013. doi: 10.1051/epjconf/20134800015.
17. P. Mokřý, P. Psota, K. Steiger, J. Václavík, D. Vápenka, R. Doleček, P. Vojtíšek, J. Sládek, and V. Lédl. Digital holographic tomography method for 3d observation of domain patterns in ferroelectric single crystals. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10151, 2016. doi: 10.1117/12.2257327.

18. P. Oupický, D. Jareš, J. Václavík, and D. Vápenka. Photonometers for coating and sputtering machines. In *EPJ Web of Conferences*, volume 48, 2013. doi: 10.1051/epjconf/20134800018.
19. T. Thoř and J. Václavík. Sol-gel preparation of silica and titania thin films. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 10151, 2016. doi: 10.1117/12.2257325.
20. J. Václavík, R. Doleček, V. Lédl, and P. Psota. Experimental study on SPDT machining of Gallium Phosphide. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 8884, 2013. doi: 10.1117/12.2036139.
21. J. Václavík and M. Novák. Current oscillations in lighting systems with discharge lamps. In *Institute of Physics Conference Series*, volume 182, pages 623–624, 2004.
22. J. Václavík and D. Vápenka. Gallium Phosphide as a material for visible and infrared optics. In *EPJ Web of Conferences*, volume 48, 2013. doi: 10.1051/epjconf/20134800028.
23. J. Václavík, M. Novák, A. Richter, and G. Zisis. Aspects of energy consumption in large lighting systems. In *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, volume 2, pages 1373–1378, 2004. doi: 10.1109/IAS.2004.1348591.
24. J. Václavík, R. Melich, P. Pintr, and J. Pleštil. High-throughput optical system for HDES hyperspectral imager. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9442, 2015. doi: 10.1117/12.2175935.
25. P. Vojtíšek, M. Possolt, R. Doleček, K. Steiger, P. Pintr, and J. Václavík. Design and fabrication of diffraction grating for application in hyperspectral imaging for the long-wavelength infrared spectral region. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 9442, 2015. doi: 10.1117/12.2175916.
26. D. Vápenka, J. Václavík, and P. Mokrý. Design and fabrication of anti-reflection coating on Gallium Phosphide, Zinc Selenide and Zinc Sulfide substrates for visible and infrared application. In *EPJ Web of Conferences*, volume 48, 2013. doi: 10.1051/epjconf/20134800029.