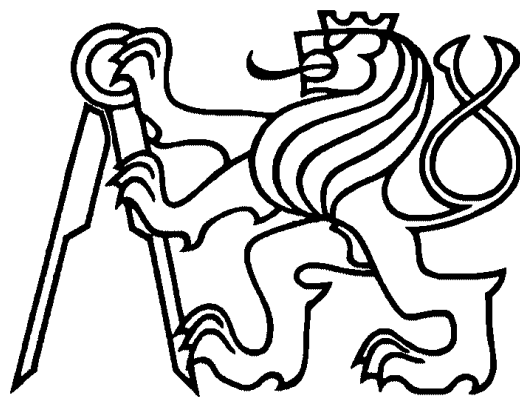


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra fyziky



Diplomová práce

**Měření vlastností piezoelektrického měniče
pro aktivní snižování hluku**

2014

Bc. Václav Pospíchal



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student:	Bc. Václav Pospíchal
Studijní program:	Inteligentní budovy
Název tématu česky:	Měření vlastností piezoelektrického měniče pro aktivní snižování hluku
Název tématu anglicky:	Measurement of Characteristics of Piezoelectric Actuator for Active Noise Control

Pokyny pro vypracování:

Na vybrané konstrukci (např. vetknutém nosníku) prostudujte vlastnosti kombinovaného měniče sestávajícího z piezoelektrických bimorfů z hlediska jeho využití v systémech aktivního snižování vyzářování zvuku. Provedte analýzu vlastních kmitů dané konstrukce. Na vybraném módu konstrukce se zaměřte na účinnost měniče v jeho silové a momentové konfiguraci a prostudujte možnosti využití měniče pracujícího v kombinovaném silovo-momentovém režimu. Předpokládejte aktivní systém koncipovaný pro snížení hladiny akustického tlaku ve vybraném místě prostoru při buzení dané konstrukce čistými tóny.

Seznam odborné literatury:

- [1] Fuller, C. R., Elliot, S. J., Nelson P.A.: Active Control of Vibration. Academic Press, London 1997.
- [2] Merhaut, J.: Teoretické základy elektroakustiky. Academia, Praha 1976.
- [3] Škvor, Z.: Akustika a elektroakustika. Academia, Praha 2001.

Vedoucí diplomové práce:	Ing. Vojtěch Jandák, Ph.D. (K 13102)
Datum zadání diplomové práce:	11. září 2014
Platnost zadání do ¹ :	29. ledna 2016

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 9. 2014

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Anotace

Práce se zabývá možnostmi využití dvoukanálového kombinovaného měniče v systémech aktivního snižování vyzařování zvuku na vybrané konstrukci za účelem snížení hladiny akustického tlaku ve vybraném místě prostoru. V první části je popsána konstrukce vyvinutého kombinovaného měniče sestávajícího z piezoelektrických bimorfů a metodika jeho testování. Další část se zabývá simulacemi chování sestavy a vlivu polohy umístění měniče na dosažený útlum akustického tlaku. Následně je provedena analýza vlastních kmitů dané konstrukce a měření účinnosti měniče v jeho silové a momentové konfiguraci na vybraném módu kmitání konstrukce. V závěru práce jsou shrnuty možnosti využití měniče v obecném silovo-momentovém režimu.

Annotation

The thesis deals with the possibilities of using up a two-channel combined actuator in active structural acoustic control system in a selected spot in the area within a chosen construction for the purpose to decrease sound pressure level in a selected side area. The first part describes the construction of a developed combined actuator consisting of piezoelectric bimorphs and the methodology of its testing. Next, the thesis focuses on the simulation of behaviour of the configuration and the effect of the actuator position on the achieved acoustic sound pressure attenuation. Consequently, the analysis of oscillations of the construction itself has been carried out as well as the measurement of the effectiveness of the actuator in its force and moment configuration on a selected mode of the construction oscillation. Finally, the thesis summarises the possibilities of using up of the actuator in the general force-moment configuration.

Klíčová slova

Piezoelektrický měnič, aktivní snižování hluku, akustika

Key words

Piezoelectric actuator, active noise control, acoustics

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vojtěchu Jandákovi, Ph.D. za odbornou pomoc při měření a cenné rady při konzultacích.

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Jandáka, Ph.D. a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 1.1.2015

.....

Václav Pospíchal

Obsah

1	Úvod	6
2	Obecné základy	8
2.1	Hluk	8
2.2	Neprůzvučnost	9
2.3	Metody aktivního snižování hluku.....	10
3	Měniče pro ASAC	14
3.1	Piezoelektrické materiály	14
3.2	Piezoelektrický bimorf.....	15
3.3	Kombinovaný dvoukanálový měnič	17
4	Metodika testování měniče	19
4.1	Popis metodiky.....	19
4.2	Simulace vlivu exponenciálního průměrování.....	21
4.3	Kontrolní měření vlivu exponenciálního filtru na změřený průběh.....	23
5	Teoretický rozbor úlohy	24
5.1	Volné kmity vetknutého pásku.....	24
5.2	Vyjádření budicích funkcí.....	26
5.3	Vyzařování zvuku.....	27
5.4	Simulace ASAC	27
6	Měření vlastností primárního zdroje.....	31
6.1	Primární zdroj	31
6.2	Měření volných kmitů vetknutého pásku akcelerometrem.....	31
6.3	Měření nucených kmitů primárního zdroje laserovým vibrometrem ...	33
6.4	Vliv měniče na vlastnosti pásku	36
7	Měření vlastností kombinovaného měniče	39
7.1	Měření vlastností systému v závislosti na umístění měniče	39
7.2	Základní nastavení úrovní.....	45
7.3	Nalezení optimálního fázového posuvu sekundárního signálu vůči primárnímu zdroji.....	46
7.4	Nalezení optimálních úrovní	47

7.5	Výsledky pro všechny polohy	48
8	Měření obecných silovo-momentových konfigurací	50
8.1	Poloha 8 (uzel).....	51
8.2	Poloha 5 (kmitna)	51
8.3	Poloha 19 (krajní poloha - uzel).....	51
9	Závěr	56
10	Literatura	57

1 Úvod

S rozvojem společnosti jsou nároky na zajištění akustického komfortu uvnitř staveb stále náročnější. S nárůstem hluku ve vnějším prostředí zejména od automobilové dopravy a zvyšujícími se nároky uživatelů budov jsou požadavky na neprůzvučnost konstrukcí stále větší.

V současné době existují dva principiálně odlišné přístupy k potlačování přenosu hluku - pasivní a aktivní.

Pasivní přístup k tlumení přenosu hluku je založen na použití zvukových bariér z hutných materiálů (např. cihly, beton), porézních zvukově absorpčních materiálů (např. skelná vata, objemové netkané textilie, polyuretanová pěna). Výhodou pasivního přístupu je poměrně nízká cena a dostupnost zvukově izolačních materiálů, nevýhodou je malá účinnost zejména v oblasti nízkých frekvencí a fakt, že dostatečné odhlučnění vyžaduje použití poměrně velkých objemů zvukově izolačního materiálu, což ve výsledku zvyšuje cenu a zejména hmotnost systému. Kvalitní odhlučnění pasivními materiály je proto problematické například u dopravních prostředků a zejména u letadel, kde je celková hmotnost stěžejní.

Druhou možností je použití aktivních metod. Všechny aktivní metody jsou založeny na stejném principu. Interferencí signálu z primárního zdroje (zdroj signálu, který chceme potlačit) a sekundárního signálu (signál, kterým chceme potlačovat) dojde k jejich vzájemnému vyrušení. Největší výhodou aktivních systémů je, že jsou schopny pracovat na nízkých frekvencích, nejsou prostorově náročné a nezvyšují příliš hmotnost konstrukcí. Proto by bylo možné jejich použití pro konstrukce s lehkým obvodovým pláštěm. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, existence provozních nákladů a nutná pravidelná údržba.

Práce se zabývá měřením vlastností piezoelektrického měniče pro aktivní snižování hluku. Nejdříve je čtenář seznámen se základními definicemi pojmů, které se v této práci vyskytují. Dále je popsán touto prací používaný princip aktivní metody snižování hluku. Následuje podrobný popis konstrukce vyvinutého kombinovaného (dvoukanálového) měniče. Další kapitola se věnuje návrhu metodiky testování měniče, ve které je popsán princip metodiky, a jsou zde navrženy parametry pro měření, které jsou ověřeny simulacemi. Poté je uveden teoretický rozbor úlohy, ve kterém jsou uvedeny rovnice popisující modelový nosník. Na základě těchto rovnic jsou provedeny simulace chování systému aktivního snižování hluku. V následující kapitole jsou nejprve popsána měření

vlastností primárního zdroje a výsledky jsou porovnány s výsledky simulací. Na závěr jsou uvedena měření vlastností piezoelektrického měniče v závislosti na jeho umístění a měření s měničem v obecných silovo-momentových konfiguracích.

2 Obecné základy

Akustika se zabývá vznikem, šířením a vnímáním zvuku lidským sluchem, a je jedním z nejstarších oborů fyziky. Podle toho, čím se zabývá, ji lze dělit na následující oblasti.

- **Fyzikální akustika** se zabývá vznikem a šířením zvuku.
- **Hudební akustika** zkoumá hudební nástroje a umělecké parametry zvuku.
- **Fyziologická akustika** se zabývá vnímáním zvuku sluchovým orgánem a jeho tvorbou v hlasovém ústrojí.
- **Stavební akustika** je spjata s šířením zvuku do a uvnitř prostor. Její součástí jsou hlavně stavební neprůzvučnosti.
- **Prostorová akustika** se zabývá kvalitou poslechu hudby nebo srozumitelností řeči.
- **Elektroakustika** se věnuje záznamu, reprodukci pomocí elektroakustických měničů a šíření zvuku za pomoci elektrického proudu.
- **Psychoakustika** zkoumá subjektivní lidské vnímání zvuku.

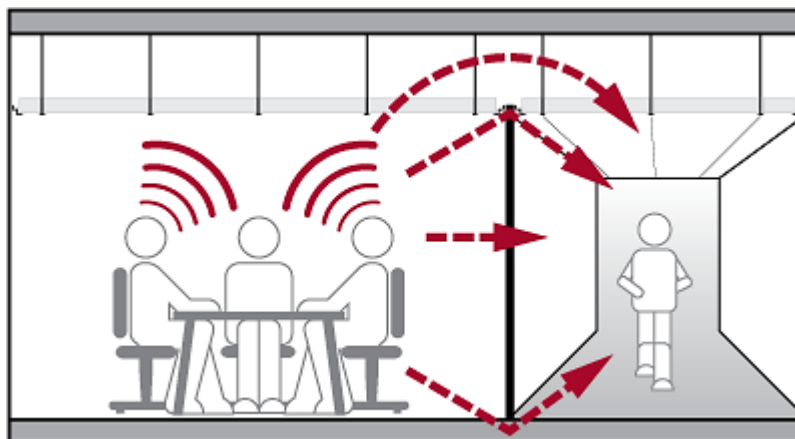
2.1 Hluk

Jako hluk vnímá člověk každý nežádoucí nebo nepříjemný zvuk. Definice hluku je však velmi subjektivní. Co jeden člověk vnímá jako hluk, může být vnímáno jiným jako libozvučné. Je prokázáno, že nadměrná expozice hluku v extrémních případech vede k trvalému poškození sluchu. Nadměrný hluk je tedy nutné potlačit. Metody snižování hluku lze podle principu rozdělit obdobně jako v [1] na několik základních způsobů.

- **Redukce hluku ve zdroji** je založena na snížení hlučnosti nebo úplném odstranění zdroje hluku.
- **Dispozice** spočívá ve vhodném výběru umístění zdroje hluku tak, aby v místě pobytu osob byl jeho vliv co nejmenší. Například letiště mimo zastavěnou oblast nebo stroje v dobře akusticky odizolované místnosti.
- **Izolace (zakrytí)** zdroje hluku akustickou izolací od chráněného prostoru použitím příček, vík atd.
- **Aplikace prostorové akustiky** používá pohltivost hmot a konstrukcí v určitých prostorech pro snižování hluku v poli odražených vln.
- **Použití osobních ochranných pomůcek** je nejméně vhodné a používá se až v případech, kdy nelze potlačení dosáhnout pomocí ostatních metod.

2.2 Neprůzvučnost

Stavební neprůzvučnost je a musí být součástí návrhu každé budovy. Obecně je definována jako rozdíl akustických intenzit způsobený pohlcením akustického výkonu v překážce. Měří se jako rozdíl hladin akustických tlaků v prostoru se zdrojem zvuku a v chráněném prostoru za akustickou překážkou (příčkou, zdí, oknem). Podrobným popisem metod pro měření různých stavebních neprůzvučností se zabývá norma „ČSN EN ISO 140 Měření zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách [2].“



Obrázek 2.1 Stavební neprůzvučnost [3]

Neprůzvučnost R je definována pomocí dopadajícího akustického výkonu W_1 na zkoušený dělicí prvek a akustického výkonu W_2 přeneseného zkoušeným vzorkem pomocí vzorce:

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \text{ [dB]} \quad (2.1)$$

V budovách ovšem nedochází k šíření zvuku pouze jednou stěnou, ale i stěnami ostatními, stropem a podlahou, jak je znázorněno na obrázku 2.1. Dalším důležitým faktorem je vliv parametrů místnosti. Rovněž je měření dopadajícího a vyzařujícího výkonu na místě stavby téměř neproveditelné. Proto se přímo neměří výše definovaná neprůzvučnost, ale parametr nazývaný se stavební neprůzvučnost z rozdílu hladin akustických tlaků a s přihlédnutím k parametrům měřené místnosti dle vzorce:

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) + K \text{ [dB]} , \quad (2.2)$$

kde L_{p1} a L_{p2} jsou průměrné hladiny akustického tlaku ve vyzařovací (L_{p1}) a přijímací (L_{p2}) místnosti, K je korekční součinitel, který nabývá hodnot -3 dB pro měření dopravního hluku s mikrofonem umístěným venku a 0 dB pro měření mezi místnostmi

v difuzním poli odražených vln, S je plocha stěny/prvku jehož neprůzvučnost měříme a A je ekvivalentní plocha pohlcování v přijímací místnosti, kterou určíme ze vztahu

$$A = \frac{0,16V}{T}, \quad (2.3)$$

kde V je objem přijímací místnosti a T je doba dozvuku přijímací místnosti. Hladina akustického tlaku je definována vztahem

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ [dB]}, \quad (2.4)$$

kde p je akustický tlak a $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa je referenční hodnota akustického tlaku.

2.3 Metody aktivního snižování hluku

V současné době se využívá metod aktivního snižování hluku hlavně v oblasti letecké dopravy za účelem ochrany sluchu. Zejména v letecké dopravě je potřebná hmotnost pro zvýšení neprůzvučnosti nemyslitelná. Aktivní systémy se používají nejen ke snižování hluku v prostoru pro cestující, ale například i ke snižování vibrací listů rotoru helikoptér. Hlavní využití mají aktivní systémy tam, kde je zdroj hluku predikovatelný a má harmonický charakter. Např. u hluku z vrtulí se dá hluk předpovídat v závislosti na otáčkách motoru. Vývojem systému na aktivní tlumení hluku v leteckém průmyslu se zabývají například James P. Carneal a Chris R. Fuller [4], kteří simulovali konstrukci trupu letadla pomocí sendvičového panelu, na němž byly připevněny piezoelektrické aktuátory zvyšující neprůzvučnost systému.

Aktivní systémy se dnes již běžně uplatňují také u luxusních automobilů a s postupnou modernizací technologií je jen otázkou času, kdy to bude běžné i pro nižší třídy. Použití aktivních systému má navíc u automobilů výhodu, že když chce majitel slyšet zvuk svého výkonného motoru, za spoustu peněz, stačí jednoduše aktivní systém vypnout. Dokonce je i možné pomocí aktivního systému zvuk motoru doplnit.

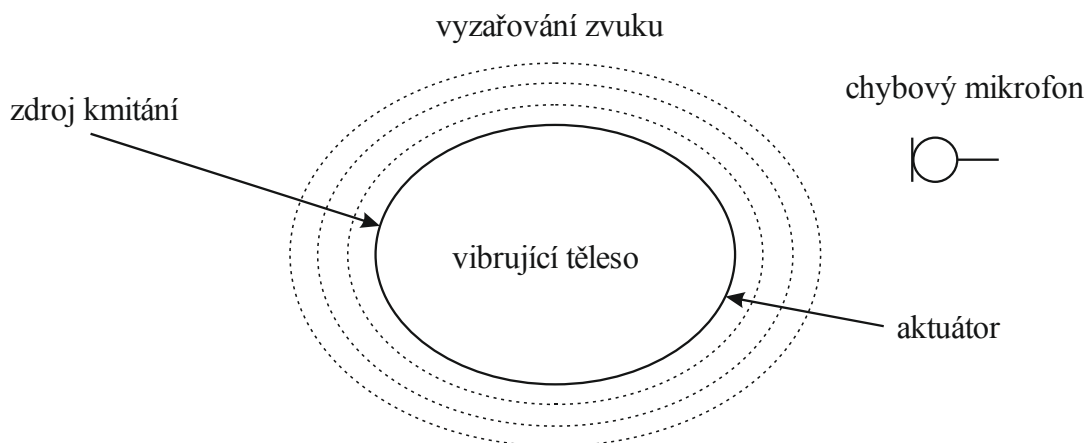
Dalším příkladem civilního použití jsou například sluchátka s aktivním snižováním okolního hluku. Díky stále se zlevňujícím a zdokonalujícím se technologiím jsou tato sluchátka vybavena výkonným digitálním procesorem, který zpracovává signály pro tlumení hluku, přičemž na napájení takového systému postačují obyčejné AAA baterie, což bylo dříve nemyslitelné.

Otázkou budoucnosti je využití aktivního tlumení u lehkých obvodových plášťů budov. Zejména u výškových budov je hmotnost důležitý parametr a aktivní tlumení v oblasti nízkých frekvencí nabízí oproti pasivním metodám nesrovnatelně lehčí řešení.

Nevýhodou je však nutnost neustálého napájení systému a to, že v současné době používané měniče tzv. piezo stacky potřebují napájení o napětí řádově stovek voltů. Takto vysoké napětí je však velmi nebezpečné a představa jeho používání na kovovém plášti budovy je takřka nemyslitelná. Proto jsou vyvíjeny měniče, které využívají například piezoelektrické bimorfy pracující s bezpečným napětím řádově desítky voltů. Vývoj a zkoumání možností takového měniče je cílem této práce, a bude podrobněji popsán v následující kapitole.

Metody aktivního snižování hluku lze dle [5] rozlišovat podle toho, na jakém principu pracují.

- Metoda ovlivňující zvukové pole – ANC (Active Noise Control).
- Metoda ovlivňující vibrace struktur – AVC (Active Vibration Control), to může vést i ke zvýšení vyzařovaného zvuku.
- Metoda snižující množství vyzářené energie vibrující strukturou – ASAC (Active Structural Acoustic Control), metoda použitá v této práci

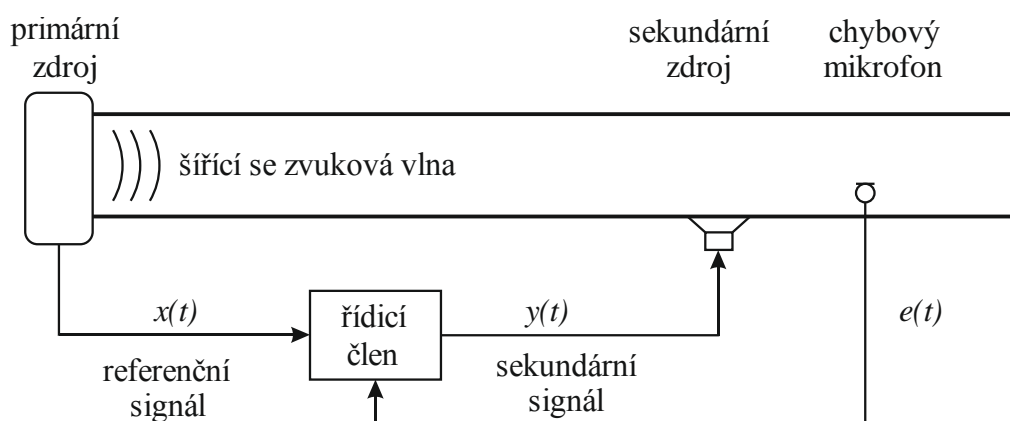


Obrázek 2.2 Obecné schéma metody ASAC [6]

Metoda ASAC je znázorněna na obrázku 2.2. Těleso buzené dopadajícím zvukem, nebo nějakým mechanickým způsobem se nazývá primární zdroj. Na obrázku jej představuje vibrující těleso. Pomocí sekundárního zdroje se ovlivňuje primární zdroj tak, aby vyzařoval co nejméně zvuku. Nemusí se ovlivňovat vibrace, obecně se může ovlivňovat i blízké pole a objemová rychlost. Řídicí jednotka, ve které jsou implementovány adaptivní algoritmy, má za úkol na základě vstupních signálů a parametrů generovat signál pro sekundární zdroj tak, aby docházelo k co největšímu snížení vyzářené akustické výkonu nebo hladiny akustického tlaku v určitém místě. K tomuto účelu slouží jednotce chybový signál získaný například z chybového mikrofonu, kterým se

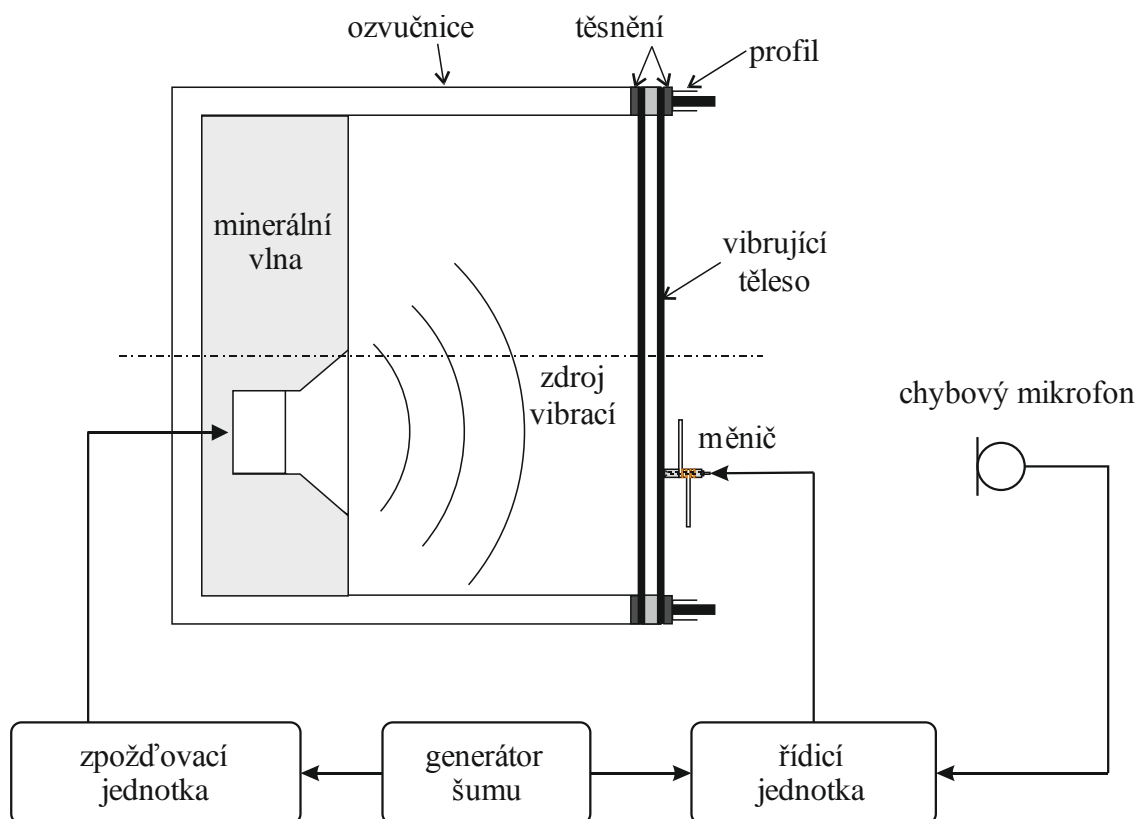
kontroluje, jak se daří snižovat hluk. Systém může obsahovat více chybových mikrofonů a více aktuátorů, zvyšují se tím ale nároky na řídicí jednotku. Vytvořit vhodný signál pro sekundární zdroj je velmi složité, protože řídicí jednotka musí predikovat, jak bude vypadat primární vlna v místě interference. Pro harmonické signály je realizace jednoduchá. Stačí, aby sekundární vlna měla stejnou amplitudu a v určitém bodě systému opačnou fázi než vlna od primárního zdroje a vzájemnou interferencí se vlny vyruší. V praxi je však potřeba potlačovat i neharmonické signály, např. úzkopásmové nebo širokopásmové šумы, kde je již vytvoření sekundárního signálu složitější. Aktivní metody se používají hlavně pro nízké frekvence, kde by bylo pasivní tlumení příliš náročné. Tyto metody se staly uskutečnitelné až s postupným rozvojem výpočetní techniky, kdy se začaly vyrábět dostatečně rychlé signálové procesory DSP. Metody se liší různými principy, zapojeními a řídicími jednotkami.

Aktivní metody je možné klasifikovat také podle zapojení na Feedback a Feedforward, který je používán v této práci. Feedforward je schematicky znázorněn na obrázku 2.3. Referenční signál je signál odvozený od primárního zdroje. Kdyby byl primární zdroj reproduktor, jako referenční signál by se použilo například napětí na svorkách reproduktoru.



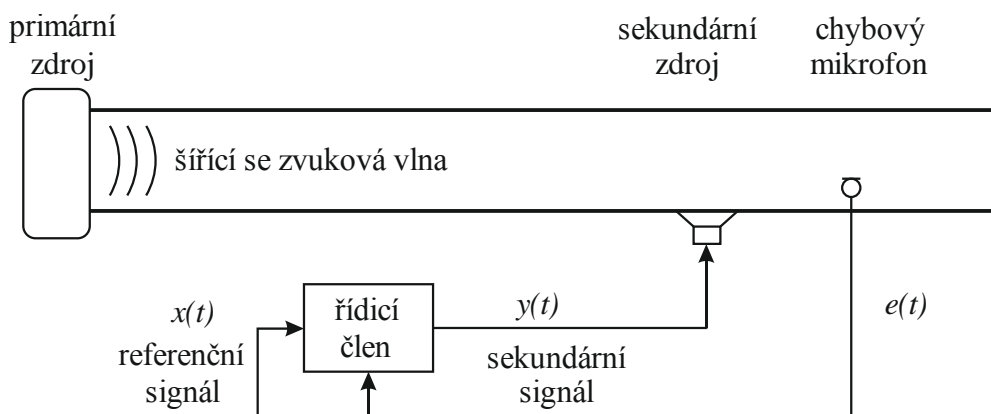
Obrázek 2.3 Schéma jednokanálového Feedforward [7]

Konkrétní zapojení systému pro aktivní snižování vyzářeného hluku je na obrázku 2.4, kde jako primární zdroj byla zvolena sendvičová struktura, představující například okno s dvojitými skly, složená z dvou plechových desek, která byla buzena akustickým tlakem vyvolaným reproduktorem uvnitř konstrukce ozvučnice. V projektu 1 [8] byly pomocí aktivního systému se zapojením Feedforward experimentálně testovány vlastnosti aktivního systému v různých konfiguracích s cílem vytvořit zónu ticha.



Obrázek 2.4 Schéma konkrétního systému aktivního snižování vyzářeného hluku použitého v projektu 1 [8]

Feedback, zobrazený na obrázku 2.5, se používá tam, kde nejsme schopni získat referenční signál z primárního zdroje a jako zdroj referenčního signálu je použit chybový mikrofon. Feedback se používá např. pro aktivní chrániče sluchu.



Obrázek 2.5 Schéma jednocanálového Feedback [7]

3 Měníče pro ASAC

Názvem měniče rozumíme v akustice a elektroakustice zařízení, která uskutečňují přeměnu signálových veličin jednoho druhu na veličiny jiného druhu. Nejběžnější jsou měniče elektroakustické, u nichž dochází k přeměně akustického tlaku a objemové rychlosti na elektrické napětí a proud, anebo k přeměně v opačném pořadí – napětí a proudu na akustický tlak a objemovou rychlost. [9] Měníče můžeme rozdělit do dvou skupin, na měniče s magnetickým polem a měniče s elektrickým polem.

Mezi měniče s magnetickým polem patří měniče elektrodynamické, elektromagnetické a magnetostrikční. Mezi měniče s elektrickým polem patří měniče elektrostatické a piezoelektrické, mezi tyto patří také měnič použitý v této práci.

3.1 Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály jsou používány v akustice zejména jako konstrukční prvek snímačů akustických veličin a akustických vysílačů. Jsou zhotovovány ve tvaru destiček, tyčinek skořepin, v případě piezoelektrických polymerů jako membrány. [9]

Dle [9] pro vyjádření vzájemných vztahů mezi mechanickými a elektrickými fyzikálními veličinami uvažujeme jednotkový objem piezoelektrické látky, znázorněný na obrázku 3.1, na níž působí ve zvoleném směru vnější pole a vnější síly. Mezi intenzitou elektrického pole \mathbf{E} , elektrickou indukcí \mathbf{D} a polarizací \mathbf{P} platí vztah

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad (3.1)$$

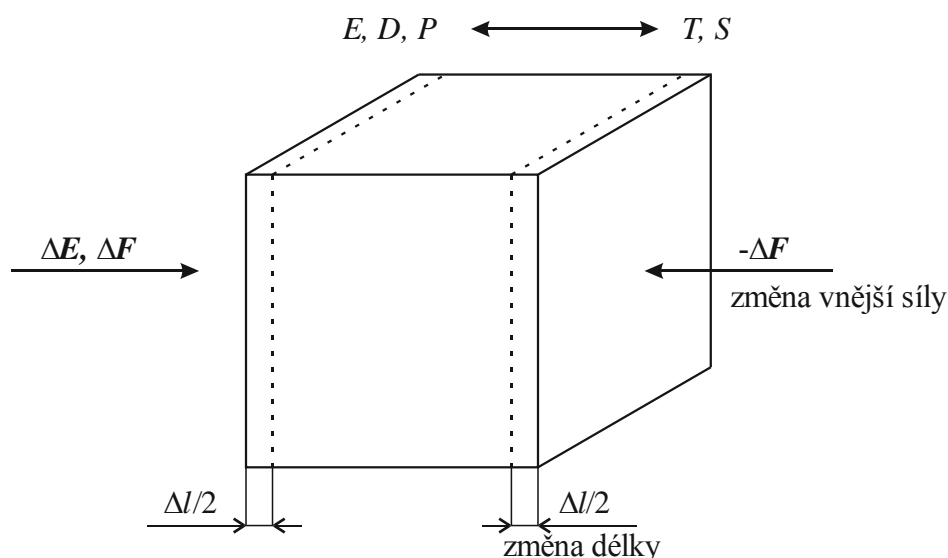
kde ε_r je relativní permitivita a $\varepsilon_0 = 8,854 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1}$. Polarizace je vyjádřena vztahem $\mathbf{P} = \varepsilon_0 \kappa \mathbf{E}$, kde $\kappa = \varepsilon_r - 1$ je susceptibilita.

Vzájemné vztahy mezi deformací S a elektrickou indukcí D pro piezoelektrické materiály jsou popsány v následujících piezoelektrických stavových rovnicích.

$$S = s^E T + dE \quad (3.2)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (3.3)$$

kde ε^T je $\varepsilon_r \varepsilon_0$ permitivita stanovená při konstantním (například nulovém) mechanickém napětí T a s^E je koeficient poddajnosti stanovený při konstantní (nulové) intenzitě elektrického pole.

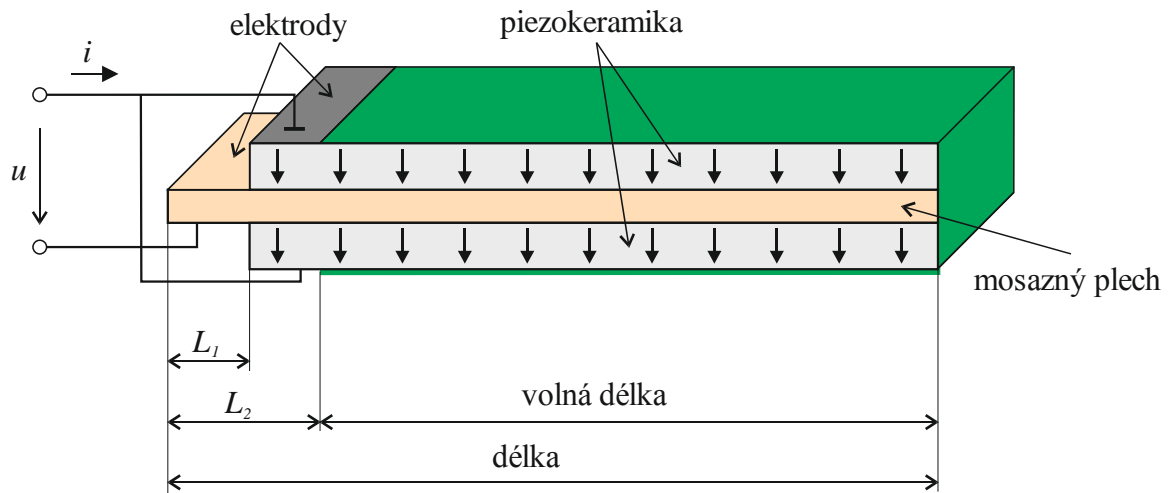


Obrázek 3.1 Piezoelektrický element ve tvaru jednotkové krychle [9]

3.2 Piezoelektrický bimorf

Základem vyvinutého měniče prezentovaného v této práci je bimorf – piezokeramické dvojče, znázorněno obrázkem 3.2, které je tvořeno ze dvou vrstev identicky polarizované piezoelektrické keramiky přilepené na tenkou kovovou fólii tvořící společnou střední elektrodu. Obě vrstvy z piezoelektrické keramiky jsou zapojeny paralelně. Při přivedení jedné polaritě napětí na tyto vrstvy a opačné polaritě napětí na středovou elektrodu, dojde na jedné straně k prodloužení a na druhé straně ke zkrácení, což způsobí ohyb celého pásku. Tyto ohybové měniče jsou obvykle na jednom konci vetknuty, nebo na obou koncích podepřeny [10]. Největší výhodou použití piezoelektrických bimorfů na rozdíl od jiných měničů je skutečnost, že pracují při nízkých (bezpečných) napětích řádově 10 - 100 V oproti piezo stackům, které pracují řádově se stovkami voltů.

Na následujícím obrázku 3.2 je znázorněn částečný řez paralelně zapojeného použitého bimorfu.



Obrázek 3.2 Částečný řez bimorfu

Konkrétní technická specifikace použitého bimorfu udávaná výrobcem [11] je shrnuta v následující tabulce.

Parametr	Hodnota
Napětí	150 V stejnosměrných
Výchylka	$\geq 2,6$ mm
Blokovací síla	$\geq 0,5$ N
Rezonanční frekvence	60 Hz
Kapacita	190 nF
Délka	$60 \pm 0,25$ mm
Šířka	$20 \pm 0,25$ mm
Tloušťka	$0,69 \pm 0,1$ mm
L_1	3,5 mm
L_2	7 mm
Volná délka	50 mm
Hmotnost	4,5 g

Tabulka 3.1 Technická specifikace bimorfu

V prvním přiblížení lze například dle [12] na jednostranně vetknutý bimorf připojený ke zdroji harmonického napětí nahlížet jako na tenký ohybově kmitající nosník zatížený silovým momentem s harmonickým průběhem, jehož výchylku lze vyjádřit následující rovnicí.

$$u(x, t) = \frac{M_0}{\rho b h l} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_n \phi_n(x)}{\omega_n^2 (1 + j\zeta) - \omega^2} \sin(\omega t), \quad (3.4)$$

kde ρ je hustota materiálu, b, h, l jsou rozměry nosníku (bimorfu), $\phi_n(x)$ jsou vlastní funkce (módy) nosníku (bimorfu) a A_n jsou konstanty odpovídající buzení a ζ jsou ztráty.

$$\phi_n(x) = [\cosh(\beta_n x) - \cos(\beta_n x)] - \frac{\cosh(\beta_n l) + \cos(\beta_n l)}{\sinh(\beta_n l) + \sin(\beta_n l)} [\sinh(\beta_n x) - \sin(\beta_n x)], \quad (3.5)$$

$$A_n = \beta_n \left\{ [\sinh(\beta_n l) + \sin(\beta_n l)] - \frac{\cosh(\beta_n l) + \cos(\beta_n l)}{\sinh(\beta_n l) + \sin(\beta_n l)} [\cosh(\beta_n l) - \cos(\beta_n l)] \right\}, \quad (3.6)$$

a koeficienty β_n jsou získány řešením rovnice

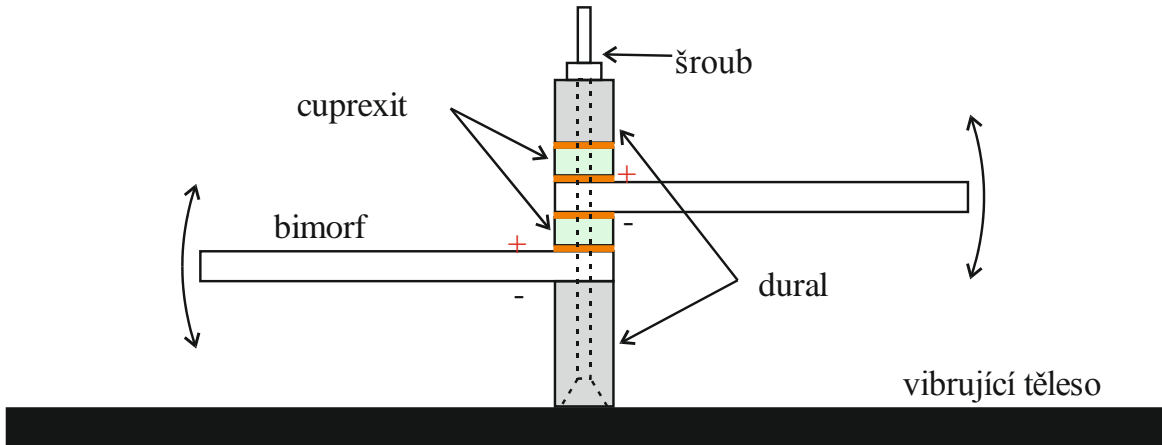
$$\cos(\beta l) \cosh(\beta l) = -1. \quad (3.7)$$

3.3 Kombinovaný dvoukanálový měnič

Vývojem momentového měniče s využitím piezoelektrických bimorfů pracujícího na nízkém napětí se zabývali na katedře fyziky a je popsán v [6] a [12]. Tento měnič byl výchozím pro měření během projektu 1 [8], ve kterém jsem vyrobil také měniče silové stejné konstrukce a testoval jsem schopnost tlumit v systému ASAC úzkopásmové šумы s použitím řídicí jednotky ZEN. V rámci projektu 1 [8] jsem navrhl konstrukci měniče modifikovat tak, aby to, jestli pracuje jako momentový nebo silový záleželo na budicím signálu a ne na jeho konstrukci. V projektu 2 [13] jsem začal pracovat na měření při změnách polarit stran měniče pomocí budicích signálů.

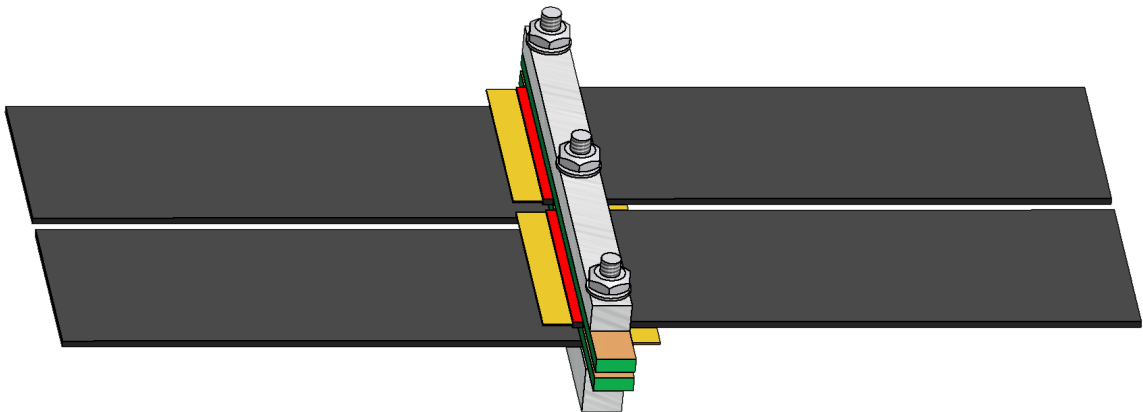
Měnič se skládá ze 4 piezoelektrických bimorfů, které jsou umístěny symetricky vzhledem k rámu (2 na jedné straně a 2 na druhé). Původní rám použitý v projektu 1 [8] byl tvořen třemi hliníkovými profily spojenými šrouby, spodní 60×4×6 mm a horní dvě 60×4×3 mm, mezi kterými byly sevřeny piezoelektrické bimorfy. Měnič sloužil podle polarizace bimorfů v sestavě buď jako momentový, nebo jako silový. Momentový měnič (bimorfy na jednotlivých stranách měniče jsou polarizovány opačně) působí na danou ovlivňovanou konstrukci ohybovým momentem. Silový měnič (bimorfy na jednotlivých stranách měniče jsou polarizovány stejně) působící linií silou kolmou na danou ovlivňovanou konstrukci. Nově navržený a zkonstruovaný kombinovaný měnič je navržen

tak, aby silové a momentové buzení šlo podle potřeby v dané aplikaci kombinovat. Měníč je navržen jako dvoukanálový, jednotlivé strany má zapojeny a vyvedeny samostatně. Konstrukce nového měniče je znázorněna na obrázcích 3.3 a 3.4. Elektrické oddělení jednotlivých stran měniče je vyřešeno přidáním dvou vrstev oboustranně pokoveného cuprexitu, používaného pro výrobu tištěných spojů, do původní konstrukce měniče.



Obrázek 3.3 Řez konstrukcí měniče

Hlavní výhodnou nové konstrukce měniče je to, že poměr mezi silovým a momentovým buzením lze adaptivně řídit, a to i případně za běhu aplikace, závisí to pouze na signálech, jakými budou jednotlivé strany buzeny. V aplikacích zaměřených na potlačení více módů vyzařování primární konstrukce může také měnič podle potřeby na některých frekvencích fungovat jako silový a na jiných frekvencích jako momentový. Konstrukce nového měniče je zároveň o něco nižší a lehčí než předchozí verze.



Obrázek 3.4 Prostorový model měniče

4 Metodika testování měniče

Tato kapitola popisuje navržený způsob testování možností využití dvoukanálového kombinovaného měniče v systémech aktivního snižování vyzařování zvuku na vybrané konstrukci za účelem snížení hladiny akustického tlaku ve vybraném místě prostoru. Byla zvolena metoda simulace systému ASAC aplikovaného na konstrukci s jednoduchým (předvídatelným) rozložením vibrací. Jako primární zdroj byl zvolen vetknutý pásek buzený bodovou silou uprostřed, u kterého lze uvažovat pouze ohybové kmity v jedné ose.

Vzhledem ke složitosti problematiky se předpokládá, že základní testování měniče bude provedeno s čistými tóny na vybrané jednoduché konstrukci. Pro experimenty zaměřené na potlačování vyzařování hluku tedy nebude použita řídicí jednotka s adaptivními filtry, ale řízení systému bude založeno na několika generátorech harmonických signálů s nastavitelným vzájemným fázovým posuvem. Cílem metodiky je prozkoumat možnosti kombinovaného měniče, tedy zjistit, v jakých režimech měnič pracuje při maximálních naměřených útlumech vyzařování zvuku (neprůzvučnostech).

4.1 Popis metodiky

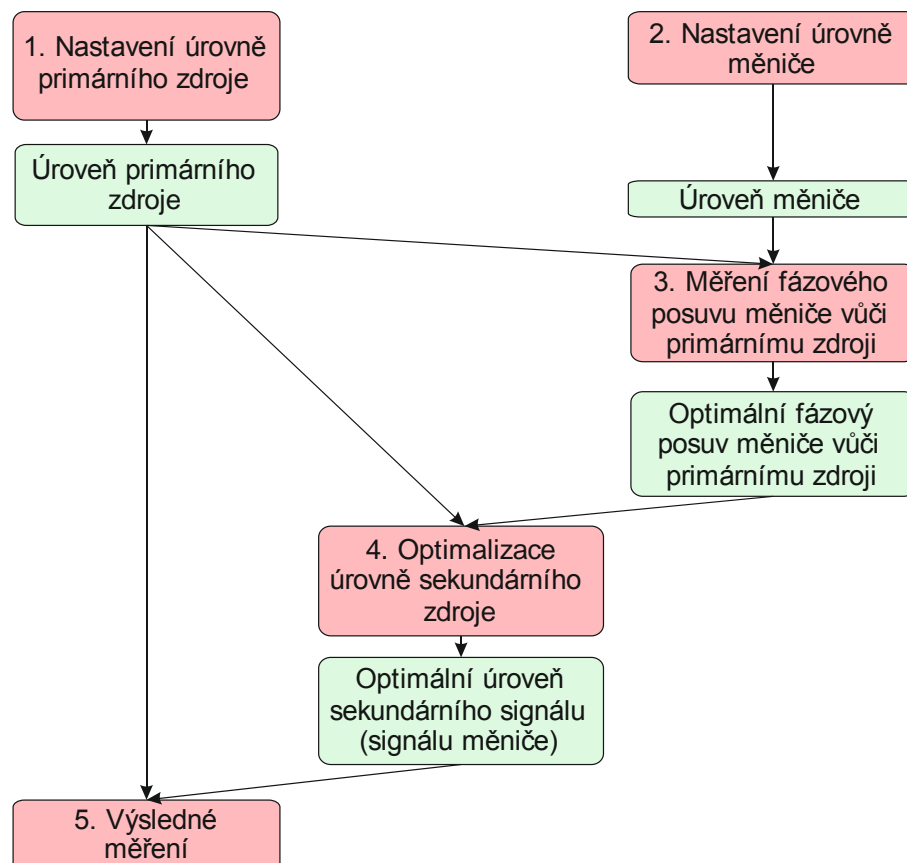
Nejprve se proměří vlastnosti systému s měničem pro silovou a momentovou konfiguraci, tedy jak měnič ovlivní chování sestavy přidáním hmotnosti měniče do konkrétní polohy, jaký akustický tlak je v této poloze schopen vybudit a jakého útlumu je možné dosáhnout. Poté se provede měření obecných silovo-momentových konfigurací, které je založeno na tom, že se postupně proměří všechny možné kombinace fázových posuvů primárního a sekundárních signálů napájejících jednotlivé strany měniče. Konkrétně se plynule přeladuje fázový posuv primárního signálu vůči pomyslnému nulovému fázovému posuvu resp. sekundárním signálům, a současně se mnohem rychleji plynule mění fázový posuv stran měniče – vzájemný fázový posuv sekundárních signálů. Než je však možné provést toto měření je nutné nalézt optimální úroveň zesílení sekundárních signálů.

Metodiku měření obecně silovo-momentových konfigurací kombinovaného měniče můžeme rozdělit do jednotlivých bodů, které jsou v následujících kapitolách 7.2 až 7.4 blíže popsány.

1. Nastavení úrovně primárního zdroje
2. Nastavení úrovně měniče na stejnou úroveň jakou má primární zdroj

3. Nalezení optimálního fázového posuvu pro silovou a momentovou konfiguraci měniče
4. Optimalizace úrovně pro momentovou a silovou konfiguraci měniče pomocí signálu s plynule rostoucí úrovní.
5. Výsledná měření obecných silovo-momentových konfigurací měniče, tedy přeladění fáze sekundárního měniče vůči primárnímu měniči pro momentovou a silovou optimalizovanou úroveň sekundárního měniče

Následující blokové schéma znázorňuje vzájemné vazby mezi jednotlivými kroky testování měniče. Růžovou barvou jsou označena měření. Zelenou barvou jsou označené naměřené hodnoty, ze kterých byla provedena vyhodnocení a jsou z nich dopočítány hodnoty potřebné pro další bod měření. Body 1 a 2 byly měřeny pouze jednou na začátku měření, přičemž ostatní body byly měřeny v každé poloze postupně pro momentovou a silovou konfiguraci měniče.



Obrázek 4.1 Blokové schéma metodiky měření vlastností kombinovaného měniče

4.2 Simulace vlivu exponenciálního průměrování

Cílem simulace bylo nalézt a ověřit parametry výše popsané metodiky měření. Celková doba potřebná pro měření jedné konfigurace kombinovaného měniče na primární konstrukci je dána jednak rychlostí změny režimu měniče (fázový posuv stran měniče vůči sobě) a také rychlostí změny fázového posuvu primárního signálu vůči sekundárním signálům. Vzhledem k tomu, že záměrem simulace není modelovat kombinovaný měnič, ale nalézt vhodné parametry pro experimentální ověření měniče, byl pro simulaci použit nejjednodušší model aktivního systému založený na prosté superpozici dvou sinusových signálů. Takovýto model pro daný účel dostatečně popisuje změnu fáze sekundárních signálů napájejících měnič.

Na základě výše uvedených předpokladů lze za hlavní parametry metodiky, které lze simulovat popsaným modelem, považovat:

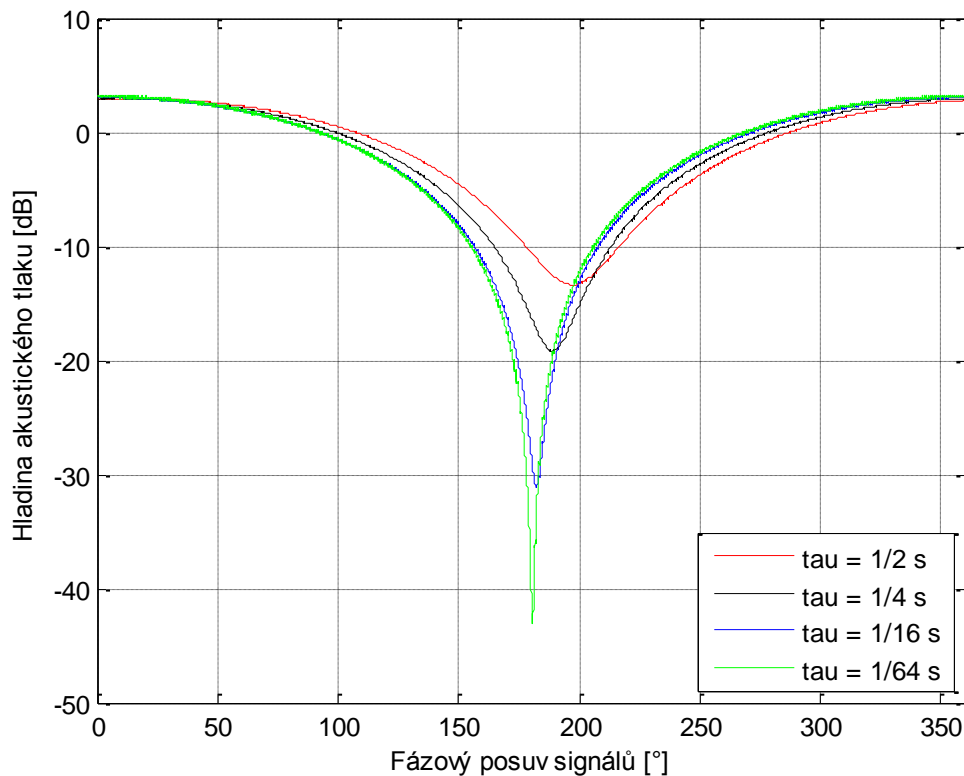
- Dobu, za kterou se změní fázový posuv stran měniče o 360° (nejrychlejší změna fáze v experimentu).
- Časovou konstantu exponenciálního průměrování.
- Vzorkovací frekvenci, resp. periodu, se kterou je nutné odebírat a uchovávat dosažený útlum.

4.2.1 Simulace časové konstanty exponenciálního průměrování

Pro měření útlumu je nutné měřit závislost efektivní hodnoty akustického tlaku jako funkci času, není proto možné počítat efektivní hodnotu za celou dobu měření. Při měření je tento výpočet proveden v programu Pulse skrze tzv. exponenciální průměrování a uchování časové závislosti průběhu efektivní hodnoty pomocí funkce multibuffer s vhodně zvolenou dobou mezi zaznamenanými vzorky. V rámci simulace je exponenciální průměrování realizováno jednoduchým IIR filtrem.

Simulací bylo ověřeno, jaký má vliv exponenciální filtr na nejjednodušší simulaci systému ASAC, prostý součet dvou harmonických signálů. První signál je prostý sinus pro frekvenci 128 Hz, druhý má stejnou frekvenci, a postupně během doby celé simulace se mu mění fázový posuv vůči prvnímu od 0 do 360° . Musí být buď zvolena taková doba přeladění stran měniče z momentového na silový, aby vlivem exponenciálního filtru nedošlo k přílišnému zkreslení maxima útlumu, nebo obráceně, pro zvolenou dobu přeladění vhodná časová konstanta exponenciálního filtru. Pro měření byla zvolena doba

přeladění na 5 s, bylo nutné ověřit, jaký má s touto dobou přeladění vliv exponenciální filtr na hodnotu maximálního útlumu a posuv polohy maximálního útlumu. Výsledky simulace jsou zobrazeny pro několik hodnot časové konstanty exponenciálního průměrování na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2 Vliv exponenciálního filtru na součet dvou sinů – $f = 128$ Hz

Vliv časové konstanty v závislosti na rychlosti změny naměřeného útlumu je zkreslení maximálních/minimálních hodnot vlivem nevhodného průměrování - příliš velké časové konstanty exponenciálního filtru. Doba přeladění z momentového na silový měnič byla zvolena 5 s, a celková doba měření 360 s, aby celé měření přeladění všech frekvencí netrvalo příliš dlouho (více kapitola 8). Simulací se ověřil vliv časové konstanty na předpokládaný průběh naměřených útlumů.

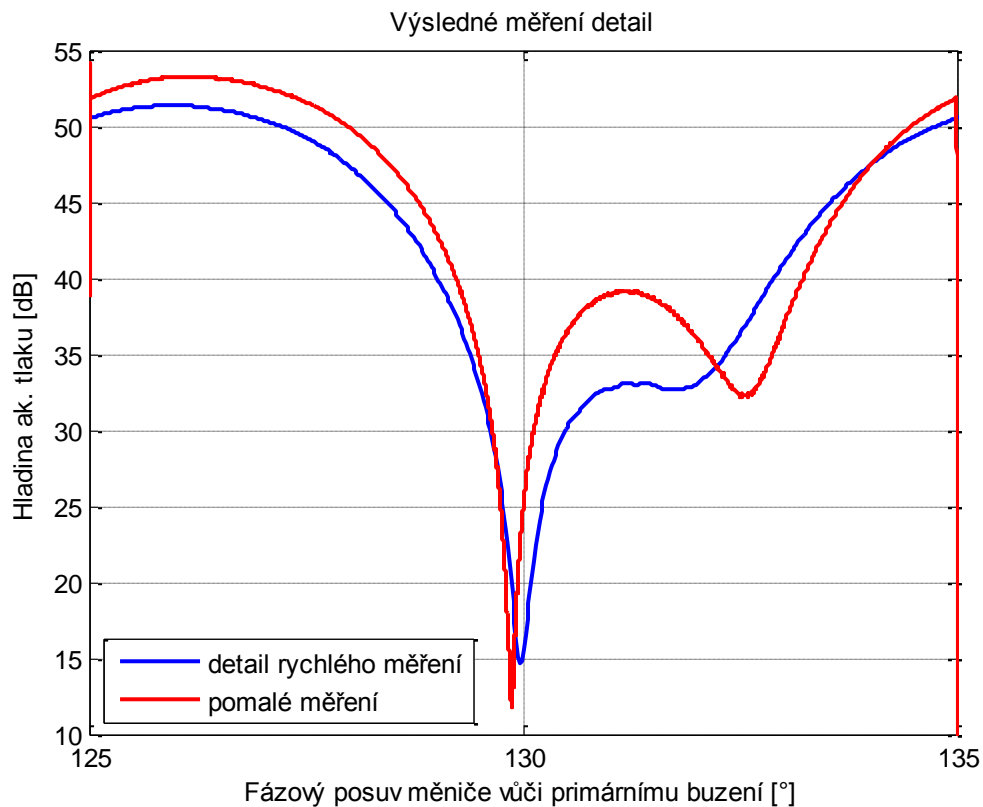
Z grafu je patrné, že při velké časové konstantě exponenciálního průměrování je průběh dosaženého útlumu příliš vyhlazený, tedy s větší časovou konstantou se ztrácí úzká minima efektivních hodnot (maximální útlumy), na které je experiment zaměřen. Také je zde vidět, že s větší časovou konstantou se filtrovaný signál vůči signálu původnímu zpožďuje.

Vzhledem k výsledkům simulace jsou pro měření zvoleny následující parametry:

- Časová konstanta filtru 1/16 s
- Doba změny fázových posuvů stran měniče 5 s
- Vzorkovací frekvenci 5 kHz
- Frekvence ukládání hodnot hladiny akustického tlaku 50 Hz

4.3 Kontrolní měření vlivu exponenciálního filtru na změřený průběh

Pro kontrolu vlivu exponenciálního filtru bylo provedeno měření, kdy se vybrala oblast z předcházejícího grafu a byla proměřena pomalu. Během doby, kterou normálně trvá celé přeměření – 360 s se proměřila oblast, která se v předchozím měření měřila 10 s. Výsledkem je následující graf 4.3 s porovnáním detailu původního měření s měřením provedeným pomalu.



Obrázek 4.3 Porovnání detailu výsledného měření s pomalým měřením

Z grafu je patrné, jak exponenciální filtr ovlivňuje maximální výchylky a zkresluje průběh. Pro účely následujících měření je však nejdůležitější oblast okolo minima respektive čas/fázový posuv ve kterém bylo dosaženo minima. Tato oblast je pro účely měření zdeformována exponenciálním filtrem přijatelným způsobem.

5 Teoretický rozbor úlohy

5.1 Volné kmity vetknutého pásku

Pro projekt 2 [13] a na něj navazující diplomovou práci byla složitá struktura, použitá v projektu 1 [8], na které probíhalo měření, nahrazena plechovým páskem, jehož délka byla výrazně větší než šířka. Mohlo se tedy uvažovat kmitání pouze jednorozměrné a hlavně matematicky jednodušeji popsatelné než tomu bylo v předchozím případě. V této kapitole bude popsán matematický popis kmitání pásku.

Vlnová rovnice popisující vlastní kmity pásku je spolu s řešením odvozena např. v [10]:

$$\frac{d^4\eta}{dt^4} = m^4\eta, \quad (5.1)$$

kde η je výchylka ve směru osy y a

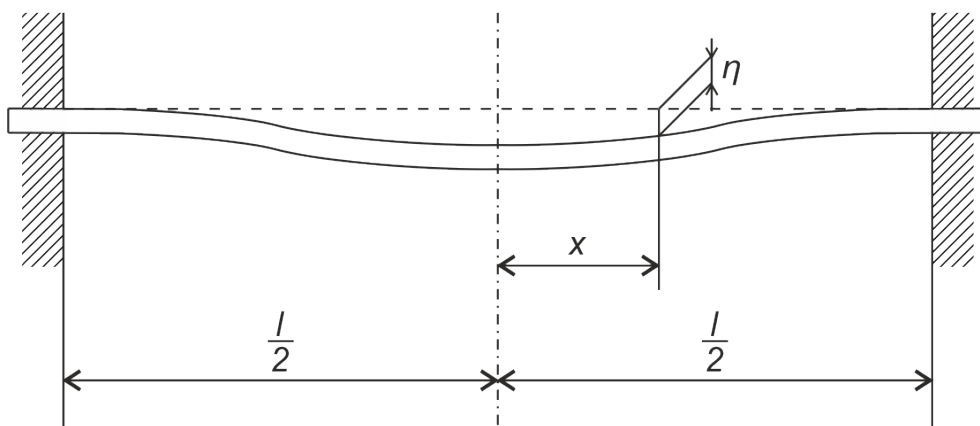
$$m^4 = \frac{\omega^2 q S}{E_{11} I}, \quad (5.2)$$

kde q je hustota, S je plocha průřezu, E_{11} je modul pružnosti, a $I = \frac{1}{12}bh^3$, kde b je šířka pásku a h je jeho výška - tloušťka.

Obecné řešení vlnové rovnice (5.1) je následující:

$$\eta = A \cosh(mx) + B \sinh(mx) + C \cos(mx) + D \sin(mx) \quad (5.3)$$

Z okrajových podmínek pro různé upevnění pásku se dostanou vztahy pro vlastní kmity. V této práci se bude dále pracovat s páskem vetknutým na obou koncích znázorněným na obrázku 5.1, a proto zde budou uvedeny pouze vztahy pro tento případ.



Obrázek 5.1 Pásek vetknutý na obou koncích [10]

Pro okrajové podmínky v tomto případě platí

$$\left. \begin{array}{l} \eta_1 = 0 \\ \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = 0 \end{array} \right\} \text{ pro } x = \pm \frac{l}{2}$$

Když se do těchto okrajových podmínek zavede výraz (5.3), ve kterém se dosadí za $x = \pm \frac{l}{2}$, dostaneme rovnice:

$$A \cosh\left(m \frac{l}{2}\right) + B \sinh\left(m \frac{l}{2}\right) + C \cos\left(m \frac{l}{2}\right) + D \sin\left(m \frac{l}{2}\right) = 0 \quad (5.4)$$

$$A \cosh\left(m \frac{l}{2}\right) - B \sinh\left(m \frac{l}{2}\right) + C \cos\left(m \frac{l}{2}\right) - D \sin\left(m \frac{l}{2}\right) = 0 \quad (5.5)$$

$$A \cosh\left(m \frac{l}{2}\right) + B \sinh\left(m \frac{l}{2}\right) - C \cos\left(m \frac{l}{2}\right) + D \sin\left(m \frac{l}{2}\right) = 0 \quad (5.6)$$

$$-A \cosh\left(m \frac{l}{2}\right) + B \sinh\left(m \frac{l}{2}\right) + C \cos\left(m \frac{l}{2}\right) + D \sin\left(m \frac{l}{2}\right) = 0 \quad (5.7)$$

Z kombinací rovnic lze odvodit vztahy

$$\left. \begin{array}{l} A \cosh\left(m \frac{l}{2}\right) = -C \cos\left(m \frac{l}{2}\right) \\ A \sinh\left(m \frac{l}{2}\right) = C \sin\left(m \frac{l}{2}\right) = 0 \end{array} \right\} \text{ při } B = D = 0, \quad (5.8)$$

a dále

$$\left. \begin{array}{l} B \cosh\left(m \frac{l}{2}\right) = -D \cos\left(m \frac{l}{2}\right) \\ B \sinh\left(m \frac{l}{2}\right) = -D \sin\left(m \frac{l}{2}\right) = 0 \end{array} \right\} \text{ při } A = C = 0. \quad (5.9)$$

Vyřešením rovnic a dosazením za $m_i = \frac{\omega_i}{h} \sqrt{\frac{12q}{E_{11}}}$ dostaneme pro první tři módy vlastních frekvencí vztahy:

$$f_1 = 1,0279 \sqrt{\frac{E_{11}}{q}} \cdot \frac{h}{l^2} \quad (5.10)$$

$$f_2 = 2,8335 \sqrt{\frac{E_{11}}{q}} \cdot \frac{h}{l^2} \quad (5.11)$$

$$f_3 = 5,5548 \sqrt{\frac{E_{11}}{q}} \cdot \frac{h}{l^2} \quad (5.12)$$

Primární zdroj byl zkonstruován tak, aby odpovídal teorii vetknutého nosníku. Volné kmity pásku jsou popsány vlnovou rovnicí (5.1), kde na její pravé straně přibude budicí síla f . Výchylka η je dle [10] popsána následujícími rovnicemi:

pro symetrické výchylky (liché módy)

$$\eta = (A \cosh(m_i x) + C \cos(m_i x)) e^{j\omega t} \quad (5.13)$$

a pro nesymetrické výchylky (sudé módy)

$$\eta = (B \sinh(m_i x) + D \sin(m_i x)) e^{j\omega t}, \quad (5.14)$$

kde A, B, C, D jsou konstanty dopočítané z okrajových podmínek. Dále jsou formulovány vztahy pro řešení rovnic pro první tři módy.

$$m_1 = 1,50562 \frac{\pi}{l} \quad (5.15)$$

$$m_2 = 2,49975 \frac{\pi}{l} \quad (5.16)$$

$$m_3 = 3,50001 \frac{\pi}{l} \quad (5.17)$$

5.2 Vyjádření budicích funkcí

V této podkapitole jsou popsány typy buzení použité v simulacích a v následném experimentu.

Primární zdroj byl buzen bodovou silou působící kolmo ke geometrickému středu pásku. Budicí funkci f pro tento případ můžeme vyjádřit pomocí následujícího vzorce [10]:

$$f = -T \delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \quad (5.18)$$

kde T je bodová síla působící kolmo ke geometrickému středu pásku. Stejná budicí funkce reprezentuje i sekundární měnič v silovém režimu, který byl postupně umístován na osu procházející středem pásku rovnoběžnou s osou x , protože vzhledem k symetrii úlohy lze kmity ve směru osy y považovat za konstantní. Dle [12] může být budicí funkce reprezentující měnič v momentovém režimu vyjádřena jako:

$$f = \frac{\delta M_1^e}{\delta y} - \frac{\delta M_2^e}{\delta x}, \quad (5.19)$$

kde nejdůležitější jsou bodové a liniové momenty. Bodový moment s výchylkou M_B je

$$M^e = M_B \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \quad (5.20)$$

Podobně pro liový moment podél osy x , kde $y = y_0$ a y mezi body x_0 a x_1 pro amplitudu M_L platí vzorec:

$$M_1^e = \frac{M_L}{x_1 - x_0} \delta(y - y_0) (H(x - x_0) - H(x - x_1)) \quad (5.21)$$

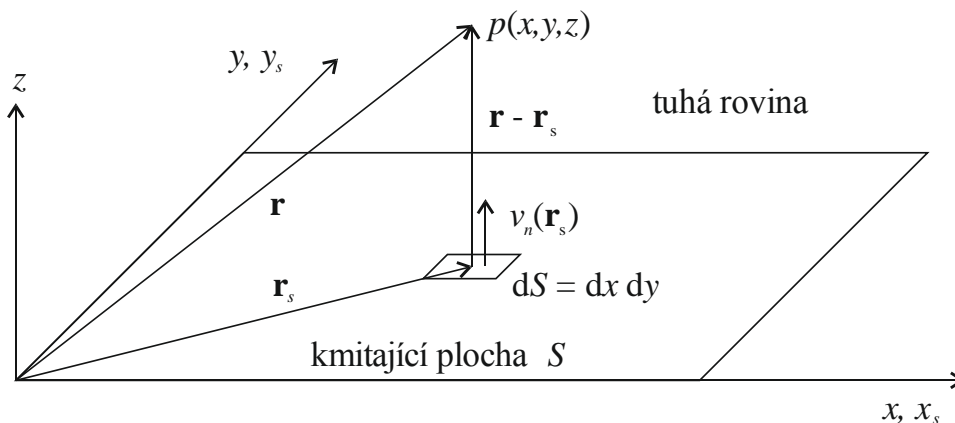
kde $H(x)$ je Heavisideova funkce.

5.3 Vyzařování zvuku

Pomocí Rayleighova integrálu, uvažovaného pro zdroj zvuku v dokonale tuhé, rovinné a nekonečně rozlehlé stěně vypočteme akustický tlak ve výše definovaném místě.

$$p(x, y, z) = \frac{j\rho ck}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v(x_s, y_s, 0) \frac{e^{-jk\|r-r_s\|}}{\|r-r_s\|} dx_s dy_s, \quad (5.22)$$

kde ρ je hustota, c je rychlost zvuku, k je Boltzmannova konstanta a význam zbylých použitých symbolů je zřejmý z obrázku 5.2. Rayleighův integrál není obecně analyticky řešitelný a byl řešen pomocí numerických metod v programu Matlab.



Obrázek 5.2 Rayleighův integrál – význam použitých symbolů [12]

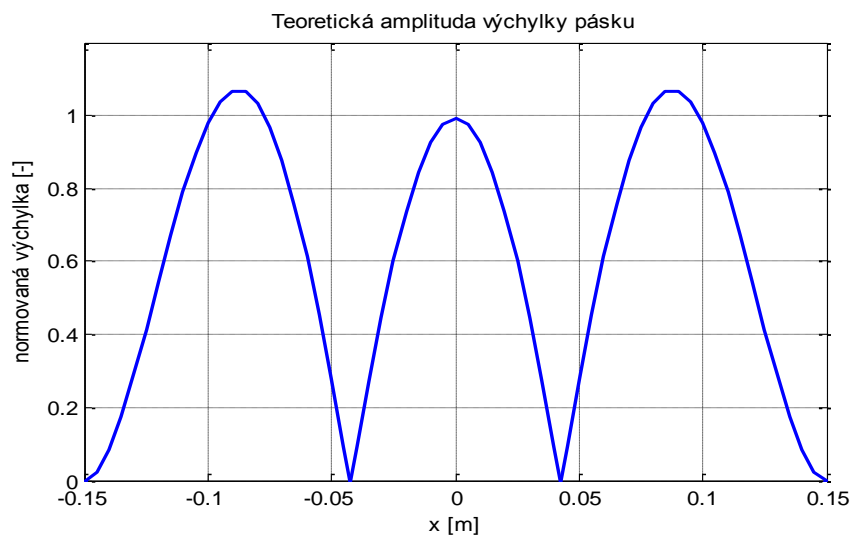
5.4 Simulace ASAC

5.4.1 Volné kmity vetknutého pásku

Parametry měřeného pásku, určující na jakých frekvencích bude pásek kmitat, byly zvoleny tak, aby odpovídaly pásmu použitelnosti měniče. Šířka a délka pásku jsou určeny konstrukcí přípravku, proto jsem se zaměřil v první fázi na tloušťku materiálu. Tloušťka materiálu byla zvolena z výrobní řady tak, aby určité frekvence vlastních kmitů byly v pásmu použitelnosti měniče. Zvolený ocelový pásek (primární zdroj) pro měření, tedy i pro simulace, má následující parametry: délka 30 cm, šířka 6 cm, výška 0,4 mm, hustota

$7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, Youngův modul pružnosti $2,1\cdot 10^{11} \text{ Pa}$. Dle vztahů (5.10) až (5.12) vychází pro pásek z materiálu tlustého 0,4 mm následující frekvence první třech módů: 23,4 Hz, 64,5 Hz a 126,5 Hz.

Pokud dosadíme do vztahu řešení vlnové rovnice pro 3. mód (5.13) hodnoty zvoleného pásku, tak následně dosazením konkrétních parametrů primárního zdroje získáme závislost amplitudy výchylky pásku na poloze na ose x pro volné kmity pásku. Tato závislost je zobrazena v následujícím grafu 5.3. Na ose y je vynesena normovaná výchylka vůči výchylce uprostřed pásku.



Obrázek 5.3 Simulace teoretické výchylky pásku při silovém bodovém buzení středu pásku

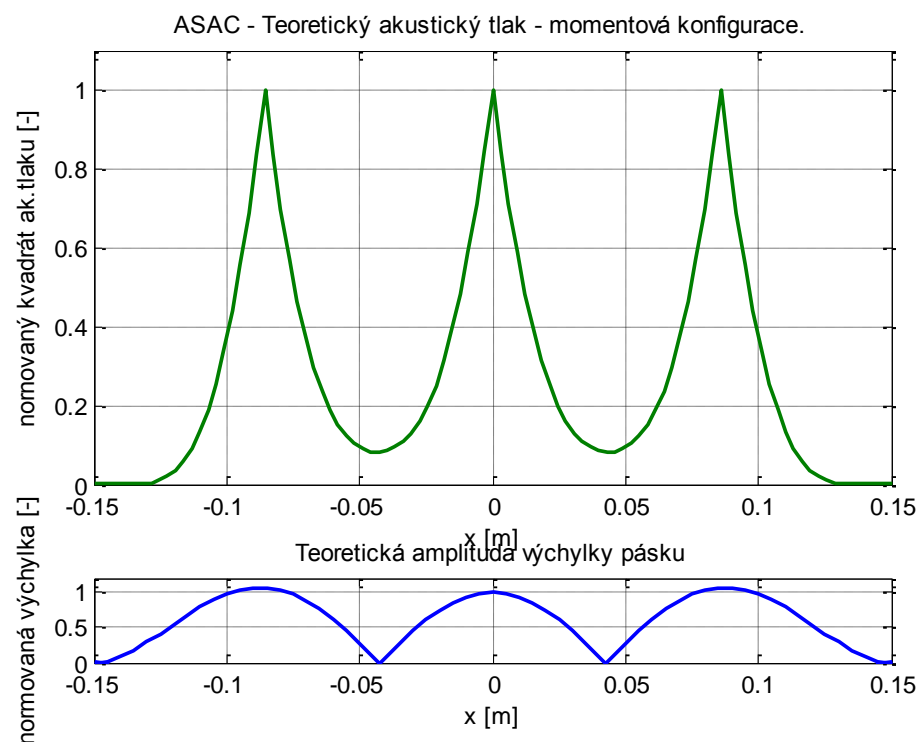
5.4.2 Simulace dosaženého útlumu při momentové a silové konfiguraci měniče

Předpokládá se buzení bodovou silou uprostřed pásku. Vzhledem k tomu, že výchylka pásku je ve směru osy y konstantní, můžeme sekundární měnič pro výpočet aproximovat také bodovou silou a bodovým momentem, které jsou matematicky vyjádřeny výše.

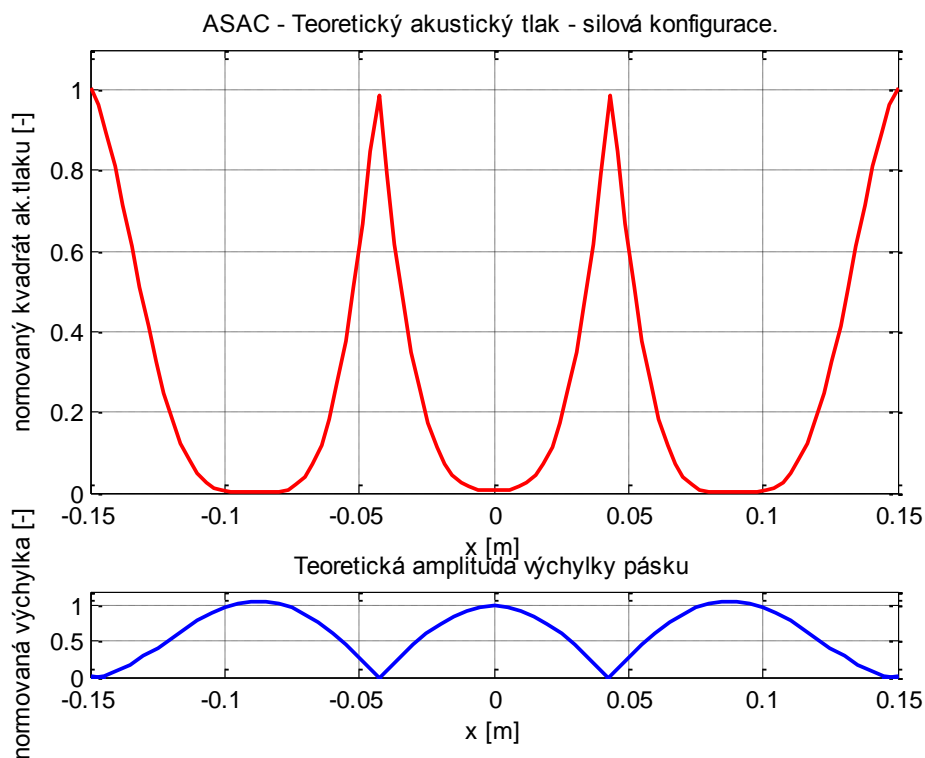
Cílem je nasimulovat závislost akustického tlaku vybuzeného páskem na poloze sekundárního měniče v silové a momentové konfiguraci, měnič se bude ve všech polohách budit optimální úrovní. To znamená nejmenší úroveň, která je potřebná k maximálnímu snížení akustického tlaku - pro sílu se jedná o úroveň odpovídající postranním kmitnám, pro moment je to úroveň v krajních uzlech. Pro simulaci byly využity skripty dostupné v akustické laboratoři, ve kterých jsou implementovány vztahy (5.18), (5.20) a (5.22). Ty bylo nutné doplnit o vztah, týkající se primárního zdroje – vetknutého nosníku (5.13).

Při simulaci byl měnič umístěn s rovnoměrným krokem do sta poloh na celém pásku. Byly nasimulovány závislosti akustického tlaku ve vzdálenosti 0,5 m nad geometrickým středem pásku, při současném primárním i sekundárním buzení (simulace ASAC), na poloze sekundárního budiče, přičemž budící úrovně jsou stále stejné a fázový posuv byl pro každou polohu optimalizován tak, aby bylo dosaženo co největšího útlumu.

Výsledkem jsou následující grafy Obrázek 5.4 a Obrázek 5.5, které jsou doplněny ve spodní části o závislost normované výchylky na poloze, ze které je patrné rozložení kmiten a uzlů daného módu.



Obrázek 5.4 Simulace závislosti vybuzeného akustického tlaku na poloze měniče s konstantním příkonem – momentová konfigurace



Obrázek 5.5 Simulace závislosti vybuzeného akustického tlaku na poloze měniče s konstantním příkonem – silová konfigurace

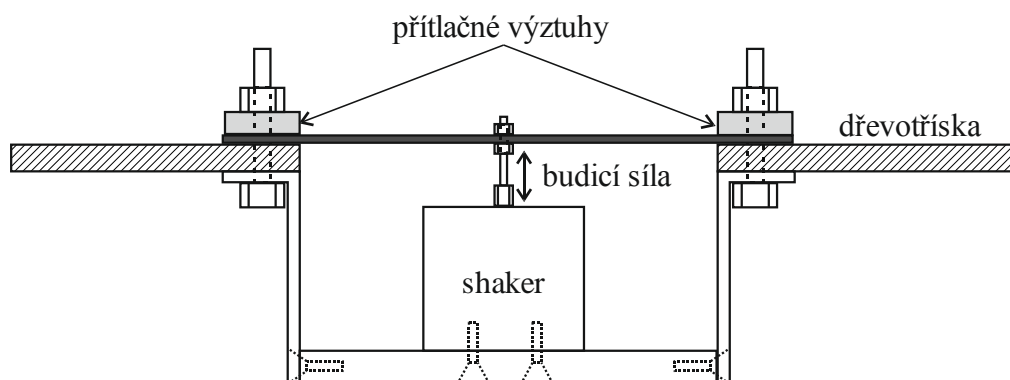
5.4.3 Zhodnocení simulace

Z výsledných grafů názorně vyplývá, že aktivní systém s měničem v momentové konfiguraci dosahuje největší snížení akustického tlaku (resp. jeho úplného potlačení) v krajních uzlech, protože podle nich byla zvolena budicí úroveň, a uzlech vlastních kmitů primárního zdroje vzdálených 4,3 cm od středu pásku. S měničem v silové konfiguraci bylo dosaženo největšího útlumu v krajních kmitnách vlastních kmitů primárního zdroje vzdálených 9 cm od středu pásku, pro které byla zvolená budicí úroveň. Simulace byly provedeny pro frekvenci 3. módu naměřenou v následujících kapitolách $f = 128$ Hz.

6 Měření vlastností primárního zdroje

6.1 Primární zdroj

Jako zdroj hluku (primární zdroj) byl zvolen ocelový pásek (nosník), který je teoreticky popsán v kapitole 5.4.1 a názorně zobrazen na obrázku 6.3. Pásek byl připevněn na konstrukci sestávající z dřevotřískové desky o rozměrech 120×120×2 cm, ve které je uprostřed vyříznut otvor 30×6,2 cm určený pro měření pásků o rozměrech 30×6 cm. Deska je zezadu vyztužena ocelovými profily, aby se zvýšila její tuhost a tím se snížilo množství vyzářeného zvuku z desky. Zvolené uchycení pásku jako vetknutého nosníku bylo realizovatelné upnutím pásku mezi přitlačné výztuhy a dřevotřísku. Tento pásek byl buzen bodovou silou kolmou na střed pásku, realizovanou pomocí shakeru, který byl uchycen ze spodní strany pásku na výztužné ocelové konstrukci, jak je znázorněno na následujícím obrázku 6.1.

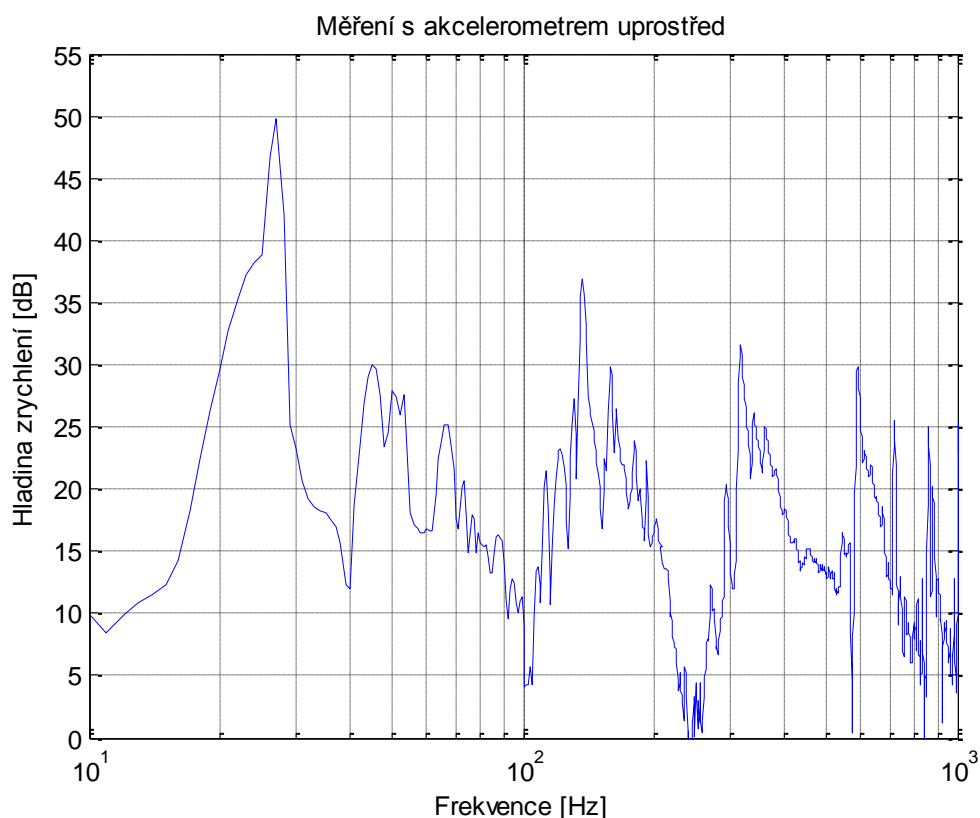


Obrázek 6.1 Uchycení pásku

6.2 Měření volných kmitů vetknutého pásku akcelerometrem

Pomocí akcelerometru bylo provedeno studium volných kmitů vetknutého pásku a to bylo porovnáno s teoretickými parametry uvedenými v předešlém článku.

Měření bylo provedeno tak, že se na pásek připevnil v několika polohách akcelerometr a v několika dalších polohách byl pásek impulsem vybuzen. Měření se vždy několikrát opakovalo, protože bylo velmi obtížné vhodně vybudit pásek v celém pásmu co nejrovnoměrněji. Následující graf 6.2 zobrazuje naměřené FFT s buzením i akcelerometrem uprostřed, kde je předpokládán uzel druhého módu.



Obrázek 6.2 Spektrum měřené akcelerometrem

Výsledky z výše popsáných náměrů byly zprůměrnovány. Laboratoř nedisponuje modálním kladívkem se snímačem síly, pomocí kterého by mohl být snímán budicí impuls, a mohla tak být korektně provedena celá modální analýza. Nicméně pro určení dominantních módu kmitání výše uvedený postup postačuje. Při volbě poloh akcelerometru bylo vzato v úvahu rozložení kmiten a uzlů sledovaných módů. Nejprve se akcelerometr pomocí magnetu připevnil na střed pásku, kde je teoreticky kmitna prvního módu. Vzhledem k tomu, že např. 2. mód má předpokládaný uzel na středu pásku, bylo nutné další polohy akcelerometru volit podle předpokládaných kmiten vyšších módů a přizpůsobit tomu také místa buzení impulsem.

Výsledkem měření jsou uvedeny v následující tabulce spolu s procentuálním vyjádřením odchylek teoretických a změřených hodnot.

mód	f vypočtené [Hz]	f naměřené [Hz]	odchylka
1	23,4	27	15,4 %
2	64,5	67	3,8 %
3	126,5	137	8,3 %

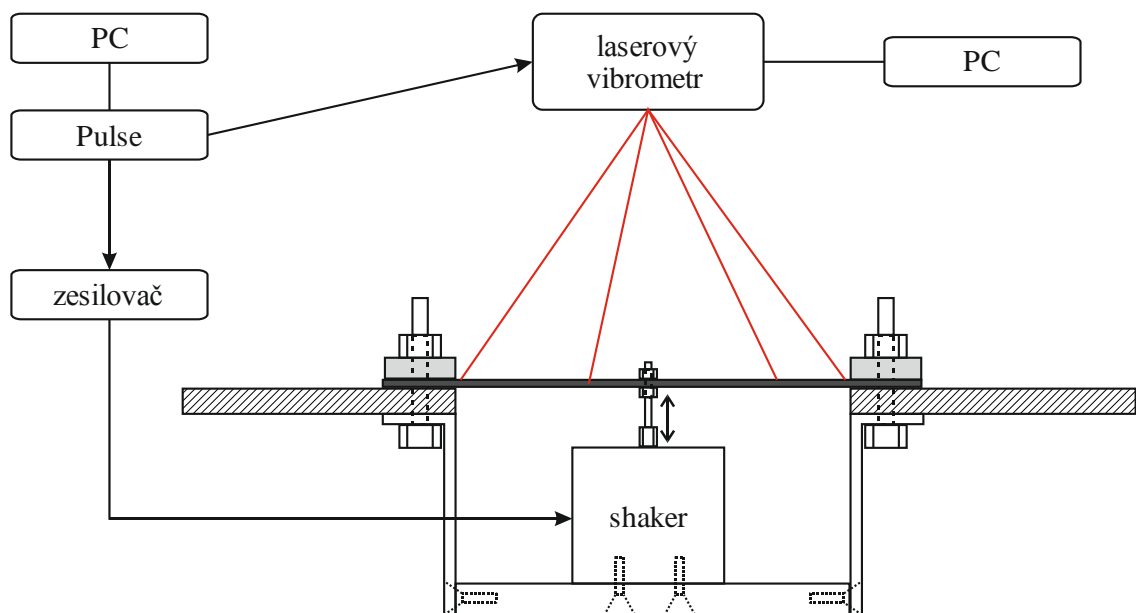
Tabulka 6.1 Porovnání hodnot naměřených akcelerometrem s teoretickými hodnotami

6.3 Měření nucených kmitů primárního zdroje laserovým vibrometrem

6.3.1 Nastavení měření

Laserový skenovací vibrometr slouží k bezdotykovému měření rychlosti vibračních bodů na chvějících se plochách a k vizualizaci jejich kmitání [14]. Díky tomu, že se měří za pomoci laserového paprsku, měření je bezdotykové a neovlivňuje měřenou soustavu, na rozdíl od měření s akcelerometry. Skenovací vibrometr obsahuje videokameru sloužící k nastavení měřicích bodů. Analýza naměřených dat se provádí v programu dodávaném s vibrometrem.

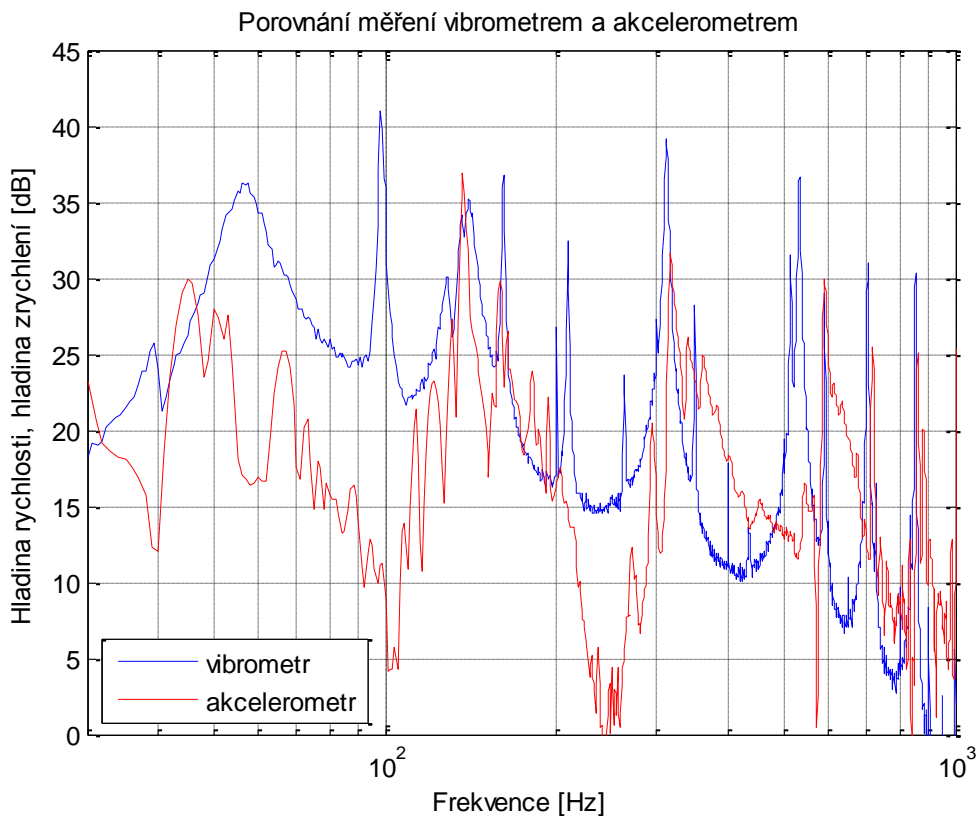
Aby se zjistilo, jak se změní rozložení vibrací oproti situaci při volných kmitech pásku v případě, že pásek bude buzen pomocí shakeru budící silou, je nutné nalézt kmitny a uzly 3. módu. Jedna z předpokládaných kmiten se nachází uprostřed pásku, čemuž i odpovídá bodové silové buzení shakerem. Dalším cílem měření je ověřit, zdali kmitá pásek pouze podélně. Na obrázku 6.3 je schéma měřené soustavy.



Obrázek 6.3 Schéma měření se shakerem

6.3.2 Postup měření

V obslužném programu vibrometru byla zvolena s ohledem na měřený pásek obdélníková síť 25×7 měřicích bodů. Vzhledem k předpokládaným frekvencím módů vibrací byla zvolená síť dostatečná. Budicí signál shakeru - širokopásmový šum (10 až 510 Hz) byl generován měřicím systémem PULSE od firmy Brüel & Kjær. Vibrometr měří rychlost vibrací ve všech měřicích bodech podle zvoleného nastavení (analýza FFT, měřené pásmo 0 až 1 kHz a počet čar 800). Průměrné frekvenční spektrum ze všech měřicích bodů je na grafu 6.4, kde je rovněž červeně zobrazen výsledek měření akcelerometrem.

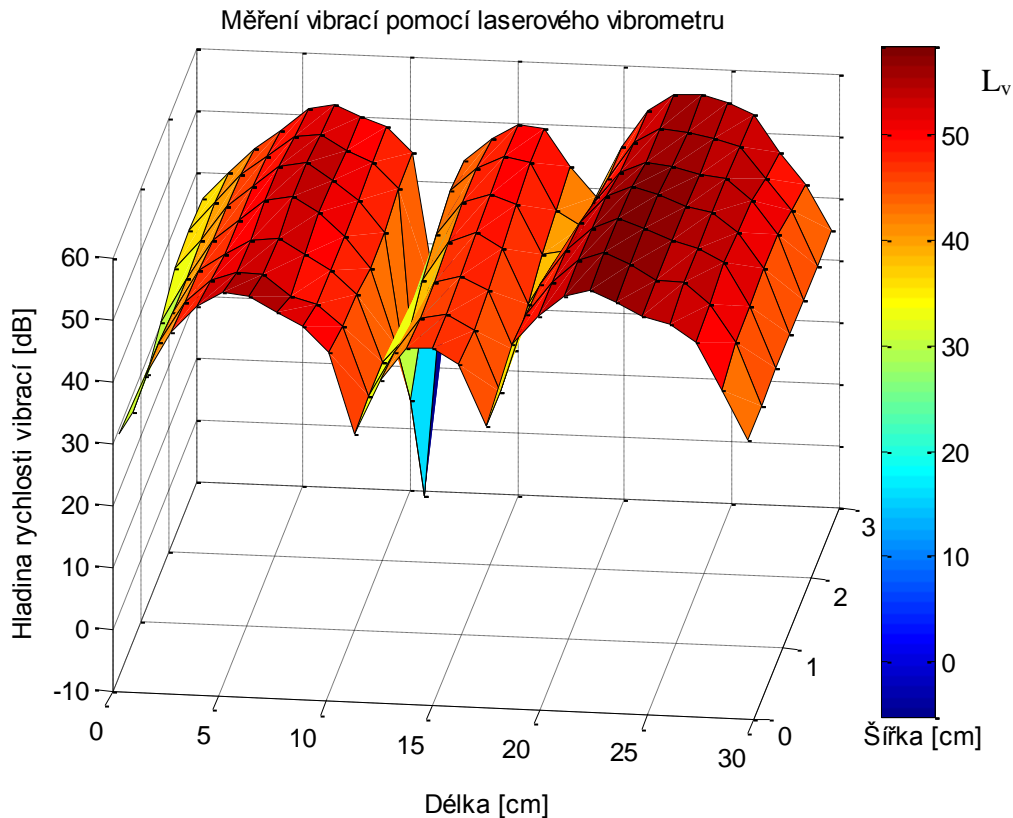


Obrázek 6.4 Spektrum měřené vibrometrem

Vzhledem ke frekvenčnímu pásmu, ve kterém je měnič použitelný je pro další měření nejdůležitější 3. mód, kterému dle výpočtu odpovídá 126,5 Hz a dle měření vibrometrem 128,75 Hz. Z grafu je patrné, že pomocí elektrodynamického shakeru nebyly vlivem nastavení vybuzeny nízké frekvence a zároveň podle předpokladů přidělení shakeru ke konstrukci ovlivní frekvence jednotlivých módů.

6.3.3 Rozložení kmiten a uzlů

Na následujícím grafu 6.5 je znázorněna hladina efektivní hodnoty rychlosti kmitání na měřeném pásku pro vybraný 3. mód 128,75 Hz. Z grafu je možné zjistit umístění uzlů (minima) a kmiten (maxima).



Obrázek 6.5 Rozložení kmiten a uzlů

Výsledky měření vibrometrem zpracovává obslužný program vibrometru v případě měření s referenčním signálem, kdy je možné určit fázové posuvy mezi jednotlivými body také formou animace průběhu rozložení výchylky vibrace pásku v závislosti na čase, dále psané již jen jako animace, ve kterém je znázorněn časový průběh kmitání vybraného módu. Vyhodnocením animací bylo prokázáno, že pásek na sledované frekvenci kmitá pouze podélně. Dále bylo zjištěno, že na jedné podélné hraně, na obrázku 6.5 blíže k nám, jsou maximální výchylky větší než na druhé. To je způsobeno tím, že se nepodařilo bodové silové buzení shakerem umístit přesně do středu pásku a také tím, že při stříhání pásku z plechu dojde k jeho nepatrné deformaci, která se projeví na tvaru rozložení jeho vibrací.

6.4 Vliv měniče na vlastnosti pásku

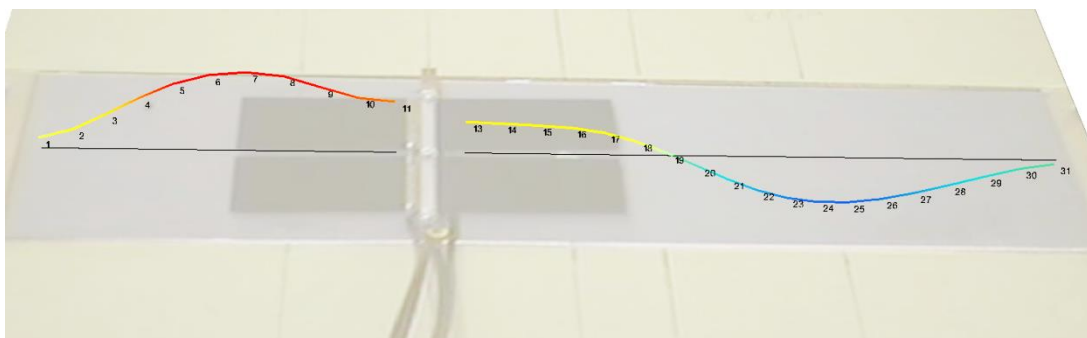
V této kapitole jsou popsána měření vibrací pásku ve dvou pozicích - v kmitně a uzlu. Na rozdíl od předchozího měření, již nebylo měřeno po celé ploše, ale pouze na linii rovnoběžné s osou x protínající střed pásku, protože se předchozím měřením ověřilo, že je kmitání v tomto módu pouze podélné. Cílem těchto měření bylo ověřit tři věci:

1. Jaký vliv má přidání měniče na vibrace pásku.
2. Pracuje-li měnič v momentovém režimu opravdu jako momentový a v silovém jako silový.
3. Jaké vibrace vybudí měnič v režimu nevhodném pro jeho umístění.

Jak již bylo zmíněno v předcházející kapitole, vibrometr je schopen výsledky měření prezentovat formou animací. Na následujících obrázcích jsou zastavené animace reprezentující okamžitou výchylku pásku v nejvíce reprezentativním okamžiku.

6.4.1 Vliv přidání měniče

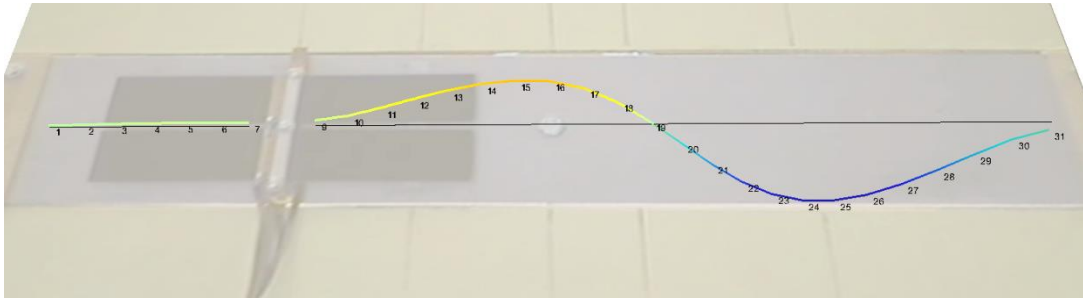
Při tomto měření nebyl měnič zapnutý a pásek byl buzen pouze bodovou silou uprostřed. Z grafů, ale hlavně animací, které zde nelze prezentovat, je patrné jak ovlivnilo vibrace struktury umístění měniče.



Obrázek 6.6 Okamžitá výchylka vibrací s měničem v uzlu – buzeno silou uprostřed

Vlivem setrvačnosti měniče již v tomto bodě, který byl původně kmitnou, zdánlivě kmitna není. Z animací je také patrné, že druhá strana pásku nebyla vypnutým měničem ovlivněna.

Na následujícím grafu je znázorněn vliv měniče připojeného do kmitny.

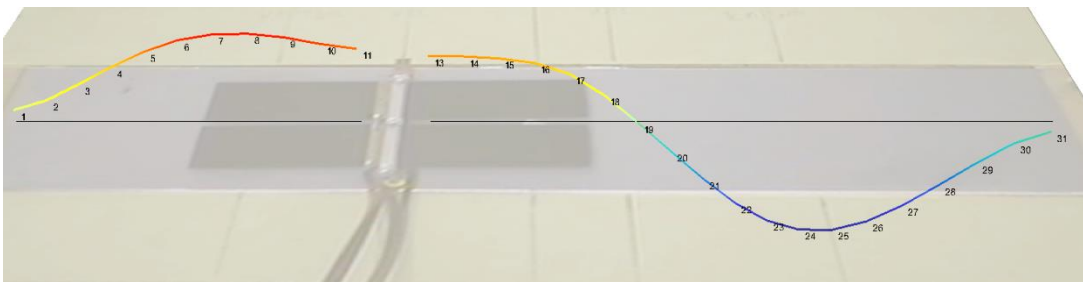


Obrázek 6.7 Okamžitá výchylka vibrací s měničem v kmitně – buzeno silou uprostřed

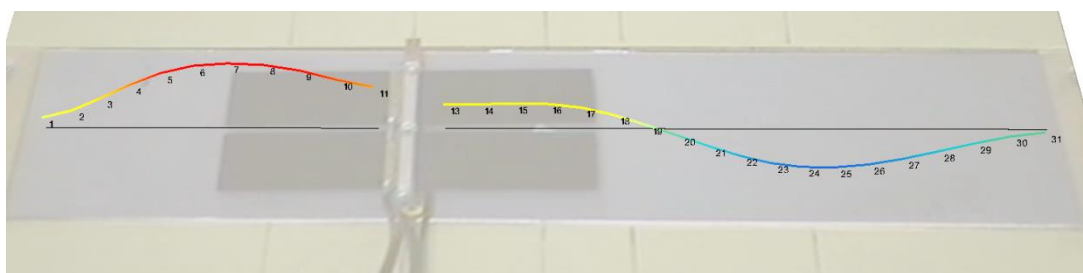
Zde je patrné, že vlivem hmotnosti došlo směrem od zdroje (středu) k téměř úplnému utlumení vibrací za měničem. Měnič si v místě původní kmitny vynutil vlivem své hmotnosti uzl.

6.4.2 Vybuzení měničem v uzlu

Dalším měřením bylo měření vibrací vybuzených měničem pro obě konfigurace měniče.



Obrázek 6.8 Okamžitá výchylka vibrací s měničem v uzlu – silové buzení měničem



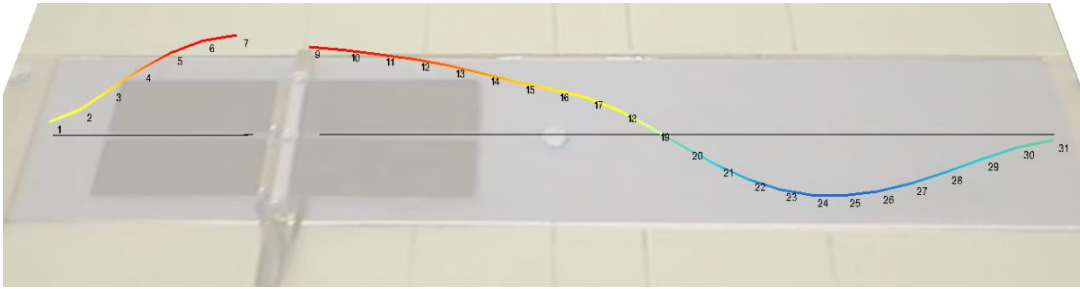
Obrázek 6.9 Okamžitá výchylka vibrací s měničem v uzlu – momentové buzení měničem

Grafy 6.8 a 6.9 jsou si velmi podobné. Drobné rozdíly jsou patrné z analýzy animací. U silového buzení je z animace patrné, že buzení je opravdu silového charakteru a obdobně

u momentového. Podobnost průběhů je pravděpodobně způsobena ovlivněním vibrací připevněním měniče na pásek, viz obrázek 6.6.

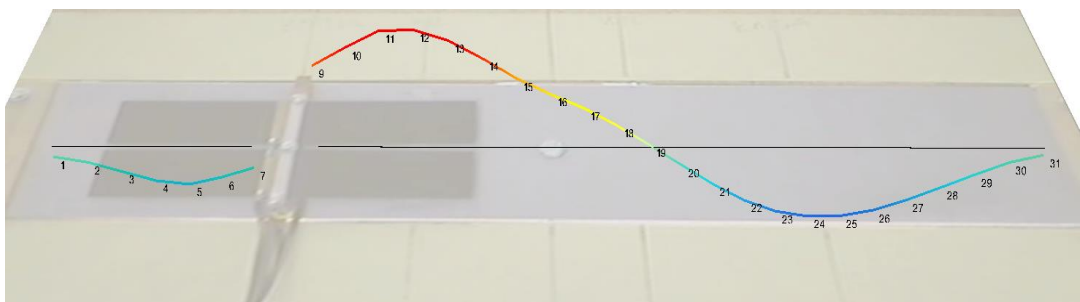
6.4.3 Vybuzení měničem v kmitně

Na obrázcích 6.10 a 6.11 je názorně vidět rozdíl mezi buzením momentovým a silovým.



Obrázek 6.10 Okamžitá výchylka vibrací s měničem v kmitně – silové buzení měničem

Zde je názorně vidět silové buzení měničem v kmitně, při kterém jsou budící signály pro jednotlivé strany měniče ve fázi.



Obrázek 6.11 Okamžitá výchylka vibrací s měničem v kmitně – momentové buzení měničem

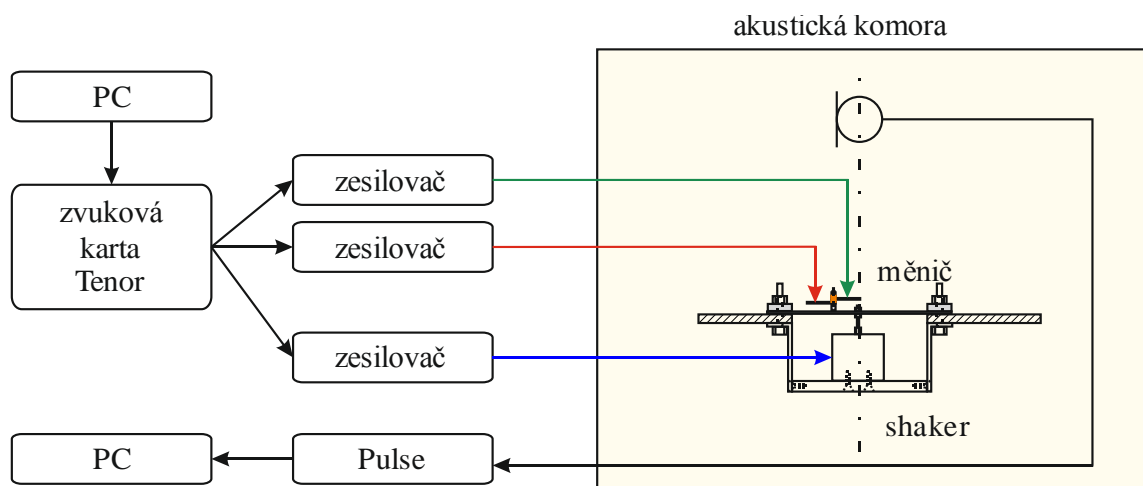
Z obrázku 6.11 je patrné, že měnič si vynutil svou hmotností uzel v poloze, která při volných kmitech pásky odpovídá kmitně. Rovněž je toto nejnázornější obrázek, na kterém je vidět momentové buzení měničem, při kterém jsou jednotlivé strany měniče buzeny signály s opačnou fází.

7 Měření vlastností kombinovaného měniče

Při návrhu metodiky se vycházelo z dostupného zařízení ve vybavení akustické laboratoře. Jako generátor měřicích signálů bude využit analyzátor Soft Db Tenor, který má 4 výstupy, které umožňují přehrát soubor ve formátu wave. Tyto soubory budou připraveny v programu Matlab. Měření bude analyzováno multianalyzátozem od firmy Brüel and Kjaer Pulse, předpokládá se použití třetinooktávové analýzy, pro zvýšení odstupu signálu od šumu (hluku pozadí), s exponenciálním průměrováním. Blokové schéma měření je znázorněno na obrázku 7.1. Nalezení vhodné časové konstanty exponenciálního průměrování v závislosti na rychlosti přeladění je předmětem simulace popsané v následující kapitole.

7.1 Měření vlastností systému v závislosti na umístění měniče

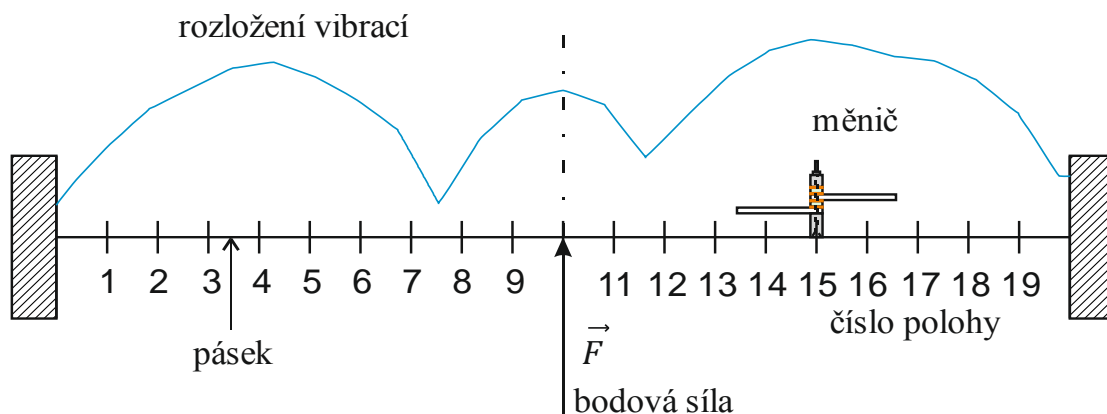
Cílem měření bylo ověřit výsledky simulací ASAC, popsané v kapitole 5.4, měřením hladiny akustického tlaku 0,5 m, kolmo nad středem pásku s měničem v silové a momentové konfiguraci. Přípravek, ve kterém byl pásek uchycen, považujeme za tuhý a vzhledem k rozměrům pásku dostatečně velký, aby byly splněny předpoklady pro použití Rayleighova integrálu. Všechna měření byla měřena v akustické komoře kvůli zvýšení odstupu měřeného signálu od šumu. Na následujícím obrázku je blokové schéma všech následujících měření, která se liší jen polohou měniče a použitými budicími signály. Postup měření je znázorněn v bodech 2 až 3 blokového schématu na obrázku 4.1.



Obrázek 7.1 Blokové schéma měření vlastností měniče v akustické komoře

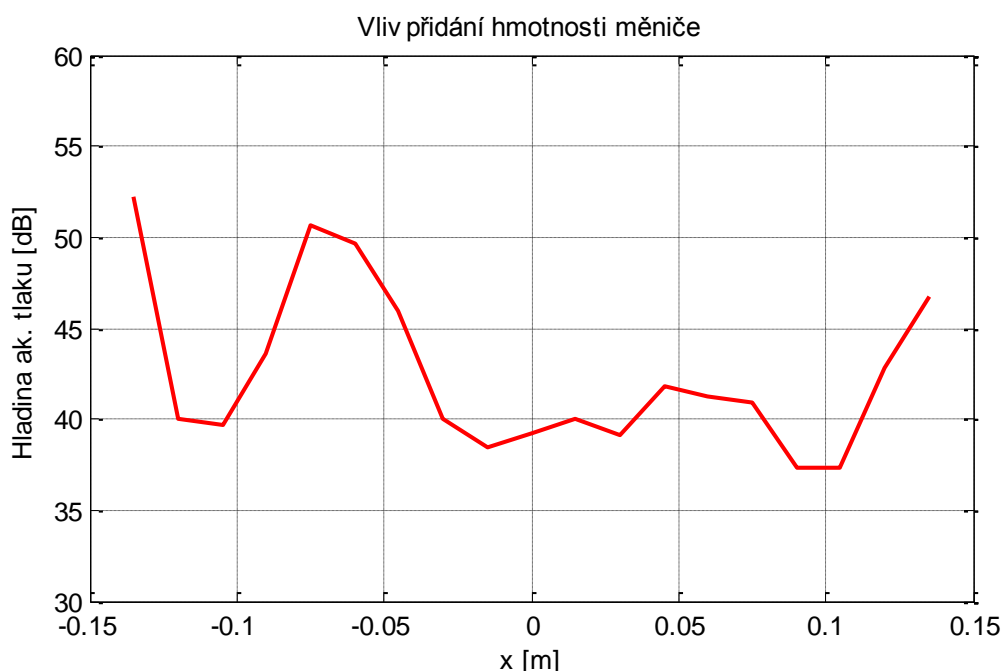
Měření probíhala postupně v 19 bodech umístění měniče znázorněných na obrázku 7.2, rovnoměrně rozložených na pásku s rozstupem 1,5 cm, přičemž v 10. poloze ve středu pásku měnič nemohl být umístěn z důvodu umístění šroubu primárního buzení.

Tento rozestup nebyl volen náhodně, ale tak, aby bylo měřeno co nejlíže kmiten i uzlů. Měřicích bodů nemohlo být zvoleno příliš mnoho, protože je měnič na pásku připevněn pomocí vteřinového lepidla, a častým přelepováním a očišťováním může dojít k deformaci pásku nebo poškození měniče. V takovém případě by bylo nutné měřenou strukturu vyměnit za novou, která by měla jiné parametry a veškerá předcházející měření by se musela opakovat od začátku.



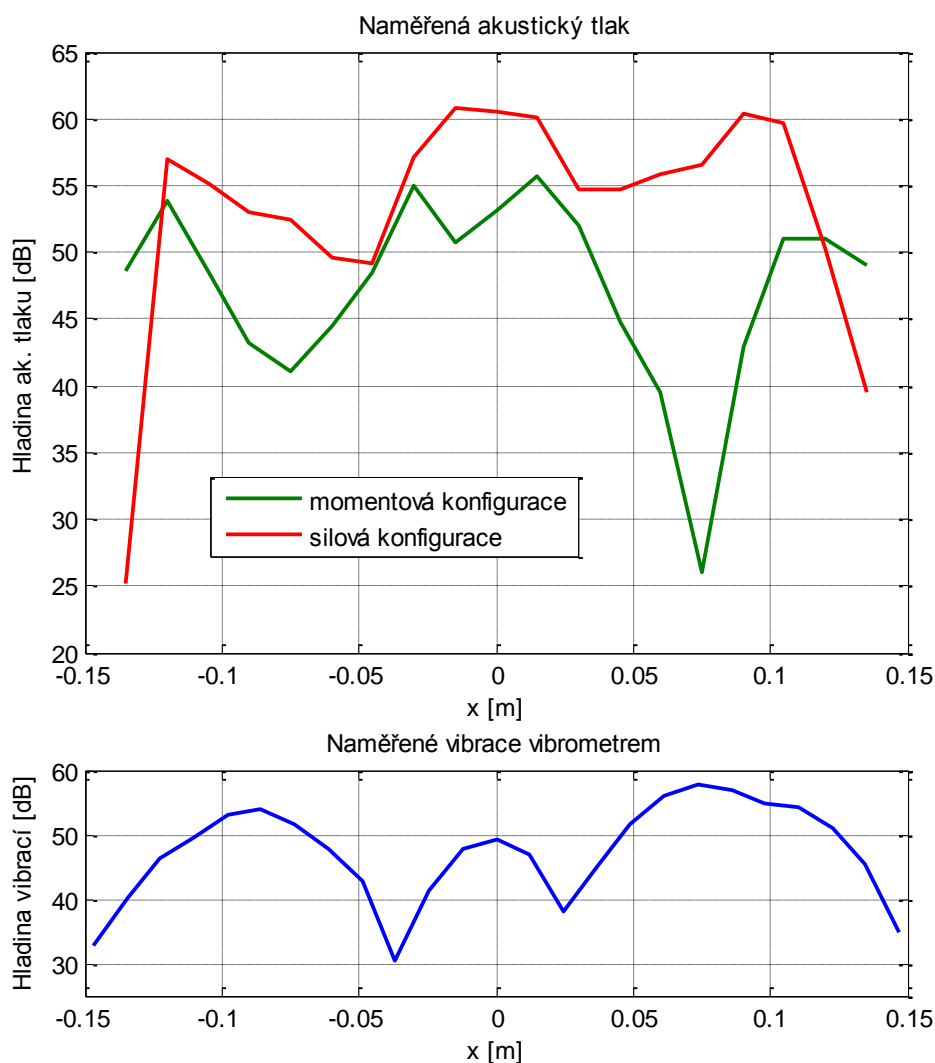
Obrázek 7.2 Polohy umístění měniče

Nejprve se změřilo, jak ovlivní měřenou strukturu samotné umístění měniče v daném bodě měření hladiny akustického tlaku při působení pouze primárního buzení. Výsledek tohoto měření je zobrazen na následujícím obrázku 7.3.



Obrázek 7.3 Vliv přidání hmotnosti měniče na akustický tlak vyzářený páskem při pouze primárním buzení

Poté se změřilo při vypnutém primárním buzení, jak je schopen strukturu vybudit samotný měnič. Nejprve pracoval měnič v režimu silovém a poté v režimu momentovém. Důležité je, že ve všech bodech byly příkony buzení měniče konstantní. Tím bylo zajištěno, že výsledky měření byly ovlivněny pouze změnou polohy měniče. Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny na grafu 7.4.



Obrázek 7.4 Závislost vybuzeného akustického tlaku na poloze měniče

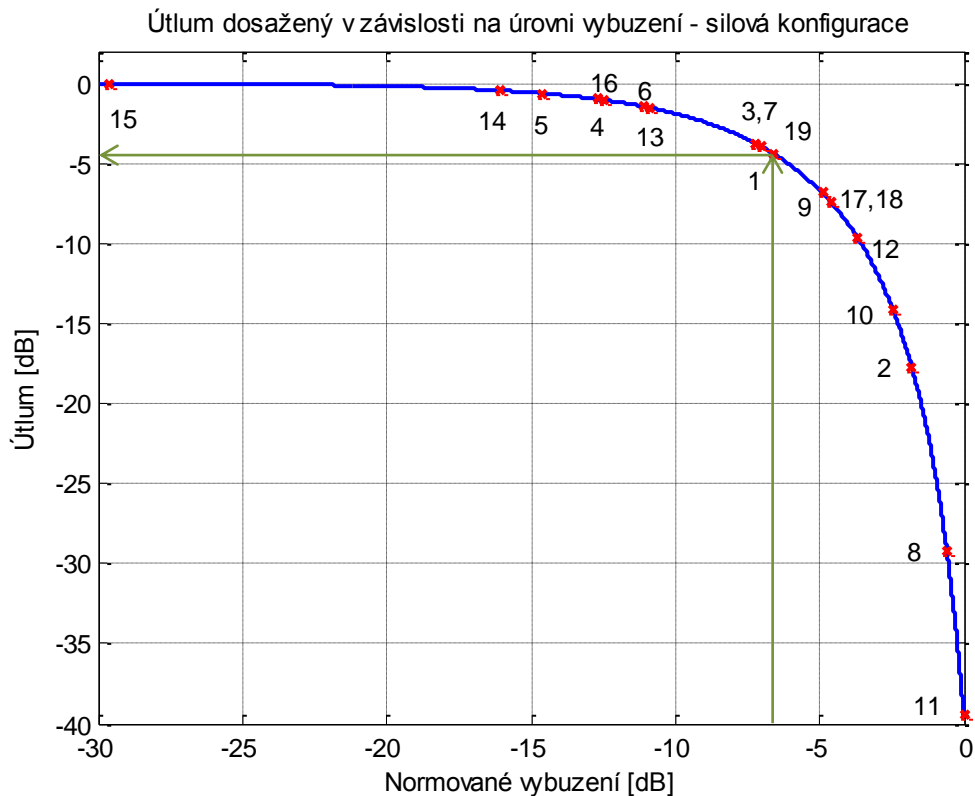
Hladina akustického tlaku vybuzená páskem bez přilepeného měniče byla 54,9 dB. Z grafu 7.3 je tedy patrné, že samotné připevnění měniče vyvolalo pasivní útlum cca 10 až 15 dB. Větší pasivní útlum byl naměřen v okolí kmiten, což odpovídá předpokladům.

V grafu jsou vyneseny hladiny akustického tlaku vybuzeného měničem v režimu silovém a momentovém, dále je ve spodní části znázorněna hladina efektivní hodnoty rychlosti kmitání na měřeném pásku pro vybraný mód viz měření vibrometrem (6.3). Na grafu je názorně vidět, že momentový měnič vybudil pásek méně v kmitnách, což se

předpokládalo. Obdobně silový měnič vybudil více v kmitnách a méně v uzlech. Téměř ve všech bodech, kromě krajních uzlových poloh, vybudil strukturu při stejném příkonu více silový měnič.

7.1.1 Teoreticky dosažitelný útlum při konstantní úrovni buzení

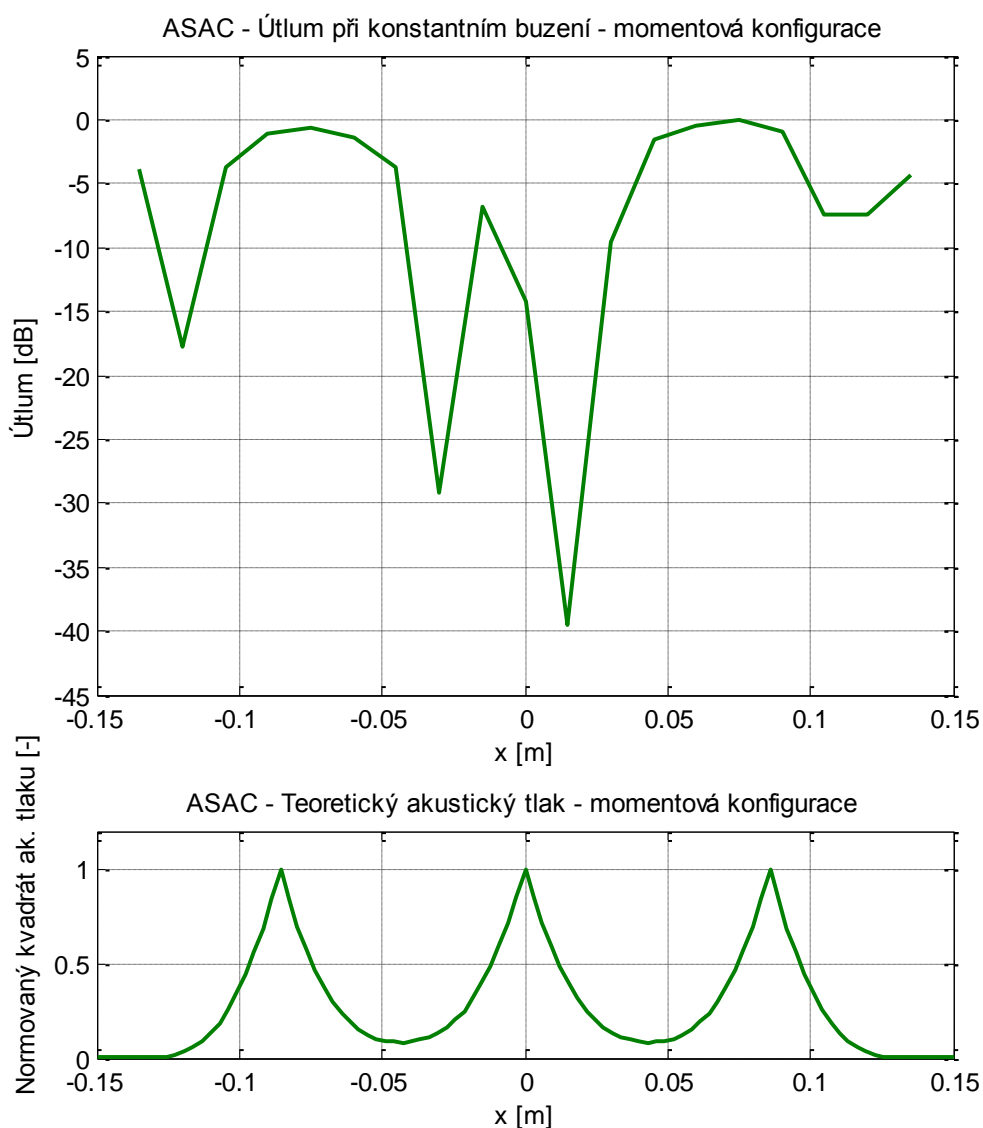
Na následujících grafech je znázorněn teoretický útlum dosažitelný měničem v dané konfiguraci při konstantní úrovni buzení. Hodnoty útlumu v každém bodě měření byly vypočteny dle následujícího postupu. Nejprve byla provedena korekce hodnot vybuzení, znázorněná na obrázku 7.4 dle vlivu přidání hmotnosti měniče, znázorněné na obrázku 7.3, tím byly získány korigované hodnoty vybuzení. Tyto korigované hodnoty byly normovány tak, že maximální hodnota korigovaného vybuzení byla rovna 0 dB, tím vznikly normované hodnoty vybuzení. Byl nasimulován graf závislosti útlumu dvou signálů na relativní úrovni druhého signálu při vlivu exponenciálního filtru s časovou konstantou $\tau = 1/16$ s zobrazen na obrázku 7.5.



Obrázek 7.5 Graf útlumu dvou stejných signálů v závislosti na relativní úrovni druhého signálu

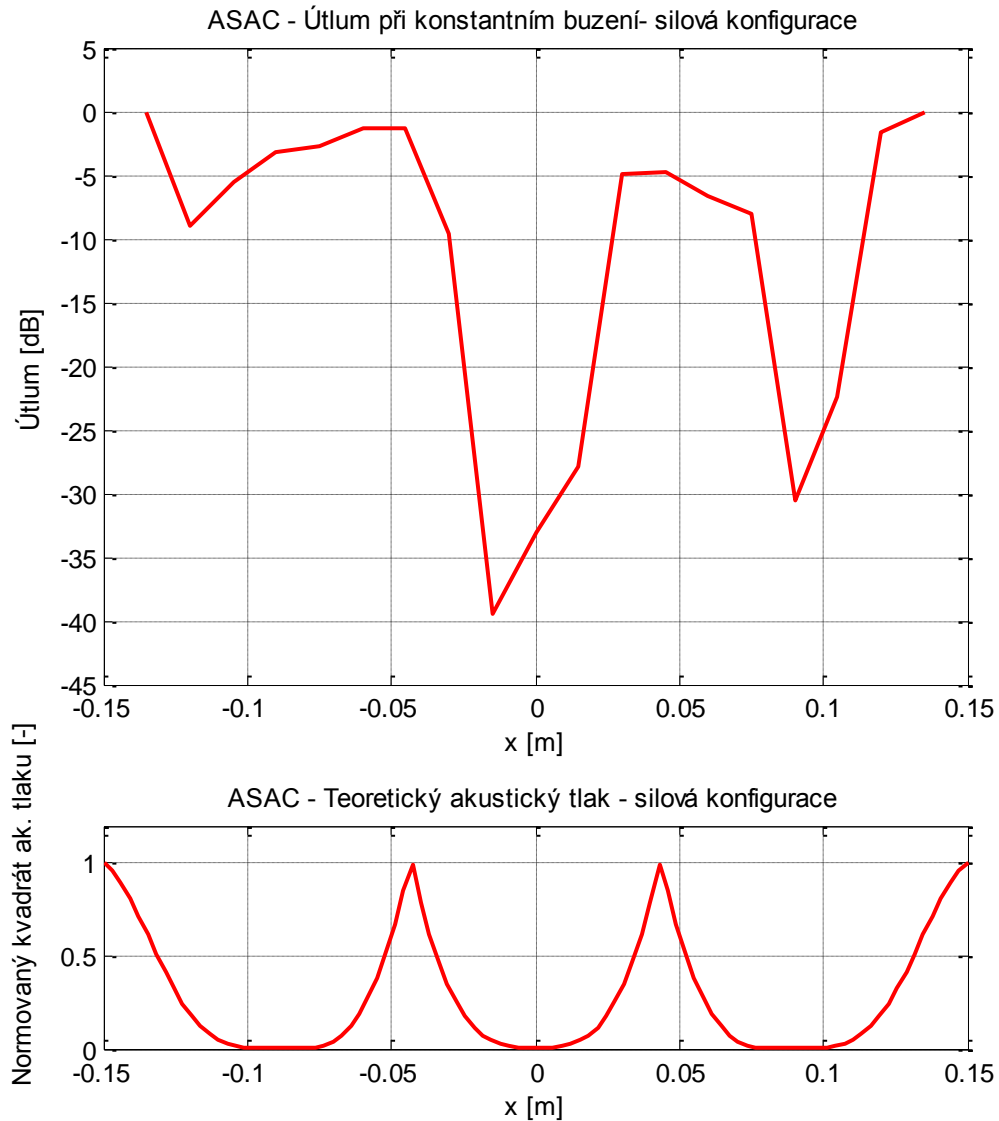
V tomto grafu je znázorněno zelenými šipkami způsob odečtu hodnoty útlumu z hodnot normovaného vybuzení. Čísla u grafu označují body, ve kterých byly měřené hodnoty. Na obrázku 7.5 jsou také červeně vyznačeny hodnoty odpovídající konkrétním hodnotám pro silovou konfiguraci měniče.

Tento postup byl aplikován nejprve na momentovou konfiguraci měniče a poté na silovou. Výsledkem jsou následující grafy 7.6 a 7.7, na kterých je názorně vidět, jaký by byl dosažený útlum při konstantním buzení v závislosti na umístění měniče. Pro porovnání je ve spodní části zobrazen výsledek simulace stejného případu.



Obrázek 7.6 Dosažitelný útlum akustického tlaku pro momentovou konfiguraci

Z grafu 7.6 je patrné, že tvarem přibližně odpovídá dopočtený útlum v horní části grafu simulaci stejného případu ve spodní části. V místech odpovídajících uzlům je útlum maximální a v kmitnách minimální, což odpovídá předpokladům pro momentový měnič



Obrázek 7.7 Dosažitelný útlum akustického tlaku pro silovou konfiguraci

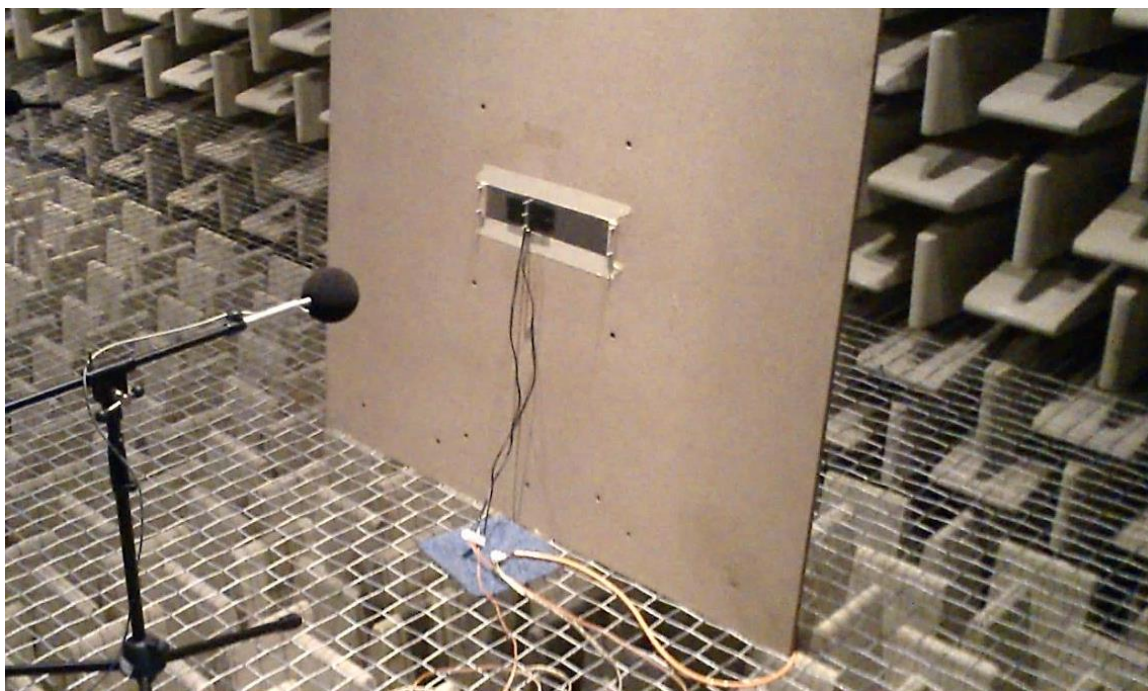
Z grafu 7.7 je patrné, že obdobně jako u předchozího grafu 7.6 tvarem přibližně odpovídá dopočtený útlum v horní části grafu simulaci stejného případu ve spodní části, kromě levé části, která je značně zkreslená vlivem změn vlastností pásku v důsledku přidání hmotnosti měniče zobrazeném v grafu znázorněném na obrázku 7.3. Průběhy nelze přímo porovnávat skrze hodnoty, protože v horní části je vyneseno útlum v dB a ve spodní části je normovaný akustický tlak. V místech odpovídajících kmitnám je útlum maximální a v uzlech minimální, což odpovídá předpokladům pro silový měnič.

Tím, jak má průběh z obrázku 7.5 ostré minimum, dojde k tomu efektu, že v bodech mimo maximální hladinu akustického tlaku grafu 7.4 je přepočtený útlum malý. Vzhledem k nejistotě měření, způsobené nejen upevněním měniče, je nutné se na grafech 7.6 a 7.7, v jejich horních a spodních částech zaměřit na místa maximálních útlumů.

7.2 Základní nastavení úrovní

Celé měření probíhalo v bezodrazové komoře, aby se neprojevil vlastnosti místnosti, a aby došlo ke zvýšení odstupů měřeného signálu od šumu pozadí. Je nutné nastavit úroveň primárního zdroje do „rozumných“ mezí. Tedy nastavit takovou úroveň primárního buzení, aby celé měření bylo dostatečně nad hlukem pozadí (pozadí v komoře na frekvenci 128Hz cca 10 dB). Současně je ale nutné vzít v úvahu omezený výkon měniče. Tato úroveň byla nastavena tak, že byla v komoře naměřena hladina akustického tlaku přibližně na 55 dB ve vzdálenosti mikrofonu 50 cm od zdroje.

Po nastavení úrovně primárního buzení bylo také nutné nastavit základní úroveň signálu pro měnič tak, aby vybudil také přibližně stejný tlak jako primární zdroj. Na rozdíl od předchozích projektů bylo rozhodnuto, že se pro primární zdroj i měnič použijí jednokanálové zesilovače VINCENT SP 997 s konstantním zesílením, takže nastavení úrovní neprobíhalo pomocí nastavení zesílení na zesilovači, ale pomocí úrovní generovaných signálů. Tím se dosáhlo opakovatelnosti měření.



Obrázek 7.8 Měření útlumu v bezodrazové komoře

7.3 Nalezení optimálního fázového posuvu sekundárního signálu vůči primárnímu zdroji

Pro navazující krok je třeba zjistit, při jakém fázovém posuvu primárního zdroje vůči měniči dochází k největšímu útlumu. Protože pro momentový i silový měnič jsou fázové posuvy různé, musí se provést měření pro obě konfigurace. Jsou generovány 3 signály, podle vzorců:

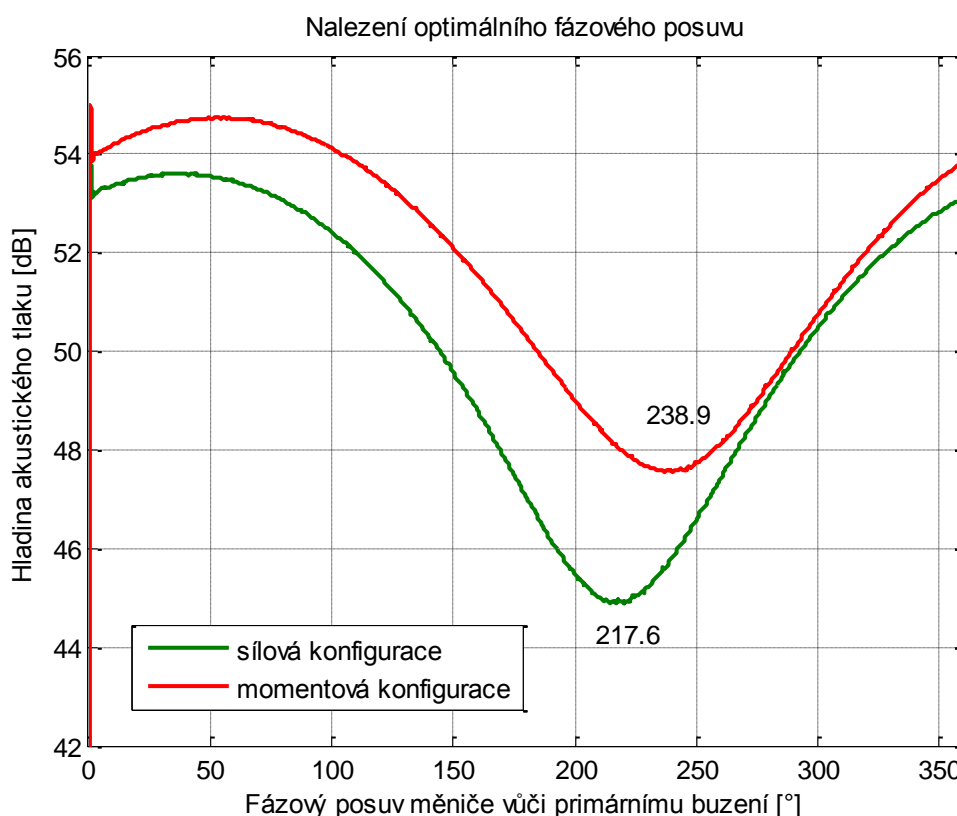
Primární signál $S_1(t) = \sin(\omega t)$, sekundární signály pro měnič

momentový $S_2(t) = -S_3(t) = \sin(\omega t + \varphi(t))$

a pro měnič silový $S_2(t) = S_3(t) = \sin(\omega t + \varphi(t))$,

kde $\varphi(t) = t \cdot \left(\frac{2\pi}{\text{doba měření}}\right)$, doba měření = 90s.

Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny na následujícím grafu 7.9, ze kterého lze odečíst minima pro měnič v momentovém i silovém režimu. U minim průběhu jsou vypsány hodnoty fázových posuvů ve stupních, ve kterých došlo k minimální hladině akustického tlaku.



Obrázek 7.9 Nalezení optimálních fázových posuvů s jejich číselným vyjádřením v příslušných polohách

7.4 Nalezení optimálních úrovní

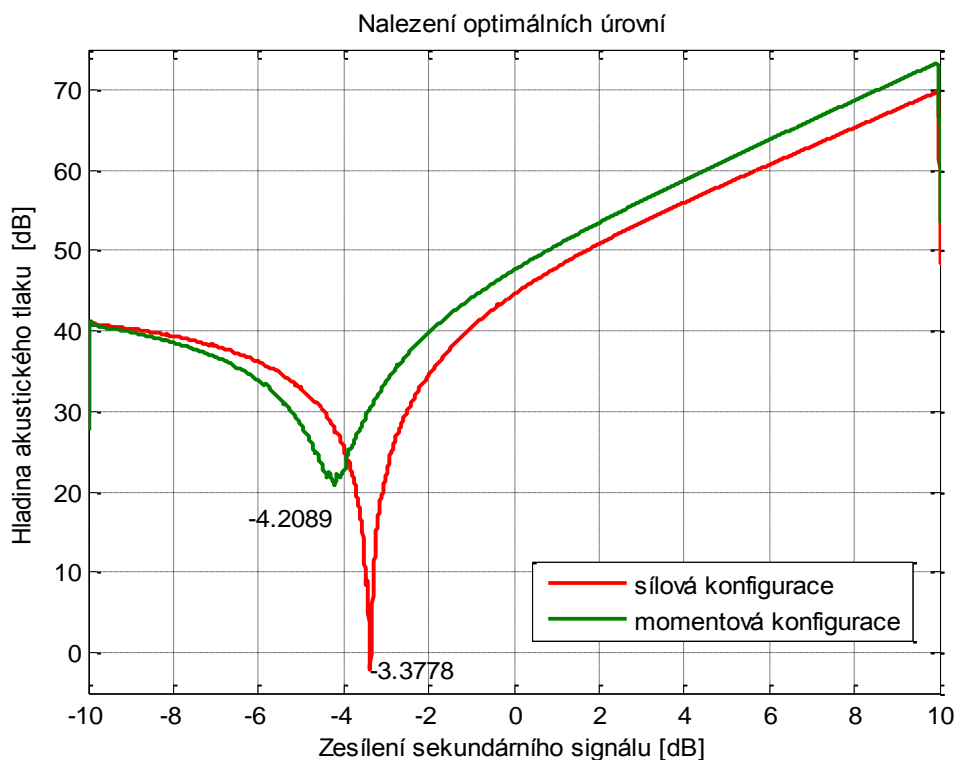
V tomto kroku je třeba upřesnit úroveň sekundárního signálu pro měnič. Signály jsou generovány podle vzorců:

$$\text{Primární signál } S_1(t) = A \cdot \sin(\omega t),$$

$$\text{pro momentový } S_2(t) = -S_3(t) = B(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi_m),$$

$$\text{pro silový } S_2(t) = S_3(t) = B(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi_s),$$

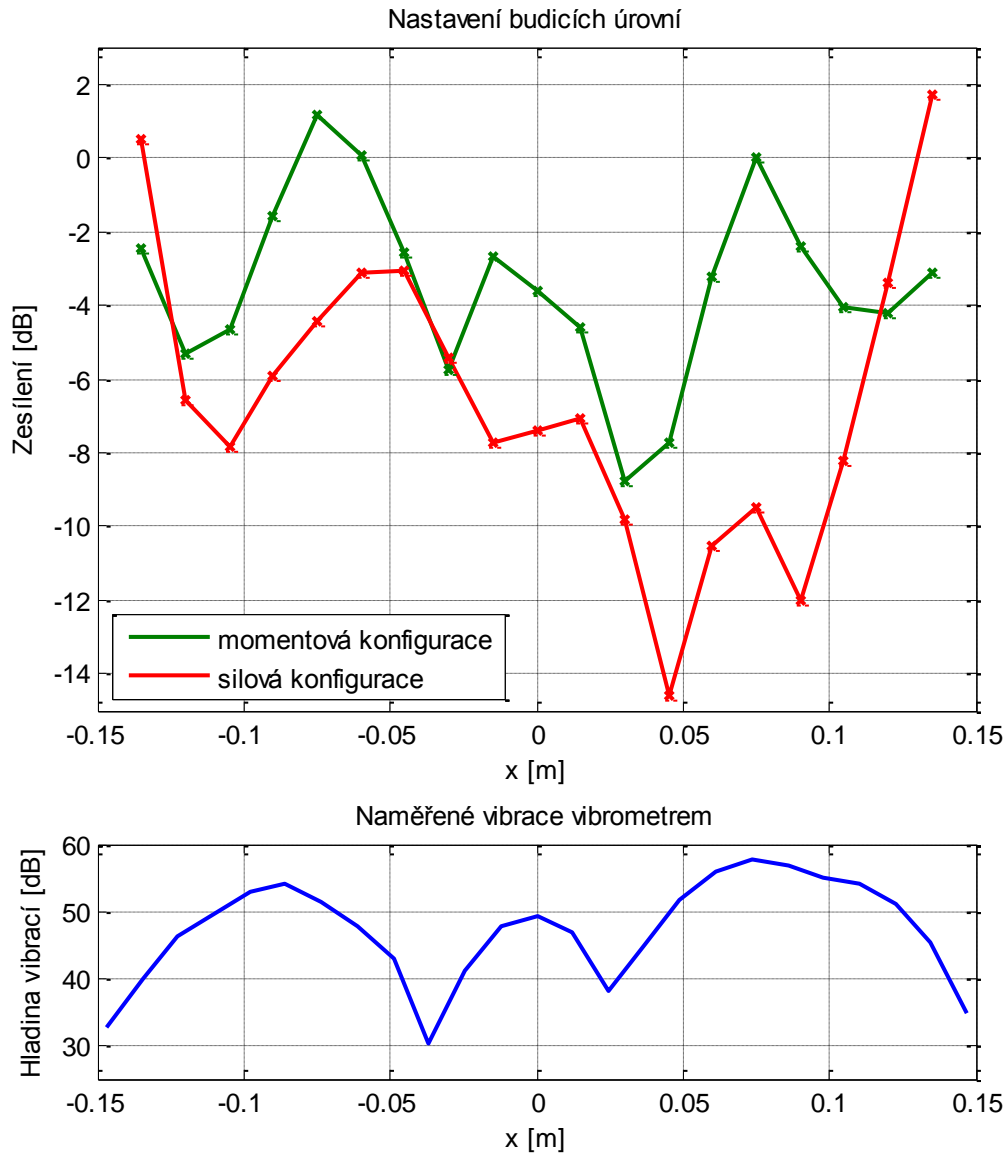
kde $A = \text{konst}$, $B(t)$ je řídicí úroveň sekundárního signálu v čase, $\varphi_m = \text{konst}$, $\varphi_s = \text{konst}$, doba měření 90 s. Výsledek tohoto měření je zobrazen na grafu 7.10. Oproti projektu 2 se měnilo zesílení sekundárního a ne primárního buzení, což lépe odpovídá reálnému použití, kde se úroveň primárního buzení regulovat nedá. Zesílení bylo generováno symetricky od $-B_1$ do B_1 dB, kde B_1 znamenalo odchylku od původní úrovně. Tuto odchylku bylo žádoucí nastavit co nejmenší, aby bylo nalezení optimální úrovně co možná nejpřesnější. Na začátku byla nastavena na 6 dB. Na následujícím grafu je zobrazen průběh jednoho měření v bodě 18 (12 cm od středu pásku). V grafu jsou u minim zobrazeny hodnoty zesílení sekundárního signálu v dB, které budou potřeba pro další měření. Zesílení 0 dB odpovídá původní úrovni, která byla nastavena v bodě 7.2 a se kterou bylo měřeno v kapitole 7.3.



Obrázek 7.10 Nalezení optimálních úrovní

7.5 Výsledky pro všechny polohy

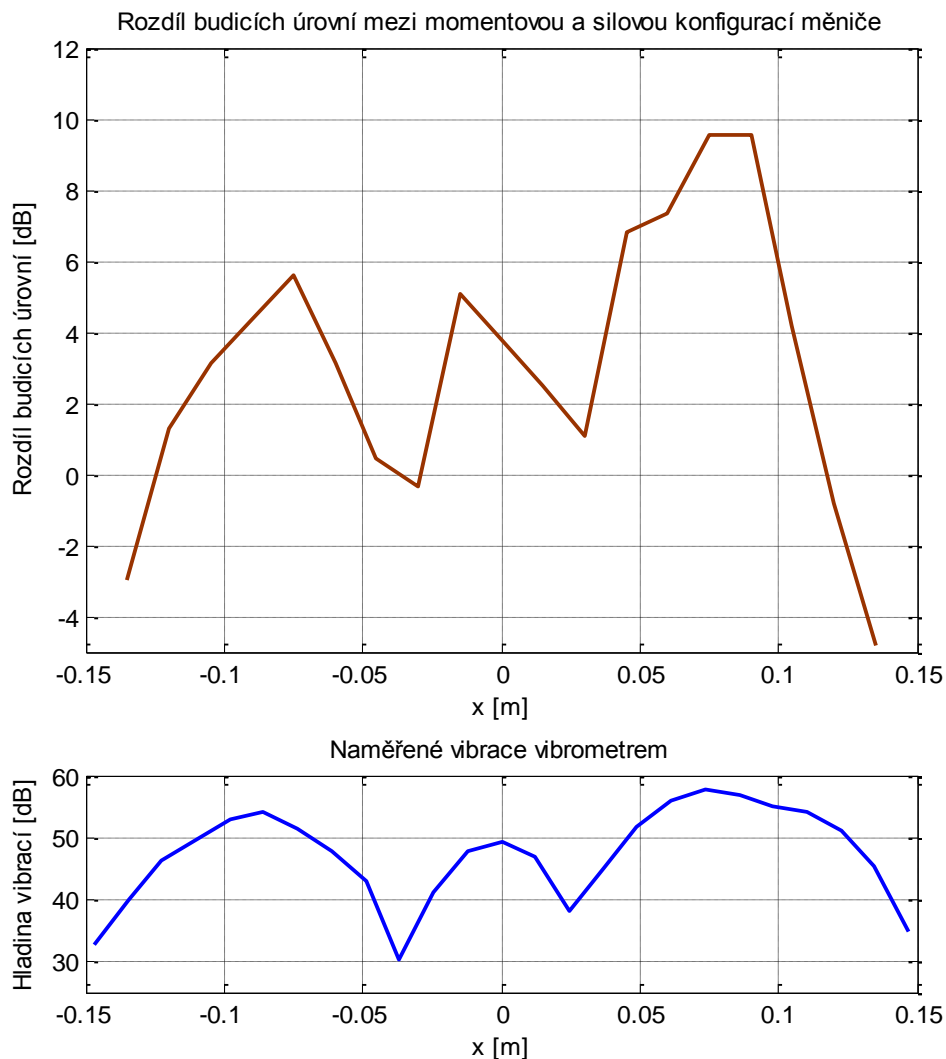
Měření popsané v předchozí podkapitole se opakovalo ve všech bodech umístění měniče znázorněných na obrázku 7.2 a ze získaných hodnot byl vytvořen následující graf 7.11, který je ve spodní části pro porovnání doplněn měřením rozložení vibrací na pásku pomocí laserového vibrometru.



Obrázek 7.11 Budicí úrovně

Z grafu lze odvodit obdobné závěry jako z obrázku 7.4 a to, že momentový měnič je třeba vybudit nejméně v uzlech, což se předpokládalo. Obdobně silový měnič potřebuje nejméně energie k vybudení v kmitnách. Potvrzuje se tím, že pro dosažení maximálního útlumu, téměř ve všech polohách, kromě krajních uzlových poloh, stačí budit měnič v silovém režimu menší energií. Rozdíl mezi budicí úrovní potřebnou pro dosažení

maximálního útlumu mezi momentovou a silovou konfigurací měniče je znázorněn na obrázku 7.12.



Obrázek 7.12 Rozdíl budících úrovní potřebný k dosažení maximálního útlumu mezi momentovou a silovou konfigurací měniče

Vyjádřením rozdílu budících úrovní se eliminuje vliv přidání hmotnosti měniče na hladinu vyzářeného akustického tlaku páskem, zobrazený na obrázku 7.3. Na grafu 7.12 je názorně vidět, že průběh rozdílu budících úrovní téměř odpovídá svým tvarem průběhu rozložení vibrací naměřených vibrometrem. Také je patrné, že měnič v momentovém režimu má v krajních uzlech lepší a v uzlech v prostředních srovnatelnou účinnost jako měnič v režimu silovém. Ve všech zbylých polohách vybudil měnič v silovém režimu větší hladinu akustického tlaku (v kmitně v pravé části pásku o 9,6 dB). Rozptyl budících úrovní potřebných k dosažení maximálního útlumu je v závislosti na umístění a typu měniče cca 15 dB. Také z tohoto grafu byly vybrány pozice, ve kterých bylo nejzajímavější provést analýzu následujícího měření.

8 Měření obecných silovo-momentových konfigurací

V předchozím bodu byly naměřeny relativní úrovně signálu primárního buzení, při kterých docházelo k největšímu útlumu. Pro tyto úrovně jsou vygenerovány signály dle vzorců:

$$\text{Primární signál } S1(t) = A \cdot \sin(\omega t),$$

$$\text{signály pro strany měniče } S2(t) = B \cdot \sin(\omega t + \varphi_1(t) + \varphi_2(t)),$$

$$S3(t) = B \cdot \sin(\omega t + \varphi_1(t) - \varphi_2(t)),$$

kde $\varphi_1(t) = t \cdot \left(\frac{2\pi}{\text{doba měření}}\right)$, $\varphi_2(t) = t \cdot \left(\frac{2\pi}{5}\right)$, A , B - koeficienty upravující poměr amplitud. Popsáno slovy, každých 5 s se měnič změní ze silového na momentový a během celé doby měření (360 s) se postupně mění fázový posuv pomyslného středu měniče vůči primárnímu buzení. Přičemž koeficienty A a B byly dopočítány na základě hodnot získaných měření optimálních úrovní popsaném v kapitole 7.4.

Výsledkem měření jsou níže uvedené grafy 8.1, 8.2 a 8.3, na kterých jsou zobrazeny útlumy v závislosti na fázovém posuvu měniče vůči primárnímu buzení. Na grafu jsou u lokálních minim vypsány koeficienty od 0 do 1, které znamenají poměr mezi momentovým a silovým režimem měniče. Vyjádřeno slovy, 0 znamená momentová konfigurace, 1 silová konfigurace a 0,5 je mez, kdy je měnič v obecném režimu. V grafech jsou zdánlivě dva průběhy, ale nejedná se o dvě různá měření. Červený průběh je průběh měření v rozsahu 180 - 360° posunutý o 180° tak, že se průběhy překrývají. Dále jsou v grafu u lokálních minim červené a zelené značky, kde zelené reprezentují stav, když byl měnič spíše v momentovém režimu a červené spíše v silovém. Tyto značky jsou pomůckou pro rychlejší orientaci v naměřených hodnotách.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny výsledky měření ve vybraných polohách umístění měniče, které reprezentují nejnázornější výsledky. Umístění poloh, ve kterých bylo měřeno je zobrazené na obrázku 7.2. Ten je doplněn rozložením vibrací, získaným z měření vibrometrem, ze kterého jsou patrná umístění kmiten a uzlů.

8.1 Poloha 8 (uzel)

V této poloze je měnič umístěn ve vzdálenosti 3 cm od středu pásku, tedy cca 0,75 cm od uzlu. Poloha byla vybrána na základě vyhodnocení grafu 7.11, protože zde byly nejmenší rozdíly mezi optimální úrovní pro měnič v silové a momentové konfiguraci. Současně zde měly dle grafu 7.4 obě konfigurace téměř stejný vybuzený akustický tlak.

Výsledky měření jsou znázorněny na obrázku 8.1. Je vidět, že pro optimalizace momentem i silou vychází velmi podobný útlum, nezávisle na tom, čím bylo optimalizováno. Také je z grafů patrné, že k největším útlumům došlo v čistě momentové i čistě silové konfiguraci měniče nezávisle na metodě optimalizace úrovně. V obecné konfiguraci měniče při koeficientu 0,5 měnič netlumil, ale zvyšoval hladinu akustického tlaku v místě chybového mikrofону. Absolutní hodnoty maximálně dosažených hodnot útlumu nelze porovnávat, protože již byla hladina akustického tlaku při měření příliš blízko úrovni šumu pozadí.

8.2 Poloha 5 (kmitna)

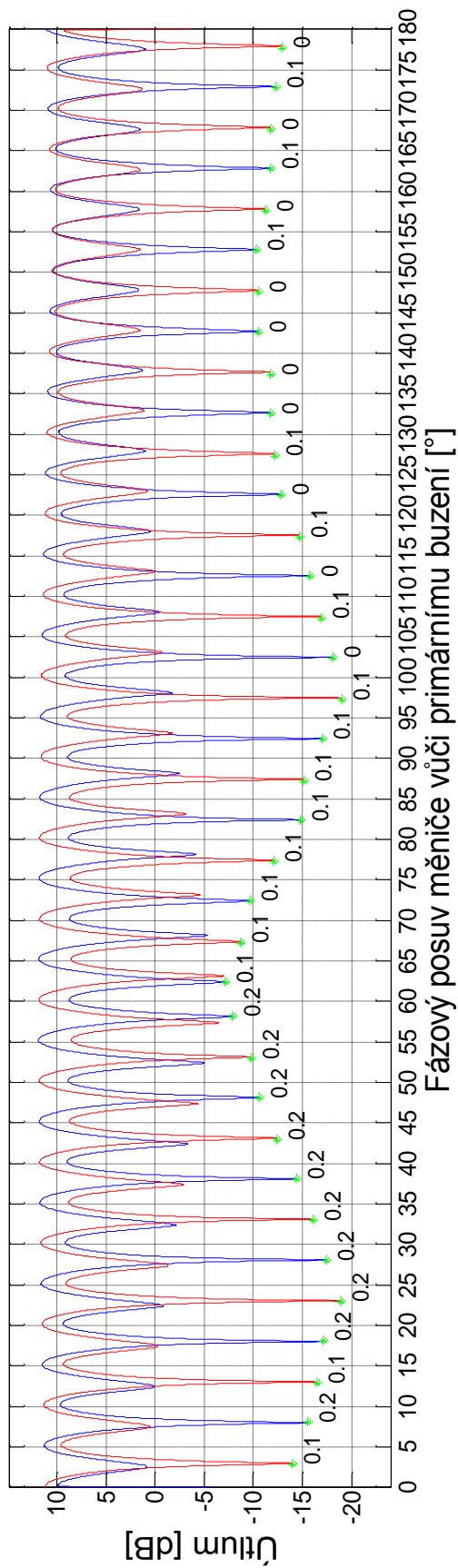
V této poloze je měnič umístěn ve vzdálenosti 7,5 cm od středu pásku, tedy v $\frac{1}{4}$ pásku, tato poloha odpovídá kmitně. Výsledky měření jsou znázorněny na obrázku 8.2. Zde byla pro silovou konfiguraci měniče při silové metodě optimalizace dosažena hladina akustického tlaku v komoře srovnatelná s úrovní okolního šumu. Také všechna lepší minima byla dosažena v silovém režimu. Z měření s momentovou optimalizací úrovně vyplývá že, i když byl měnič vybuzen úrovní přibližně o 6 dB větší než při optimalizaci silové, stejně se nepodařilo dosáhnout uspokojivých hodnot útlumů. Zajímavé dále je, že maximálních útlumů bylo dosaženo téměř nezávisle na fázovém posuvu měniče vůči primárnímu buzení a všechny byly v momentovém režimu. V obecném režimu měniče při koeficientu 0,5 bylo dosaženo lokálního minima pouze pro silovou optimalizaci úrovně odpovídající poloze, přičemž byl dosažený útlum 6,2 a 6,4 dB.

8.3 Poloha 19 (krajní poloha - uzel)

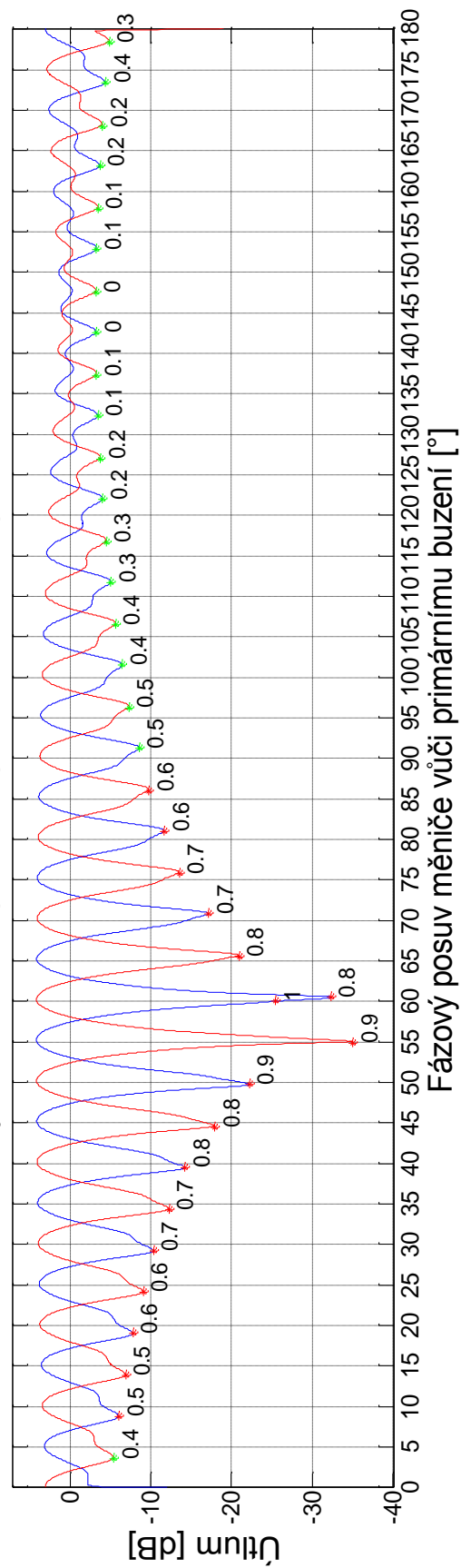
V této poloze je měnič umístěn ve vzdálenosti 12 cm od středu, tedy 1,5 cm od kraje pásku, který lze považovat za kmitnu. Poloha byla vybrána na základě vyhodnocení grafů 7.4 a 7.11, protože zde byla vybuzená hladina akustického tlaku měničem v momentovém režimu větší než v silovém a obdobně zde tedy byla při momentové optimalizaci nižší úroveň buzení než při silové (přibližně o 5 dB). Výsledky zde dosažené jsou zobrazeny na obrázku 8.4 a mají obdobný charakter jako výsledky měření v bodě 5 (kmitně). Z měření

se silovou optimalizací úrovně vyplývá že, i když byl měnič vybuzen úrovní přibližně o 6 dB větší než při optimalizaci momentové, stejně se nepodařilo dosáhnout uspokojivých hodnot útlumů. Zajímavé opět je, že maximálních útlumů bylo dosaženo téměř nezávisle na fázovém posuvu měniče vůči primárnímu buzení a všechny byly v silovém režimu. V obecném silovo-momentové režimu měniče při koeficientu 0,5 bylo dosaženo lokálního minima pouze pro momentovou optimalizaci úrovně odpovídající poloze, přičemž byl dosažený útlum 6,3 a 8,1 dB.

Výsledné měření přeladění poloha-5 - momentová optimalizace

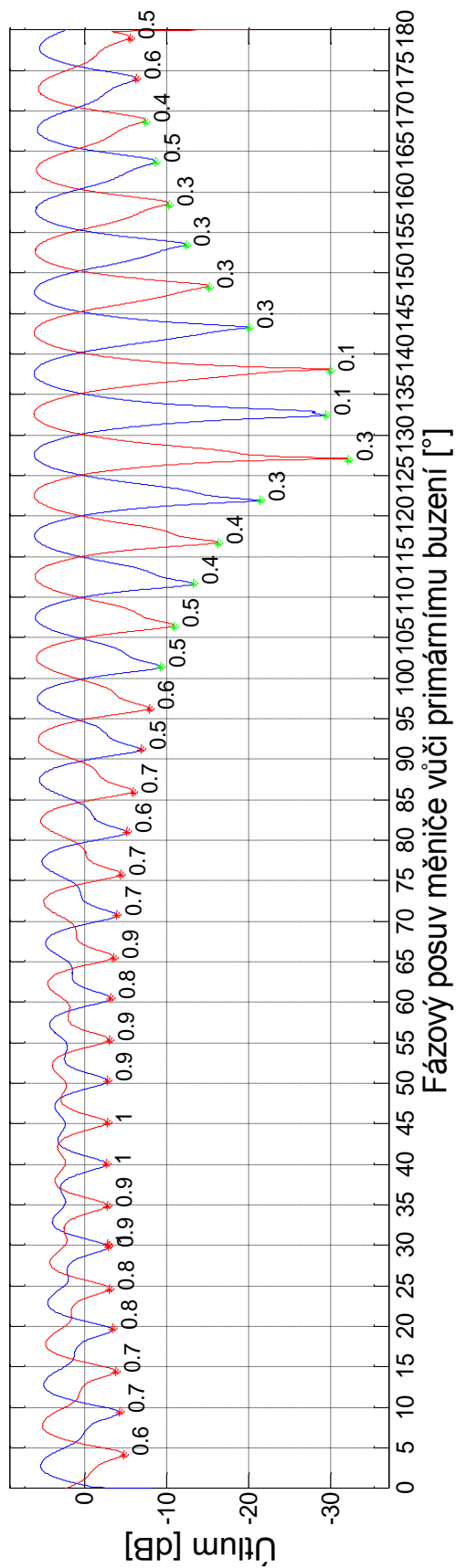


Výsledné měření přeladění poloha-5 - silová optimalizace

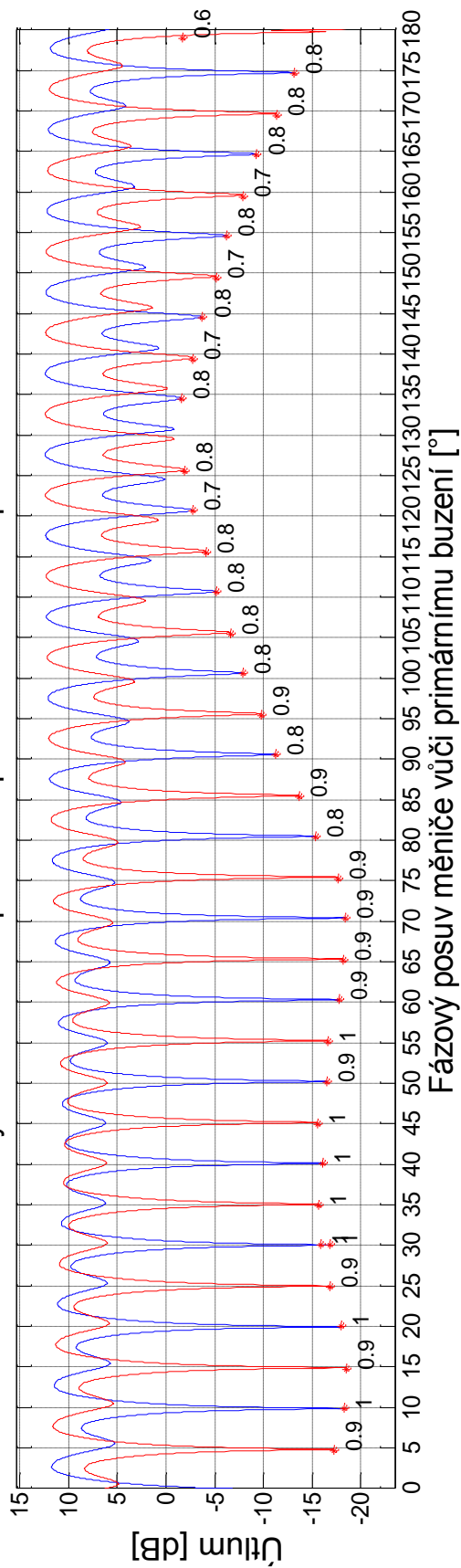


Obrázek 8.2 Výsledné měření poloha 5

Výsledné měření přeladění poloha-19 - momentová optimalizace



Výsledné měření přeladění poloha-19 - silová optimalizace



Obrázek 8.3 Výsledné měření poloha 19

9 Závěr

V rámci diplomové práce se mi podařilo splnit všechny body zadání.

Navrhl jsem a zkonstruoval kombinovaný dvoukanálový měnič pro systémy aktivního snižování vyzařovaného zvuku (ASAC). Sestavil jsem konstrukci, na které byl kombinovaný měnič v rámci diplomové práce testován. Konstrukci jsem vyrobil tak, aby odpovídala teorii vetknutého nosníku a změřené vlastnosti sestavené konstrukce jsem porovnal s teoretickými. Změřené výsledky odpovídají simulacím.

Pro vybranou konstrukci jsem navrhl metodiku pro měření vlastností kombinovaného měniče pro systémy aktivního snižování vyzařování zvuku. Základní parametry byly nejprve nasimulovány a poté měřením ověřeny.

Měřením se prokázalo, že použití měniče v silovém režimu je obecně energeticky méně náročné. Současně měnič v silovém režimu není tolik náchylný na přesnost umístění. Měnič v momentovém režimu dosahoval lepších výsledků hlavně u okrajů pásku.

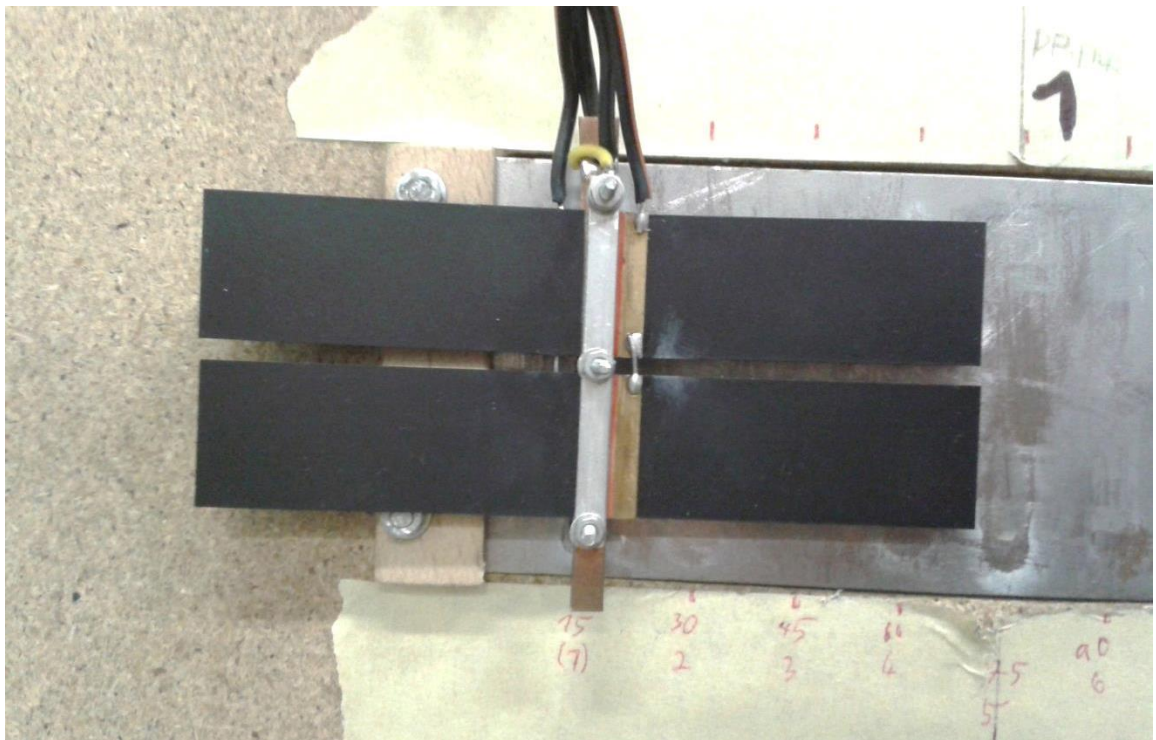
Měřením jsem ověřil, že při dané konfiguraci metody bylo dosaženo nejvyšších útlumů při režimu měniče odpovídajícímu metodě optimalizace úrovně signálu. Při měření bylo dosaženo útlumů řádově 35 až 40 dB. Útlumy byly až na hranici hluku pozadí, teoreticky je tedy možné dosáhnout útlumů větších.

Pro další vývoj by bylo vhodné vyzkoušet kombinovaný měnič v systému aktivního potlačování vyzářeného hluku s použitím vícekanálové řídicí jednotky, protože měnič je vhodný pro využití současného tlumení více módů, přičemž v módu, kde je třeba tlumit větší úrovně, by měl pracovat v režimu silovém, a v módu s nižšími úrovněmi může pracovat v režimu momentovém nebo režimu obecném. Tímto by se přiblížil systém s využitím kombinovaného měniče využití v praxi.

10 Literatura

- [1] Nový, R.: *Hluk a chvění*, vyd. 1., ČVUT Praha 1995. ISBN 80-01-01306-5.
- [2] ČSN EN ISO 140-5 Akustika – Měření zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách, srpen 2000
- [3] Neprůzvučnost
<http://cz.rwrockfonvia.inforce.dk/akustika/jak+funguji+akustické+regulátor+y/zvuková+neprůzvučnost> [online]. [cit. 2014-10-8]. Dostupné z: 8.10.2014
- [4] Carneal, J. P., Fuller, C. R.: *An analytical and experimental investigation of active structural acoustic control of noise transmission through double panel systems*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal 33 1995
- [5] Fuller, C. R., Elliot, S. J., Nelson P. A.: *Active Control of Vibration*, Academic Press, London, 1997. ISBN 978-0-12-269440-4
- [6] Jandák, V.: *Aktivní snižování vyzařování zvuku z vibrujících těles*, disertační práce, ČVUT, Praha, 2012
- [7] Jiříček, O.: *Aktivní metody v akustice*, učební text, 2001
- [8] Pospíchal, V.: *Aktivní řízení průzvučnosti*, projekt 1, ČVUT, Praha, 2013
- [9] Škvor, Z : *Elektroakustika a akustika*, vyd. 1., ČVUT Praha 2012. ISBN 978-80-01-025034-7
- [10] Merhaut, J.: *Teoretické základy elektroakustiky*, vyd. 1., Academia Praha 1976. ISBN 80-01-01306-5.
- [11] Stripe actuators.
https://www.americanpiezo.com/images/stories/content_images/pdf/apc_40-2010.pdf [online]. [cit. 2014-11-10]. Dostupné z: 10.11.2014
- [12] Švec, P.: *Aktivní řízení vyzařování s využitím momentového buzení*, disertační práce, ČVUT, Praha, 2012
- [13] Pospíchal, V.: *Aktivní řízení neprůzvučnosti*, projekt 2, ČVUT, Praha, 2014
- [14] Laboratorní vibrometr
<http://www.mechatronics.cz/doku.php?id=mec:laborator:vibrometr> [online]. [cit. 2014-4-15]. Dostupné z: 15.4.2014

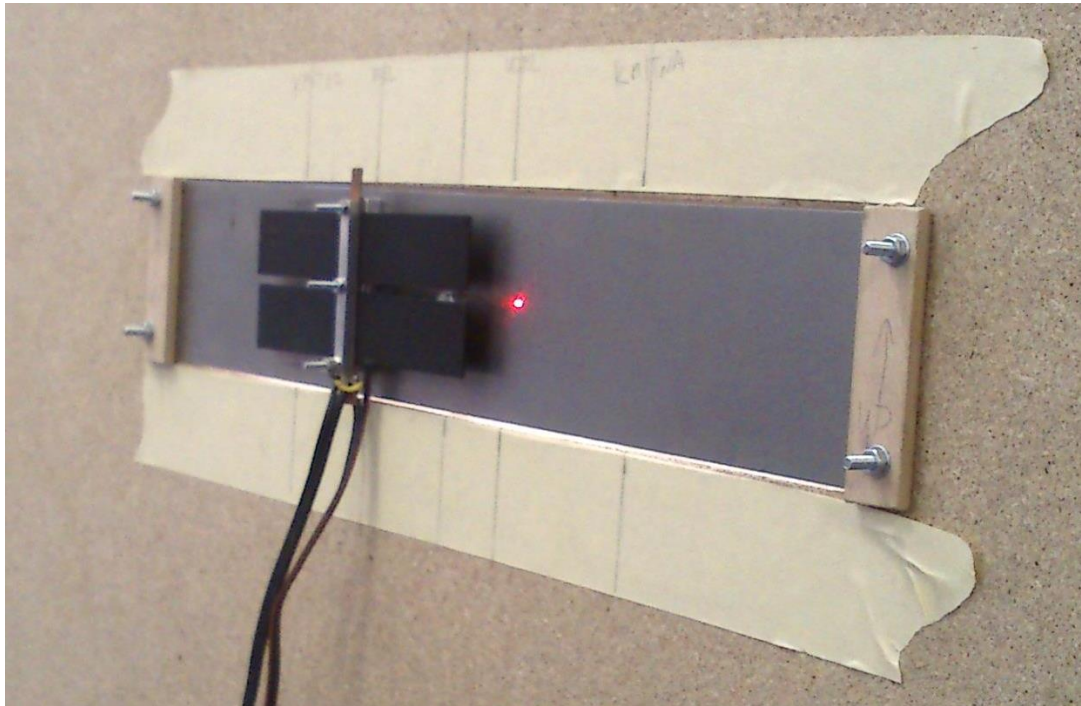
A Přílohy



Obrázek A.1 Měnič připevněný na pásek v poloze 1 (na pásku patrné zbytky po lepidle z měření ostatních poloh)



Obrázek A.2 Detail přichycení měniče v poloze 1



Obrázek A.3 Měření s měničem v kmitně pomocí laserového vibrometru



Obrázek A.4 Uchycení shakeru na výztužné konstrukci ze zadní strany pásu