

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství

Inovace experimentální části výuky Bioakustiky

Závěrečná zpráva projektu FRVŠ 2336/2010/G1

Řešitel: Ing. Michal Matug

Spoluřešitel 1: Doc. Ing. Vojtěch Mišun, CSc.

Spoluřešitel 2: Ing. Martin Vašek

Pracoviště: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Datum: Prosinec 2010

Obsah:

1 Povinné části zprávy o řešení projektu	3
1.1 Cíle řešení	3
1.2 Postup a způsob řešení	3
1.3 Změny v projektu	4
1.4 Využití finančních prostředků	4
1.5 Výsledky a výstupy řešení	4
 2 Úvod a motivace	 6
 3 Základní pojmy	 7
3.1 Vokální trakt	7
3.2 Kavity jednoduchých tvarů	7
3.3 Trubice na obou koncích otevřená	8
3.4 Trubice na levém konci uzavřená, na pravém otevřená	9
3.5 Trubice na obou koncích uzavřená	10
3.6 Kuželový tvar trubice	11
3.7 Hodnocení kavit	11
 4 Formulace problému	 12
 5 Požadavky kladené na navrhované experimentální modely	 13
5.1 Univerzální držák kavit	13
5.2 Kavity k univerzálnímu držáku kavit	13
5.3 Laditelný vokální trakt	14
 6 Ukázkové experimenty	 15
6.1 Určení akustických módů na univerzálním držáku kavit	15
6.2 Modelování formantů českých samohlásek pomocí laditelného vokálního traktu	16
 7 Závěrečné zhodnocení projektu	 17
 Publikace související s řešením grantového projektu	 17
 Literatura	 17

1 Povinné části zprávy o řešení projektu

Tato zpráva je zpracována jako závěrečná zpráva o řešení projektu FRVŠ 2336/2010/G1

1.1 Cíle řešení

Cílem projektu je doplnění experimentální části výuky Bioakustiky v rámci předmětu Vibrace a hluk. Byly navrženy a vyrobeny experimentální modely, na nichž je možno experimentálně ověřovat probíranou látku. Jednak univerzální držák jednoduchých modelů kavit a laditelný model vokálního traktu.

Na univerzálním držáku jednoduchých modelů kavit je možné provádět několik typů experimentů. Můžeme zkoumat spektrální vlastnosti (vlastní frekvence a tvary kmitů) různých tvarů kavit (válcová, kuželová, se skokovou změnou průřezu). Samozřejmě je také možné provádět experimenty, kde budou použity různé budící signály.

Laditelný model vokálního traktu slouží k názorné ukázce rozložení formantů při výkladu tvorby samohlásek.

Pro potřeby přípravy cvičení vyučujícím je připraven jednoduchý manuál ke každému z modelů. Je zde popsáno jak s modelem zacházet a jaké jsou jeho vlastnosti podstatné pro konkrétní typ experimentu. Jsou také navrženy vhodné, v průběhu cvičení časově zvládnutelné experimenty, na kterých si studenti názorně ověří teoreticky probranou látku.

1.2 Postup a způsob řešení

U obou experimentálních modelů byl proveden konstrukční návrh, a to především s ohledem na požadované vlastnosti. Řešení bylo rozděleno na několik částí:

- shromáždění důležitých požadavků, které jsou na modely kladeny
- návrh konstrukčního řešení modelu
- výpočtové ověření spektrálních vlastností modelu (netýká se univerzálního držáku)
- úpravy návrhu
- výroba modelu
- sestavení, zprovoznění, ověření modelu

U univerzálního držáku jednoduchých kavit jsou rozhodujícími parametry, hlavně maximální a minimální rozměry měřené kavity (délka, průřez) a rozměry použitého měřicího mikrofону.

Laditelný model vokálního traktu je v podstatě 2,5D (konstantní šířka kavity pro celý model) model napřímeného vokálního traktu člověka. Je u něj možné měnit příčné průřezy kavit v 10 místech po délce modelu. Návrh byl proveden tak, aby bylo možné při vhodném nastavení příčných průřezů dosáhnout rozložení vlastních frekvencí kavity shodných s formanty samohlásek *a*, *e*, *i*, *o*, *u*.

Všechny informace shromážděné během řešení jednotlivých modelů byly využity k sestavení manuálu.

1.3 Změny v projektu

V rámci řešení projektu byla provedena změna, která byla schválena prorektorem:

1) Přesun finančních prostředků

Z důvodu nedočerpání položky Služby, kde bylo původně naplánováno 15 000,- a skutečně vyčerpano pouze 500,-, bylo požádáno o převedení nedočerpaného rozdílu 14 500,- Kč do kategorie Ostatní běžné náklady.

Zdůvodnění:

Při podávání projektu jsme v dobré víře žádali o přidělení dotace na položku "Služby" ve výši 15 000,-. Ovšem z důvodů výrazného snížení výrobních nákladů a nákladů na jiné služby bylo požádáno o přesun částky 14 500,- z položky "Služby" do položky "Ostatní". Za tyto přesouvané prostředky, by byly mimo jiné k držáku kavit pořízeny kavity z čirého PMMA (plexiskla), které původně nebyly plánovány, a z důvodu průhlednosti plexiskla by výrazně zjednodušily pochopení daných experimentů a další pomůcky vedoucí k zlepšení podmínek při přípravě výuky předmětů řešených v rámci tohoto projektu.

1.4 Využití finančních prostředků

Finanční prostředky byly použity v souladu s přihláškou projektu se změnami uvedenými výše:

Náklady na řešení (zaokrouhлено na celé tis. Kč)	Dotace z FRVŠ		Příspěvek VŠ	
	poskytnuto	použito	přislíbeno	skutečnost
Kapitálové výdaje:				
Celkem	0	0	0	0
Běžné náklady:				
Odměny za řešení projektu	3	3	0	0
Stipendia	40	40	0	0
Ostatní osobní náklady	0	0	0	0
Služby	15	1	0	0
Cestovné zahraniční	0	0	0	0
Ostatní	46	60	0	0
Celkem	104	104	0	0
Celkem	104	104	0	0

Tab. 1 Náklady na řešení projektu

Všechny změny (přesuny finančních prostředků) byly schváleny prorektorem – viz kap. 1.3.

1.5 Výsledky a výstupy řešení

Výsledky řešení tohoto projektu mají přímý dopad na výuku předmětu Vibrace a hluk a vedly k doplnění výuky o experimentální úlohy v oblasti spektrálních vlastností kavit a samohlásek lidského hlasu.

Při návrhu laditelného modelu vokálního traktu byly využity algoritmy spektrálního ladění. Poznatky dále doplní a rozšíří probíranou látku v předmětu Vibrace a hluk v oblasti snižování vibrací, potažmo hluku.

Na internetových stránkách Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky <http://biomechanika.fme.vutbr.cz> v položce Studijní opory budou volně k stažení následující výstupy tohoto projektu:

- Závěrečná zpráva projektu
- Využití experimentálních modelů ve výuce předmětu Vibrace a hluk doplněné o přehledná videa popisující průběhy měření a nastavení žádaných konfigurací
- Teorie k výpočtům vlastních frekvencí kavit jednoduchých tvarů

2 Úvod a motivace

Analýza akustických kavit různých tvarů je jedním z nejdůležitějších prostředků, sloužících k odstranění problémů v oblastech snižování vibrací a hluku u strojních zařízení. V oblasti bioakustiky pak slouží například k pochopení funkce vokálního traktu při tvorbě lidského hlasu. Z těchto důvodů je vhodné teoretické základy týkající se akustických kavit různých tvarů získané na přednáškách doplnit ve cvičeních o experimentální měření, do kterých se studenti mohou aktivně zapojit.

Univerzální držák kavit výrazně usnadní obsluhu jednotlivých částí měřícího řetězce při přípravě i v průběhu experimentálního měření. Dále je samozřejmě schopen udržet stálou konfiguraci v průběhu celého měření a tím i možnost opakovat průběh měření se stejnými podmínkami. To nebylo u experimentů prováděných dosud z mnoha důvodů možné. Hlavními příčinami, které výrazně ovlivňovaly samotná měření, jsou například nutnost asistence několika osob v průběhu samotného měření, které v podstatě plnily funkce provizorních držáků jednotlivých částí měřící aparatury. Nebylo proto možné u dalších měření, které následovaly bezprostředně po sobě zajistit stejné konfigurace měřícího řetězce, jakými jsou vzdálenosti a směry jednotlivých částí vůči sobě. Navíc z důvodu průhlednosti měřených kavit mohou studenti pozorovat polohu měřícího členu v průběhu měření a tím zároveň snadněji pochopit změny v akustických charakteristikách měřených kavit například v přechodech u kavit se stupňovitým průřezem.

Laditelný model vokálního traktu může sloužit k pochopení funkce vokálního traktu při tvorbě lidského hlasu. Díky možnosti libovolného nastavení 10 pohyblivých částí modelu lze snadno v krátkém časovém okamžiku za pomoci vytvořených šablon nastavovat laditelný vokální trakt na tvary, které do jisté míry odpovídají tvarům skutečného vokálního traktu pro vyslovování základních českých samohlásek A,E,I,O,U.

Tyto vytvořené modely by měly přispět ke zkvalitnění a rozšíření experimentální části výuky předmětu Vibrace a hluk.

3 Základní pojmy

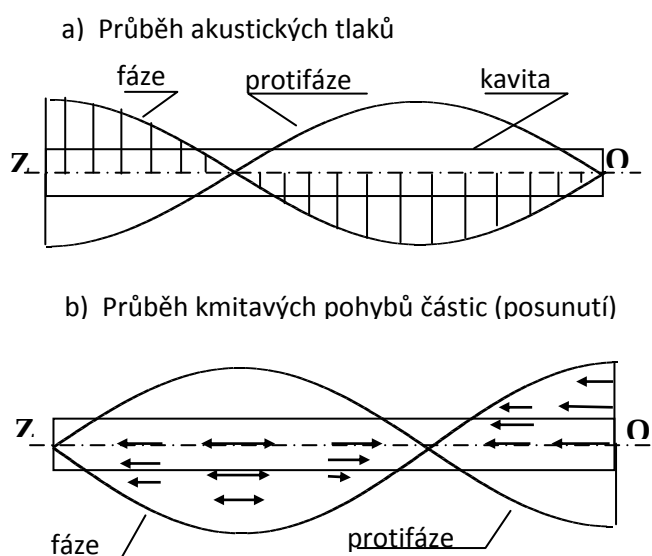
3.1 Vokální trakt

Vokální trakt je v podstatě akustickou kavitou, v které může za jistých okolností rezonovat příslušný vzduchový prostor a vzniká zde tzv. stojaté vlnění. Je tvořen ústní a hrdelní dutinou. V některých případech mohou být ve vokálním traktu zastoupeny i nosní dutina a přilehlé dutiny lebeční. Vokální trakt je z vnějšku ohraničen z jedné strany otevřením ústní dutiny a na straně druhé pak hlasivkami, které jsou trvale otevřeny při generování hlasu šepem a vibrují při mluvení nahlas. Jako akustická kavita je vokální trakt poměrně složitým prostorovým akustickým útvarem jak po stránce geometrické, tak i po stránce jejího buzení. Vzhledem k tomu a pro lepší pochopení akustických vlastností vokálního traktu a pro generování lidského hlasu vůbec je vhodné se blíže seznámit s akustickými vlastnostmi jednodušších tvarů kavit [1,2]. Teorie v této oblasti je probírána i ve výuce předmětu Vibrace a hluk.

3.2 Kavity jednoduchých tvarů

Nejjednodušší akustické kavity jsou válcové nebo případně kuželové. Spektrální a modální charakteristiky kavit ovšem závisí na jejich okrajových podmínkách (konce kavit otevřené nebo uzavřené). Podle typu okrajových podmínek se poté liší také příslušné akustické tlaky a kmitavé pohyby vzduchových částic u vibrujícího vzduchového sloupce. Vzhledem k tomu, že u trubic převažují délkové rozměry vzduchových sloupců nad jejich příčnými rozměry, jsou většinou uvažovány pouze podélné kmity částic příslušných vzduchových sloupců.

Akustické módy lze sledovat dvojím způsobem, a to buď zkoumáním rozložení akustických tlaků, nebo pomocí amplitud kmitavých pohybů vzduchových částic. Tyto dvě proměnné se u akustických módů vzájemně doplňují. Proto v místě, kde je nulový akustický tlak, tam je kmitavý pohyb částic maximální. Platí to samozřejmě i naopak. Z obrázku 3.1 je patrné, že na otevřeném konci kavity (označen symbolem O) je akustický tlak nulový, protože kavita vyúsťuje do volné atmosféry a nemohou se zde proto generovat žádné tlakové změny. Na uzavřeném konci kavity (označen symbolem Z) je naopak akustický tlak maximální a kmitavý pohyb částic nulový.



Obr. 3.1 Typy módů vzduchových sloupců

3.3 Trubice na obou koncích otevřená

U varianty, při které jsou oba konce trubice otevřené (**O – O**) jsou na okrajích u všech akustických módů nulové akustické tlaky. Základní akustický mód (první tvar) má proto v kavitě pouze polovinu délky akustické vlny.

Pro tento případ proto platí vztah mezi délkou trubice a délkou akustické vlny ve tvaru:

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 \cdot f_1}$$

kde je: λ – délka akustické vlny

L – délka kavity

c – rychlost šíření zvuku ve vzduchu

f_1 – první vlastní frekvence akustického módu

Základní vlastní frekvence podélných kmitů vzduchového sloupce lze poté vyjádřit ve tvaru:

$$f_1 = \frac{c}{2 \cdot L}$$

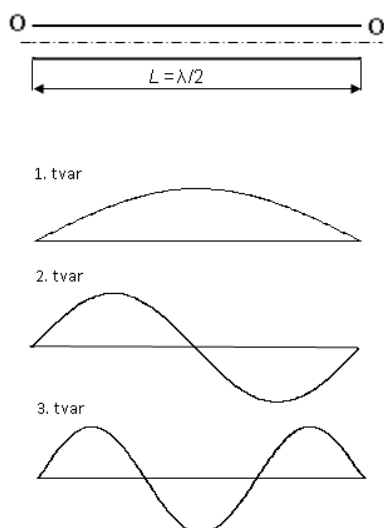
Druhá vlastní frekvenci pak odpovídá situaci $L = \lambda$ a lze ji vyjádřit ve tvaru:

$$f_2 = \frac{c}{L} = 2 \cdot f_1$$

Obecně pak pro každou další n – tou vlastní frekvenci ($n = 1, 2, 3, \dots$) platí vztah:

$$f_n = n \cdot f_1$$

Z těchto vztahů vyplývá, že vlastní frekvence kavity oboustranně otevřené trubice tvoří úplnou harmonickou řadu. Na obr 3.2 jsou zobrazeny tvary příslušných akustických módů.



Obr. 3.2 Tvary příslušných akustických módů

3.4 Trubice na levém konci uzavřená, na pravém otevřená

U varianty kde je pravá strana trubice otevřená a levá strana uzavřená (**Z – O**) je situace taková, že na otevřeném konci je akustický tlak nulový a na uzavřeném konci je akustický tlak maximální.

Délce kavity pak odpovídá čtvrtina vlnové délky, takže pro tento případ platí vztah mezi délkou trubice a délkou akustické vlny ve tvaru:

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4 \cdot f_1}$$

Základní vlastní frekvenci podélných kmitů vzduchového sloupce lze poté vyjádřit ve tvaru:

$$f_1 = \frac{c}{4 \cdot L}$$

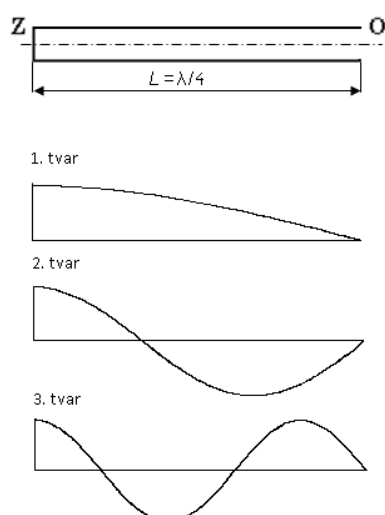
Druhou vlastní frekvenci můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$f_2 = \frac{3 \cdot c}{4 \cdot L} = 3 \cdot f_1$$

Pro n – tý akustický mód proto platí:

$$f_n = n \cdot f_1 \quad \text{kde } n = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Z těchto vztahů vyplývá, že u kavit s jedním koncem uzavřeným a druhým otevřeným se generují pouze liché násobky základní frekvence. Harmonická sekvence proto je tvořena pouze lichými složkami a neobsahuje sudé násobky základní frekvence. Na obr 3.3 jsou zobrazeny tvary příslušných akustických módů.



Obr. 3.3 Tvary příslušných akustických módů

3.5 Trubice na obou koncích uzavřená

U varianty, při které jsou oba konce trubice uzavřené (**Z – Z**) jsou na okrajích u všech akustických módů maximální akustické tlaky.

Pro tento případ proto platí vztah mezi délkou trubice a délkou akustické vlny ve tvaru:

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 \cdot f_1}$$

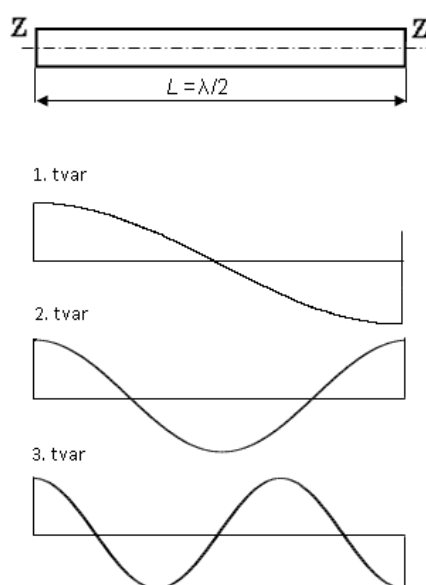
Základní vlastní frekvence podélných kmitů vzduchového sloupce lze poté vyjádřit ve tvaru:

$$f_1 = \frac{c}{2 \cdot L}$$

což je obdobný vztah jako pro trubici na obou koncích otevřenou. Proto na obou koncích uzavřená kavita generuje stejnou harmonickou sekvenci vlastních frekvencí podle vztahu pro ($n = 1, 2, 3, \dots$):

$$f_n = n \cdot f_1$$

Akustické módy u obou typů kavit se však liší v hodnotách akustických tlaků nebo amplitud kmitavých pohybů vzduchových částic. To má výrazný vliv na umístění a polohu případného buzení těchto kavit. Pokud chceme kavity budit akustickým tlakem je vhodné buzení umístit do oblasti maximálního akustického tlaku daného módu nikoliv do jeho uzlu. Na obr 3.4 jsou zobrazeny tvary příslušných akustických módů.



Obr. 3.4 Tvary příslušných akustických módů

3.6 Kuželový tvar trubice

Pro kuželový tvar trubice s jedním koncem otevřeným odpovídá situaci, kdy délka trubice obsahuje znovu pouze polovinu akustického módu stejně jako u případů přímé oboustranně otevřené nebo oboustranně uzavřené kavity. Tím jsou i soubory vlastních frekvencí podélných kmitů vzduchového sloupce zastoupeny stejnou harmonickou řadou.

Pro tento případ proto platí vztah mezi délkou trubice a délkou akustické vlny ve tvaru:

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 \cdot f_1}$$

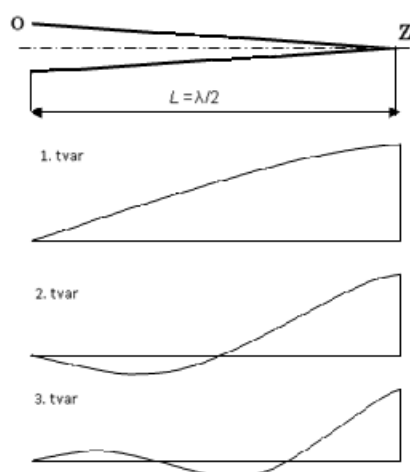
Základní vlastní frekvence podélných kmitů vzduchového sloupce lze poté vyjádřit ve tvaru:

$$f_1 = \frac{c}{2 \cdot L}$$

Harmonickou sekvenci vlastních frekvencí lze vyjádřit pro ($n = 1, 2, 3, \dots$) ve tvaru:

$$f_n = n \cdot f_1$$

Na obr 3.5 jsou zobrazeny tvary příslušných akustických módů.



Obr. 3.5 Tvary příslušných akustických módů

3.7 Hodnocení kavit

Vlastní frekvence podélných akustických módů u kavit s konstantními průřezy jsou definovány násobky příslušných základních frekvencí. Proto vlastní frekvence tvoří rovnoměrně vzrůstající sekvence se stejnými frekvenčními odstupy. Pro jiné než konstantní průřezy tyto vlastnosti neplatí. Z hlediska okrajových podmínek však otevřený a uzavřený konec kavity obecně mění základní frekvenci kavity i vyšší vlastní frekvence. Velikosti vlastních frekvencí stejně dlouhých oboustranně otevřených a oboustranně uzavřených kavit jsou totožné, avšak tvary akustických módů se výrazně liší což je patrné z obr. 3.2 a obr. 3.4.

4 Formulace problému

Univerzální držák kavit

Vytvořit zařízení pro snadné upnutí a univerzální měření akustických vlastností kavit jednoduchých tvarů (válcová, kuželová, se skokovou změnou) s možností měřit akustické vlastnosti v různých místech dané kavity (nastavitelný ve všech třech osách).

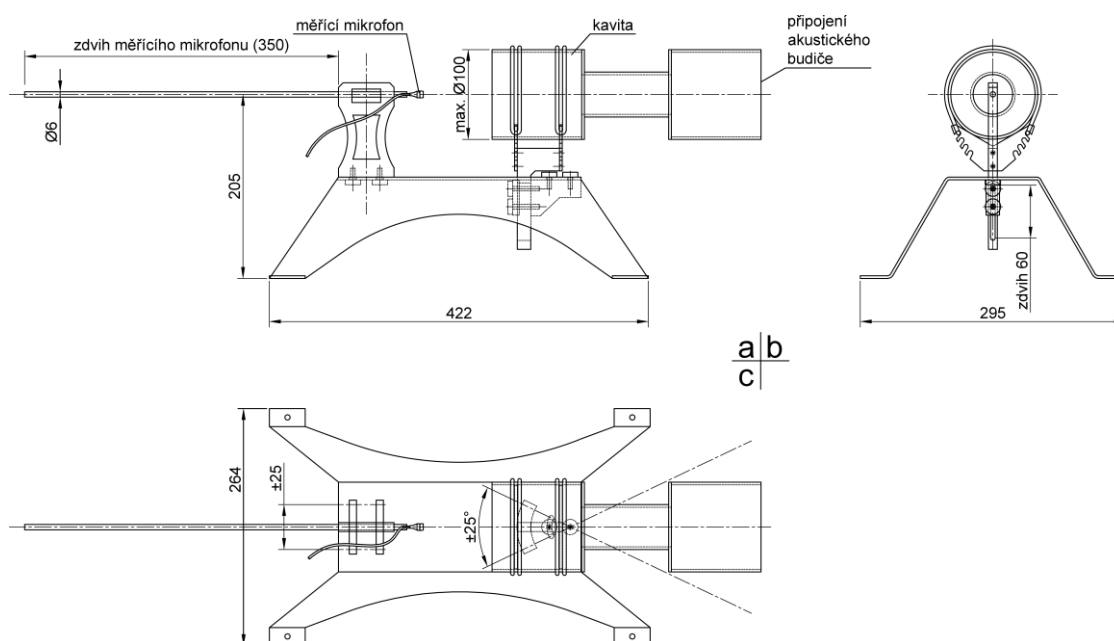
Laditelný model vokálního traktu

Vytvořit jednoduše nastavitelný laditelný model vokálního traktu sloužící k názorné ukázce tvaru skutečného vokálního traktu a rozložení formantů ve frekvenčním spektru při generování českých samohlásek A,E,I,O,U.

5 Požadavky kladené na navrhované experimentální modely

5.1 Univerzální držák kavit

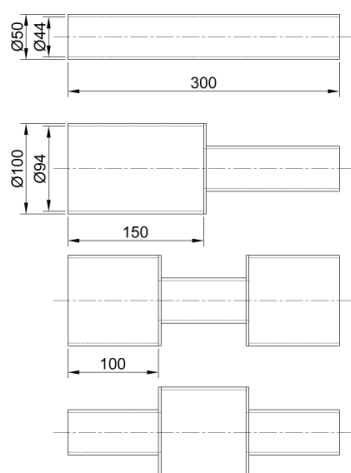
Před řešením tohoto projektu bylo na našem ústavu měření akustických vlastností jednoduchých tvarů kavit možné provádět pouze za asistence tří obsluhujících osob, které přidržovaly měřicí aparaturu v daných pozicích a bylo tudíž nemožné provádět opakované měření při dodržení stejných podmínek. Vytvořením univerzálního držáku kavit zmizí nutnost většího počtu osob obsluhujících zařízení, naopak schopnost opakovat měření za stejných podmínek je samozřejmá. U tohoto držáku je možnost změny okrajových podmínek (otevřeno, uzavřeno) i výměna kavity za jinou (jiný průměr, průřez nebo délka) velmi jednoduchá a rychlá. Univerzální držák navíc umožňuje posunutí držáku kavit v svislém směru až o 60 mm (obr.5.1b) a natočení osy na něm upnuté kavity až o 25° na obě strany. Držák vedení mikrofonu lze posouvat v příčném směru o ± 25 mm (obr.5.1c). Vedení umožňuje mikrofonu posuv po přímce v podélném směru až o 350 mm a maximální velikost měřené kavity je omezena na průměr 100 mm (obr.5.1a), u větších průměrů kavity již nelze zajistit pozici měřícího mikrofonu v ose měřené kavity. Toto vše umožní měřit akustické vlastnosti různých tvarů kavit téměř v každém místě uvnitř dané kavity.



Obr. 5.1 Schéma univerzálního držáku kavit se základními rozměry a možnostmi nastavení

5.2 Kavity k univerzálnímu držáku kavit

Pro snadné pochopení průběhu měření akustických vlastností kavit jednoduchých tvarů a kavit se skokovou změnou průřezu byly z trubek o průměru 50 a 100 mm a tloušťce stěny 3mm vyrobeny průhledné modely. Tvary a rozměry těchto kavit jsou uvedeny na obr. 5.2.

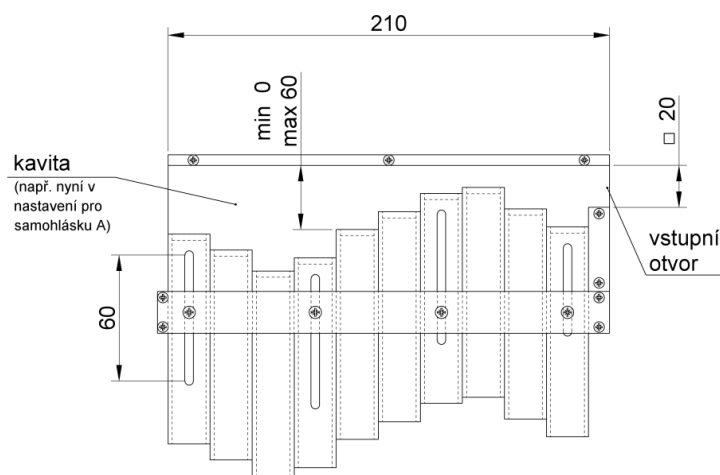


Obr. 5.2 Schéma vyrobených kavit pro měření s označením základních rozměrů

5.3 Laditelný vokální trakt

Laditelný model vokálního traktu nebyl na našem ústavu před řešením tohoto projektu vůbec k dispozici, byly pouze vyrobeny modely vokálních traktů (vycházející ze snímků magnetické rezonance) pro samohlásky A a I, které však nelze žádným způsobem modifikovat. Laditelný model vokálního traktu (viz obr. 5.3) umožňuje pomocí 10 pohyblivých hranolů čtvercového průřezu o velikosti hrany 20 mm nastavovat v rozsahu 0 - 60 mm ve svislém směru zjednodušený schodovitý tvar vokálního traktu pro všechny české samohlásky. Podélný rozměr 210 mm lze považovat za běžnou délku skutečného vokálního traktu. Příčný rozměr tohoto modelu je konstantní, což je dostačující vzhledem k tomu, že se příčné módy (formanty) ve skutečném vokálním traktu vyskytují až od čtvrté vlastní frekvence. K úplné a jednoznačné identifikaci dané samohlásky přitom stačí znát rozložení prvních tří formantů (frekvenčních vrcholů). Vstupní otvor má u všech samohlásek konstantní plochu průřezu. V závislosti na způsobu připojení akustického budiče k vstupnímu otvoru lze modelovat samohlásky šepem i nahlas.

Byly vytvořeny šablony pro české samohlásky, sloužící pro rychlé nastavení laditelného vokálního traktu na danou samohlásku. Každá z šablon byla navržena na základě optimalizace posunutí hranolů při současném požadavku na polohu prvních tří vlastních frekvencí (formantů) vzniklé kavity.



Obr. 5.3 Schéma laditelného vokálního traktu se základními rozměry a možnostmi nastavení

6 Ukázkové experimenty

6.1 Určení akustických módů na univerzálním držáku kavit

Na kavitě upnuté na univerzálním držáku kavit s okrajovými podmínkami uvedenými na obr. 6.1a nahoře jsme provedli měření akustických tlaku po celé délce kavit. Experimentálně určené akustické módy (obr. 6.1b) naměřené v kavitě odpovídají teoretickým průběhům (obr. 6.1a).

Délce kavitě pak odpovídá čtvrtina vlnové délky, takže pro tento případ platí vztah mezi délkou trubice a délkou akustické vlny ve tvaru:

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4 \cdot f_1}$$

Základní vlastní frekvenci podélných kmitů vzduchového sloupce lze poté vyjádřit ve tvaru:

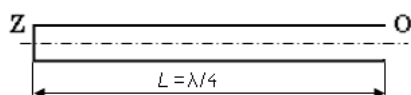
$$f_1 = \frac{c}{4 \cdot L}$$

Druhou vlastní frekvenci můžeme vyjádřit ve tvaru:

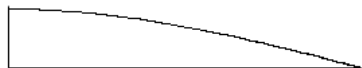
$$f_2 = \frac{3 \cdot c}{4 \cdot L} = 3 \cdot f_1$$

Pro n – tý akustický mód proto platí:

$$f_n = n \cdot f_1 \quad \text{kde } n = 1, 3, 5, 7, \dots$$



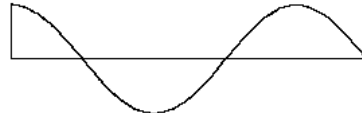
1. tvar



2. tvar

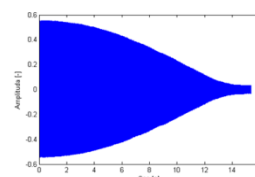


3. tvar

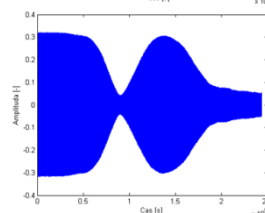


a) teoretické průběhy akustických módů

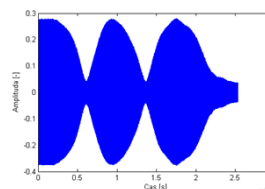
1. tvar



2. tvar



3. tvar

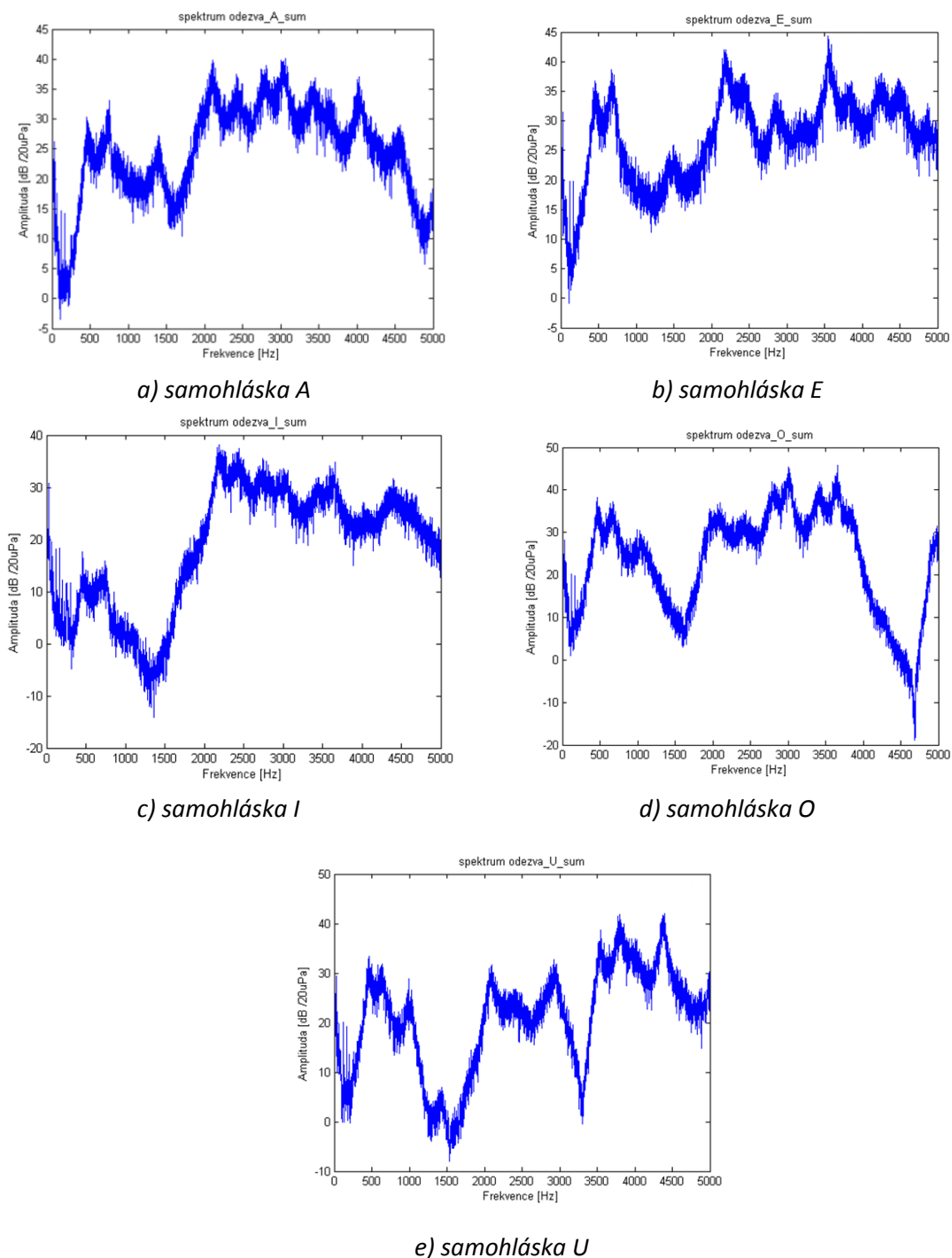


b) experimentálně určené akustické módy

Obr. 6.1 Určení akustických módů

6.2 Modelování formantů českých samohlásek pomocí laditelného vokálního traktu

Na laditelném modelu vokálního traktu (obr. 5.2) jsme provedli měření formantů všech českých samohlásek při buzení šumem, výsledné spektra pro jednotlivé samohlásky jsou uvedeny na obr 6.2a až 6.2e.



Obr. 6.2 Výstupní signály pro jednotlivé samohlásky

7 Závěrečné zhodnocení projektu

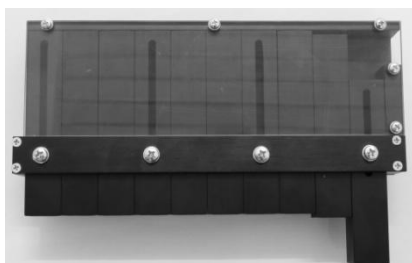
Tato práce se zabývá návrhem a vytvořením experimentálních modelů pro doplnění výuky Bioakustiky v předmětu Vibrace a hluk.

Univerzální držák kavit (viz obr. 7.1) umožňuje provádění mnoha různých typů experimentů. S pomocí tohoto držáku můžeme například zkoumat spektrální vlastnosti (vlastní frekvence a tvary kmitů) různých tvarů kavit (válcová, kuželová, se skokovou změnou průřezu, obecná) a samozřejmě také provádět tyto experimenty za použití různých budících signálů a jednoduše opakovat.



Obr. 7.1 Univerzální držák kavit

Laditelný model vokálního traktu (viz obr. 7.2) slouží k názorné ukázce rozložení formantů pro jednotlivé české samohlásky A, E, I, O, U při výkladu tvorby samohlásek.



Obr. 7.2 Laditelný model vokálního traktu ve výchozím stavu a nastaven na samohlásku A

Publikace související s řešením grantového projektu

[I] MATUG, M.; MIŠUN, V.; NAVRÁTIL, P.; BORÁK, L.; KRPALEK, D. *Analysis of vocal model to generate source voice for whispering by using FEM*. Computational mechanics 2010. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. ISBN: 978-80-7043-919-7.

Literatura

Mišun, V. *Vibrace a hluk*. ISBN 80-214-3060-5. CERM Brno, 2005

Mišun, V. *Tajemství lidského hlasu*. ISBN 978-80-214-3499-8. VUTIUM Brno, 2010