

## 9.2. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA AKUSTICKÝCH POHLTIVOSTÍ MĚKKÝCH TKÁNÍ

Stěny vokálního traktu mají specifické absorpční vlastnosti, jež mohou měnit akustické vlastní frekvence této kavity. Z tohoto důvodu je užitečné tyto charakteristiky analyzovat a respektovat je při studiu spektrálních a modálních vlastností reálných vokálních traktů. Existuje několik možností pro vyhodnocení těchto charakteristik.

Uvedeme několik použitelných metod, založených na následujících principech:

### 9.2.1. IMPEDANČNÍ TRUBICE

Měřicí sestava pro měření vlastností tlumících charakteristik různých měkkých tkání sestávala z následujících zařízení:

- impedanční trubice,
- frekvenční analyzátor.

Byly proměřovány charakteristiky vzorků vepřového jazyka, hovězího jazyka a vepřové sliznice, které mají podobné akustické pohltivosti, a další charakteristiky obdobné lidským tkáním vokálního traktu. Navíc byly sledovány dvě základní varianty: tkáně byly vlhčené a nevlhčené, aby bylo možno sledovat vliv vlhčení na analyzované tkáně.

Při měření akustických vlastností sledovaných vzorků byla použita měřicí sestava, skládající se z přístrojů:

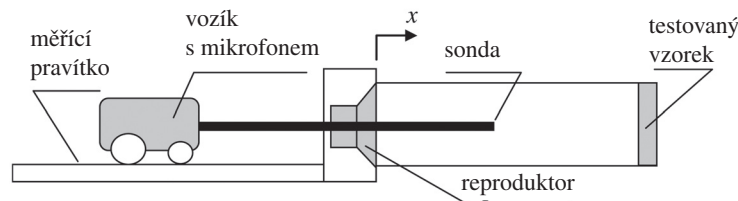
- kombinovaný generátor sinusového signálu B&K typ 1024 a univerzální počítač TESLA BM 640A,
- impedanční trubice (interferometr) B&K typ 4202, průměrů 29 mm a 99 mm s frekvenčními rozsahy (250 až 5000) Hz,
- frekvenční analyzátor B&K typ 2112.

Vzorky měkkých tkání tvaru kruhových destiček měly rozměry:

- průměr podle použité trubice, tj. 99 mm pro nižší frekvenční rozsah (250 až 1600) Hz a 29 mm pro vyšší rozsah (800 až 5000) Hz,
- tloušťka vzorků 15 mm u jazyků a 3 mm u blány,
- vzorky byly připevněny na cementovo-třískovou desku CETRIS s pohltivostí menší jak 4 procenta v celém frekvenčním rozsahu.

- *Impedanční trubice* (interferometr), jejíž funkce je založena na interferenci dopadající a odražené akustické vlny sledovaného vzorku stěn kavity.
- *Metoda útlumu signálu* (metoda dozívání).
- *Metoda šířky rezonančního pásma*.

Schéma impedanční trubice je na obr. 9.1. Reprodukční vlna o zvolené frekvenci  $f$  a amplitudě akustického tlaku  $A$ . Vlna se šíří v trubici a odráží se od testovaného vzorku. Obě tato vlnění se vzájemně sečítají – interferují. Fáze interference mezi vlnami dopadajícími a odraženými se od vzorku obsahují informaci o stavu stojatých vln v trubici.



Obr. 9.1. Schéma impedanční trubice

Pokud 100 procent dopadajících vln je odraženo, pak dopadající i odražené vlny mají stejné amplitudy, takže interferenční vlnění má nulový akustický tlak v uzlu vlnění a naopak dvojnásobnou amplitudu v kmitně (antiuzlu) – obr. 9.2a. Přitom může docházet k částečné absorpci vlnění podél stěn trubice.

Při absorbování části akustické energie sledovaným vzorkem mají dopadající i odražená vlna různé amplitudy akustického tlaku, tj. dopadající amplitudu  $A$ , odražená amplitudu  $B$ . Amplituda akustického tlaku v uzlu referenčního

kde pro akustický tlak je činitel tlumení

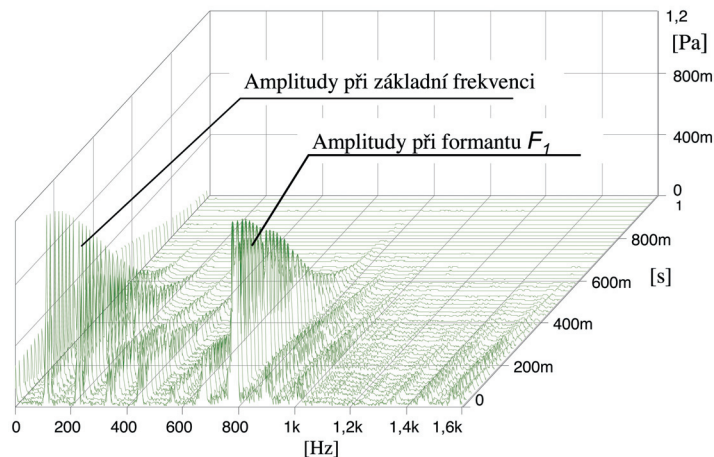
$$DR = \frac{20 \log(C_1/C_2)}{t_2 - t_1} \quad (9.14)$$

Hodnota  $DR$  je snadněji zjistitelná, pokud signál odezvy je zobrazován grafem, kde amplitudy jsou v logaritmickém zobrazení a čas v zobrazení lineárním. Pak konstantní hodnota  $\eta$  zobrazuje na grafu přímku definovanou spojením maxim amplitud odezvy.

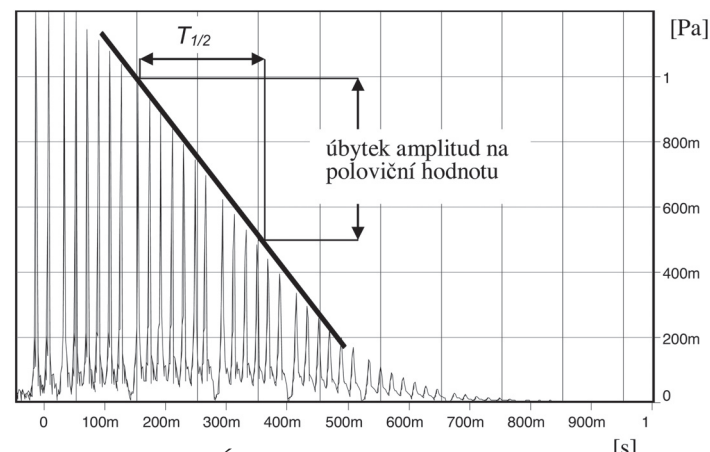
Alternativní hodnotou je lineární zobrazení amplitud a odměření času  $T_{1/2}$ , při kterém amplitudy odezvy klesnou na polovinu, tj. klesnou o 6 dB. Poněvadž  $DR = 6,0/T_{1/2}$ , pak je

$$\eta = \frac{0,22}{f T_{1/2}} \quad (9.15)$$

Metoda je vhodná pro měření a vyhodnocení součinitele tlumení signálů generovaných uvnitř lidského vokálního traktu. Při použití rovnoměrného



Obr. 9.6. Útlum amplitud jednotlivých harmonických složek



Obr. 9.7. Útlum amplitud při základní frekvenci  $F_0$

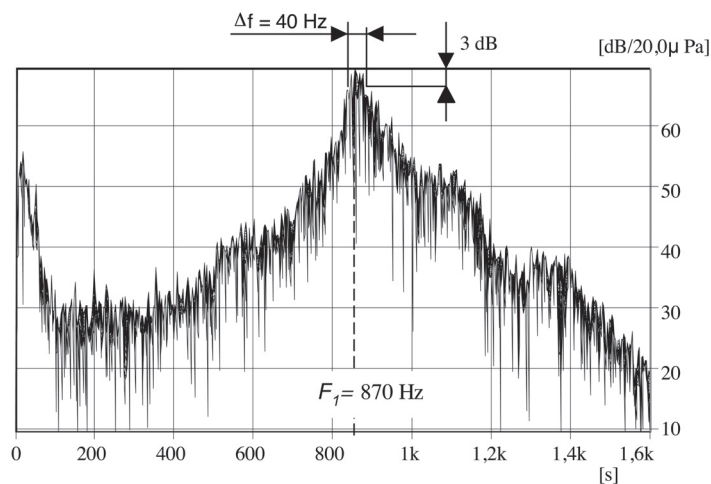
buzení hlasivkami je vokální trakt buzen periodickým signálem se základní frekvencí  $F_0$  a dále odpovídajícími harmonickými složkami. Pak jsou hlasivky rychle vypnuty z aktivity tak, aby bylo z průběhu dozívajících harmonických signálů možno vysledovat potřebný útlum.

Takže tímto způsobem obdržíme útlum jednotlivých harmonických složek uvnitř vhodně zvoleného bodu uvnitř vokálního traktu (obr. 9.6). Graf zobrazuje útlum amplitud jednotlivých harmonických složek včetně základní frekvence hlasivek. Základní frekvence hlasivek je  $F_0 = 112$  Hz při vyslovení samohlásky  $a$ .

V tomto případě můžeme postupně vyhodnotit součinitele tlumení  $\eta$  pro jednotlivé harmonické složky, takže můžeme obdržet závislost činitele tlumení na frekvenci  $f$ .

Na obr. 9.7 pro poloviční pokles původní amplitudy je odečtena odpovídající časová hodnota  $T_{1/2} \approx 200$  ms = 0,2 s – při základní frekvenci hlasivek. Pak je součinitel ztrát tlumením

$$\eta = \frac{0,22}{112 \cdot 0,2} = 0,00982 \quad (9.16)$$



Obr. 9.10. Spektrum samohlásky *a* generované šeptem

### 9.3. ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Výsledky experimentální analýzy akustických vlastností sledovaných vzorků ukazují na skutečnost, že vnitřní stěny vokálních traktů vykazují velmi nízké hodnoty součinitelů zvukové pohltivosti téměř v celém sledovaném frekvenčním rozsahu 250 až 5000 Hz. Výsledky se týkají jak měkkých částí vokálního traktu, tj. jazyka, tak i sliznice (blány), pokrývající vnitřní části vokálního traktu.

Měření ukazují, že se akustické charakteristiky měkkých částí velmi málo mění ve frekvenčním rozsahu lidské mluvy či zpěvu, tj. v rozsahu frekvencí 80 až 2048 Hz. Lze konstatovat, že součinitel akustické pohltivosti všech měkkých tkání vokálního traktu se pohybují v rozsahu hodnot  $0,03 \leq \alpha \leq 0,15$  v daném frekvenčním rozsahu.

Je vhodné si všimnout vlivu navlhčení povrchu vzorku, a který se zdá být nevýznamný. Ovšem je nutno uvést, že jednotlivá měření probíhala poměrně dlouhou dobu, takže po velmi krátké době měření docházelo k vysušení zave-

deného vlhčení vzorku. Pak byly akustické vlastnosti téměř totožné u vzorků nevlhčených i vlhčených.

Je nutno ovšem konstatovat, že v reálném vokálním traktu jsou jeho vnitřní povrchy trvale pokryty tenkou vrstvou sekretů a slin, čímž se jistě součinitel absorpce dále snižuje.

Průběhy měrných akustických impedancí v celém frekvenčním rozsahu všech měřených vzorků lze považovat za velmi podobné. Reálné složky se pohybují v rozmezí hodnot  $0,3 \leq x/z_0 \leq 8,0$  a imaginární složky v rozmezí hodnot  $-20,0 \leq y/z_0 \leq 10,0$ . Průběhy jsou téměř shodné pro vzorky nevlhčené i vlhčené.

Měření akustických vlastností měkkých částí vokálního traktu potvrzují očekávané hodnoty, že totiž jejich vnitřní stěny vykazují velmi nízké součinitele akustické pohltivosti.

Nízké hodnoty součinitelů absorpce jsou *nutnou vlastností* vokálního traktu, neboť akustická vlna jím musí procházet s nejmenšími akustickými ztráta-

Společnými parametry modelů vokálního traktu jsou:

- hustota vzduchu:  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ,
- rychlost zvuku ve vzduchu:  $c = 340 \text{ m/s}$ ,
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$ ,
- použité typy vzduchových elementů vokálního traktu: TETR4.

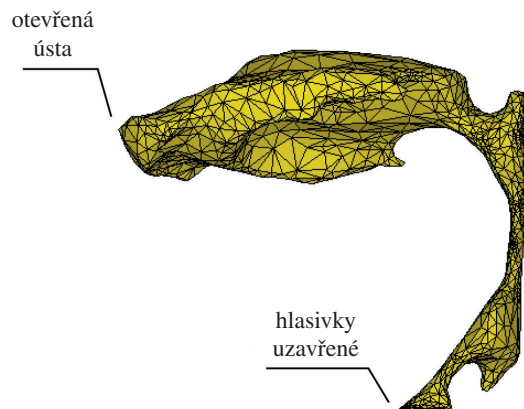
Počty elementů a uzlů modelů:

- $N_a = 6830$  elementů pro samohlásku *a*, počet uzlů: 1858,
- $N_i = 5012$  elementů pro samohlásku *i*, počet uzlů: 1400.

Spektrální a modální charakteristiky vokálních traktů samohlásek:

**a) Samohláska „a“**

Na obr. 9.11 je zobrazen konečno-prvkový model vokálního traktu (Kršek, 2000) pro samohlásku generovanou nahlas.



**Obr. 9.11. Konečno-prvkový model vokálního traktu pro samohlásku *a*, nahlas**

V Tab. 9.1 je uveden přehled prvních deseti vlastních frekvencí (formantů) s uvedením typu akustic-kého módu (podélný, příčný, kombinovaný).

mód i	$F_{oi}$ [Hz]	a		b		
		akustický mód	z	$F_{oi}$ [Hz]	akustický mód	z
1	588	podélný	x	994,2	podélný	x
2	1069	podélný	x	1250	podélný	
3	2741	podélný	x	2759	podélný	x
4	3799	podélný	x	3818	podélný	
5	4147	příčný	x	4147	příčný	
6	4240	podélný		5285	podélný	
7	5304	kombinovaný	x	5971	kombinovaný	
8	6003	kombinovaný		6313	kombinovaný	
9	6314	kombinovaný		6615	kombinovaný	
10	6616	kombinovaný		7564	kombinovaný	

z – zobrazení na obrázku, x – ano

**Tab. 9.1. Spektrální a modální charakteristiky vokálního traktu při vyslovení samohlásky *a***  
*a) vyslovené nahlas      b) vyslovené šeptem*

Z charakteru podstaty tvorby formantů a jejich vzájemného rozlišení jsou především důležité podélné tvary kmitů, neboť lidské vokální traktory jsou přizpůsobeny především na změny jejich příčných řezů a tvarů, což umožňuje vědomě ovlivňovat několik nejnižších formantů. Akustické módy jsou obdobné struktury pro tvorby samohlásky nahlas i šeptem.

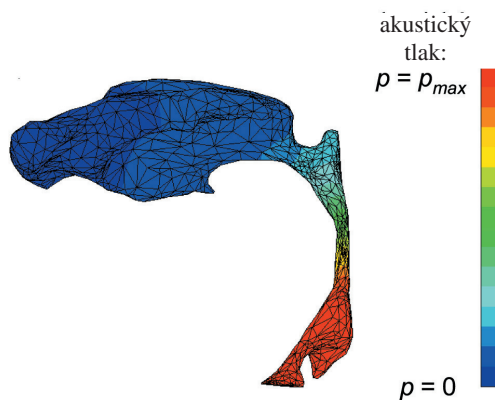
Člověk může příslušnými artikulátory nejvýrazněji ovlivňovat podélné akustické módy vokálního traktu a méně již ovlivňovat tvorbu příčných nebo kombinovaných akustických módů sledovaného vokálního traktu.

Dle Tab. 9.1 lze konstatovat:

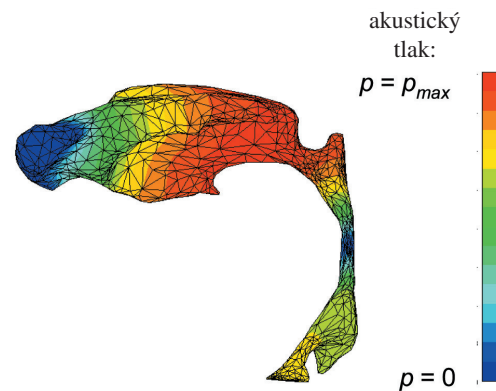
- první čtyři akustické módy jsou podélnými módy,
- pátý akustický mód je příčný, neboť vzduchové částice vibrují příčně ve vokálním traktu,
- šestý je podélným akustickým módem,
- sedmý až desátý jsou kombinovanými akustickými módy,
- při analýze vyšších akustických módů vesměs převládají kombinované akustické módy.

Na obr. 9.12 až obr. 9.19 jsou zobrazeny akustické módy samohlásky *a* při vyslovení této samohlásky nahlas (obr. 9.12 až obr. 9.15) a při jejím vyslovení šeptem (obr. 9.16 až obr. 9.19).

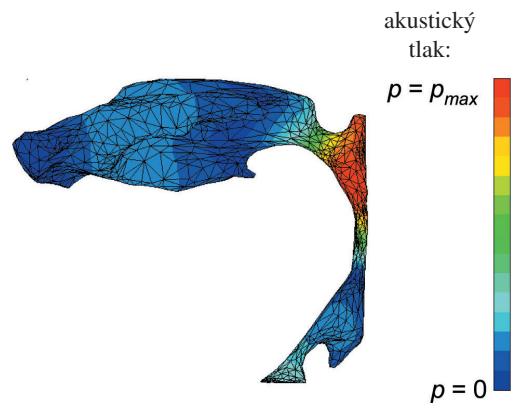
Připomínáme, že každý další vyšší akustický mód vokálního traktu v pořadí má vždy o další akustický uzel navíc u téhož typu módu (například u podél-



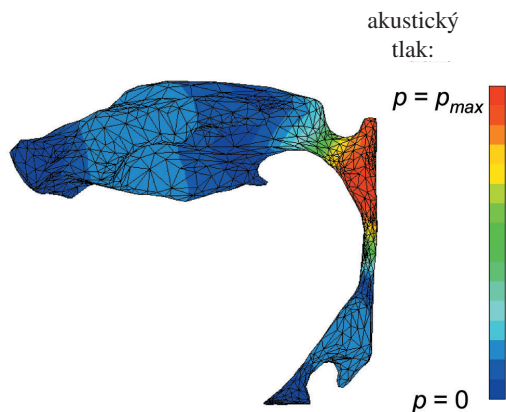
Obr. 9.12. Akustický mód při  $F_{01}=588$  Hz, samohláska *a*, nahlas



Obr. 9.13. Akustický mód při  $F_{02}=1069$  Hz - samohláska *a*, nahlas



Obr. 9.14. Akustický mód při  $F_{03}=2741$  Hz samohláska *a*, nahlas



Obr. 9.19. Akustický mód při  $F_{03}=2759$  Hz, samohláska *a*, šeptem

ných módů). Je vhodné připomenout, že akustické módy vokálního traktu jsou prostorovými módy, a tudíž akustické uzly jednotlivých módů jsou prostorovými plošnými útvary.

Analýzou akustických módů lze konstatovat:

- Na straně ústního otvoru jsou nulové akustické tlaky při generování samohlásek nahlas nebo šeptem.
- Při tvorbě samohlásek nahlas jsou akustické tlaky na straně hlasivek maximální, zatímco při šeptu jsou nulové.
- Z tohoto důvodu se nejvíce vzájemně odlišují první vlastní frekvence a příslušné akustické módy při mluvení nahlas a při šeptu; při šeptu je první formant frekvenčně přibližně dvakrát vyšší, nežli je tomu při tvorbě nahlas.
- Další akustické módy se vzájemně tvarem více přibližují; tato přiblížení jsou výrazná tím více, čím frekvenčně vyšší jsou srovnávány akustické módy pro tvorbu hlasu nahlas a šeptu.
- Těmto skutečnostem odpovídá i frekvenční rozložení jednotlivých formantů při tvorbě hlasu nahlas a šeptu; nejvíce se frekvenčně odlišují

první formanty při tvorbě hlasu nahlas a šeptu, zatímco vyšší formanty se vzájemně frekvenčně více a více vzájemně přibližují.

- Akustické módy jsou symetrické vzhledem ke svislé rovině symetrie vokálního traktu.
- Zajímavým je příčný akustický mód (při tvorbě nahlas i při šeptu) při  $F_{05}$ , kde částice vzduchu kmitají ve směru kolmém na svislou rovinu symetrie vokálního traktu, přičemž uzel kmitu prochází střední podélnou svislou rovinou vokálního traktu.
- Tento formant je nazýván *zpěvním formantem*; je poměrně často využíván profesionálními zpěváky pro jeho vyšší intenzitu oproti jiným formantům se srovnatelnou frekvenční hodnotou (například druhému a třetímu podélnému). Tato odlišnost je způsobena buzením ze strany hlasivek. Zatímco klasické podélné formanty vokálního traktu jsou buzeny podélnými kmity částic vzduchu, jejichž intenzita klesá s narůstajícím počtem harmonických, příčné kmity jsou buzeny příčným vlněním částic vzduchu uvnitř vokálního traktu.
- U kombinovaných módů dochází ke vzájemným vazbám podélných s příčnými kmity bočními případně se svislými kmity vokálního traktu.
- Při tvorbě hlasu nahlas je pokles vyšších harmonických zdrojového hlasu, takže většinou se vybudí pouze nejnižší tři formanty samohlásek.
- Jiná situace je při tvorbě hlasu šeptem, kdy spektrum zdrojového hlasu je spojitě a poměrně konstantní amplitudy; v důsledku této skutečnosti lze vybudit větší počet formantů nežli při tvorbě hlasu nahlas.

## b) Samohláska “*ř*”

Obdobná situace je při tvorbě dalších samohlásek. Pochopitelně se spektrální a modální charakteristiky vokálního traktu liší podle jeho nastavení, tj. nastavení jeho jednotlivých částí – rtů, jazyka, spodní čelisti atd.

V Tab. 9.2 jsou uvedeny vlastní frekvence (formanty) vokálního traktu při jeho nastavení na samohlásku *i* nahlas a šeptem.

Rovněž u této samohlásky jsou první čtyři módy podélnými, takže spolehlivě zajišťují akustickou definici samohlásky *i*. Při tvorbě samohlásky šeptem jsou nulové akustické tlaky jak na straně úst, tak i na straně hlasivek. Analýza spektrálních a modálních charakteristik vokálního traktu při vyslovení samohlásky *i* je obdobná, jako byla u samohlásky *a*.

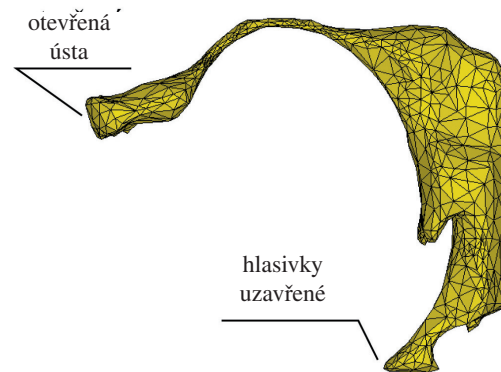
<i>a</i>				<i>b</i>			
mód <i>i</i>	$F_{oi}$ [Hz]	akustický mód	z	$F_{oi}$ [Hz]	akustický mód	z	
1	245	podélný	x	513,9	podélný	x	
2	2271	podélný	x	2502	podélný	x	
3	3281	podélný	x	3210	podélný		
4	3599	podélný	x	3991	podélný	x	
5	4249	příčný		4745	příčný		
6	4992	podélný		5901	podélný	x	
7	6055	kombinovaný		6797	kombinovaný		
8	7149	kombinovaný		7361	kombinovaný		
9	7980	kombinovaný		7599	kombinovaný		
10	8256	kombinovaný		7765	kombinovaný		

z – zobrazení na obrázku, x – ano

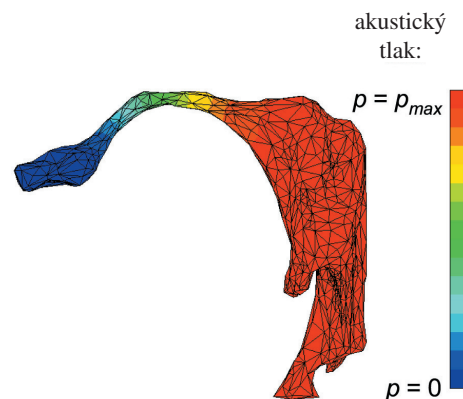
**Tab. 9.2. Spektrální a modální charakteristiky vokálního traktu při vyslovení samohlásky *i***  
*a) vyslovená nahlas      b) vyslovená šeptem*

Na obr. 9.20 je zobrazen konečno-prvkový model vokálního traktu při samohlásce *i* vyslovené nahlas (hlasivky uzavřené).

Při tvorbě samohlásky šeptem je tvar vokálního traktu totožný a liší se pouze otevřením hlasivek. Na obr. 9.21 až obr. 9.24 jsou uvedeny akustické módy vokálního traktu při tvorbě samohlásky *i* nahlas a další čtyři akustické módy jsou uvedeny pro šepot (obr. 9.25 až obr. 9.28).



**Obr. 9.20. Konečno-prvkový model vokálního traktu při samohlásce *i*, generované nahlas**



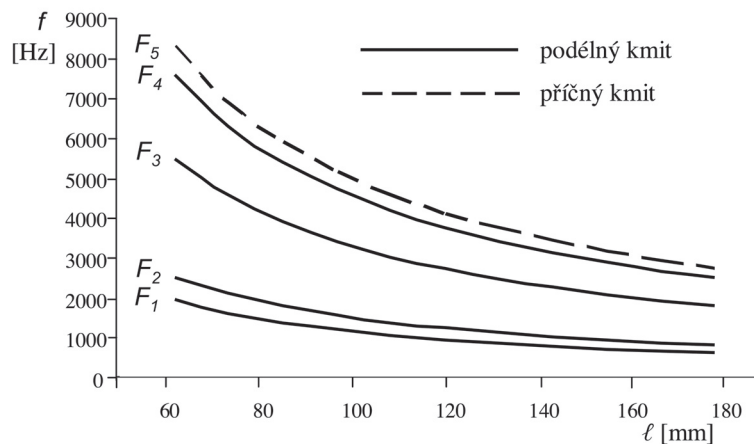
**Obr. 9.21. Akustický mód při  $F_{o1} = 245$  Hz, samohláska *i*, nahlas**

- rovněž se frekvenčně liší příčné akustické módy u jednotlivých samohlásek; u samohlásky *a* má hodnotu 4142 Hz, u samohlásky *i* má hodnotu 4249 Hz,
- nejvýraznější je příčný akustický mód u samohlásky *a*, neboť ústa jsou otevřená nejvíce ze všech dalších samohlásek,
- z tohoto důvodu profesionální zpěváci využívají pro dosažení vyšší intenzity zpívaného hlasu zpěvního formantu pouze při samohlásce *a*.

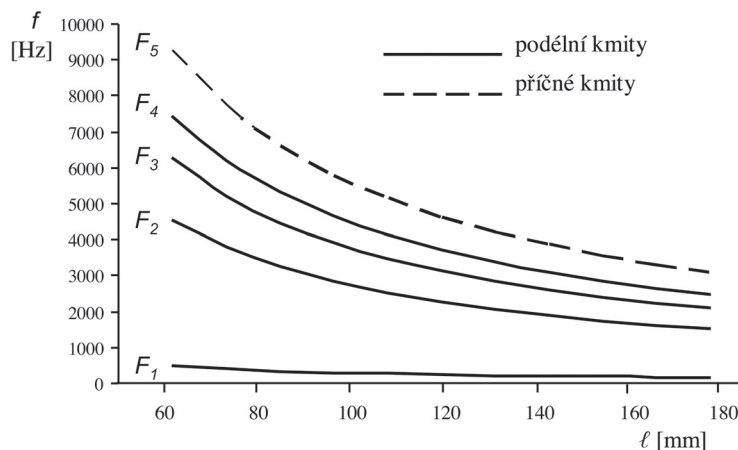
### Vlastnosti formantů samohlásek při změně velikosti vokálního traktu

Velikost vokálního traktu se mění během života každého jedince. V dětském věku jsou vokální trakty menší a s postupujícím věkem se zvětšují. Rovněž se velikosti vokálních traktů liší u mužů – jsou větší, nežli je tomu u žen. Velikosti vokálních traktů coby akustických kavit jsou důsledkem změny velikostí formantů všech samohlásek. Provedeme analýzu tohoto jevu.

Na obr. 9.29 a obr. 9.30 jsou zobrazeny průběhy frekvencí jednotlivých formantů konečno-prvkových modelů samohlásek *a* (obr. 9.29), *i* (obr. 9.30). Průběhy formantů jsou v závislosti na délce ústní a části hltanové dutiny, definované délkou  $\ell$ .



Obr.9.29. Změny frekvencí prvních pěti formantů  $F_i$  samohlásky *a* v závislosti na délce  $\ell$  – při mluvení nahlas



Obr.9.30. Změny frekvencí prvních pěti formantů  $F_i$  samohlásky *i* v závislosti na délce  $\ell$  – při mluvení nahlas

Souhrnně lze z uvedených charakteristik na obr. 9.29 a obr. 9.30 definovat následující:

- Delším vokálním traktům odpovídají nižší frekvence všech formantů a naopak.
- Snížení všech formantů samohlásek je výraznější u kratších vokálních traktů – u dětí a žen.
- Číselné poměry frekvencí formantů pro danou samohlásku jsou konstantní a nezávisí na velikosti vokálního traktu.
- Tyto poměry formantů jsou pro každou jednotlivou samohlásku charakteristické.
- Tato skutečnost zaručuje akustickou definici příslušné samohlásky bez ohledu na velikosti vokálního traktu.
- U všech samohlásek jsou první čtyři formanty podélnými kmity, zatímco pátý kmit odpovídá příčnému kmitu kavity vokálního traktu. Tento formant se nazývá *zpěvním formantem*.



## 9.5. SPEKTRÁLNÍ VLASTNOSTI REÁLNÝCH MODELŮ VOKÁLNÍCH TRAKTŮ SAMOHLÁSEK

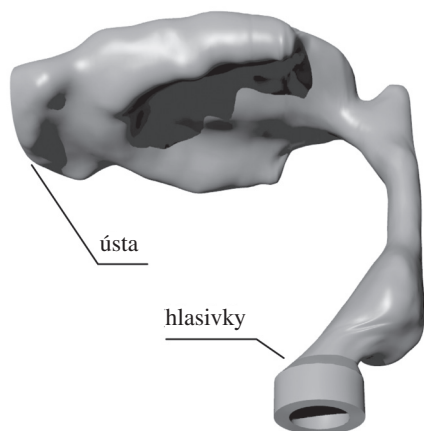
Na základě konečno-prvkových modelů vokálních traktů pro vybrané typy samohlásek dle kap. 9.4 byly technikou *rapid prototyping* vyrobeny fyzicky odpovídající reálné modely příslušných vokálních traktů sledovaných samohlásek (Vašek M., aj., 2007). Modely byly použity pro vyhodnocení frekvenčních

přenosových charakteristik vokálních traktů, vytvořených pro samohlásky: *a*, *i*. Sledované charakteristiky byly vyhodnocovány jak pro tvorbu samohlásek nahlas, tak i pro šepot.

### 9.5.1. MODEL VOKÁLNÍHO TRAKTU PRO SAMOHLÁSKU „a“

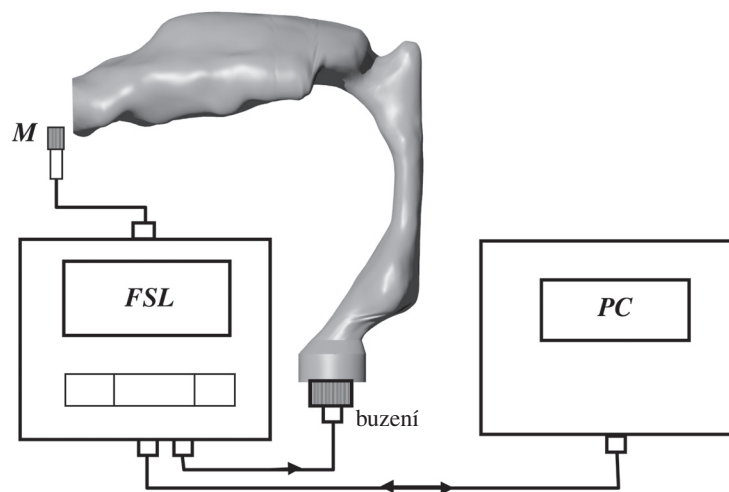
Na obr. 9.31 je zobrazen model vokálního traktu pro tvorbu samohlásky *a*, který lze použít pro analýzu hlasu nahlas i šepotu.

Otevření ústní dutiny je totožné při obou způsobech tvorby hlasu: nahlas i šepotu. Modely se liší okrajovou podmínkou na straně hlasivek. Při tvorbě hlasu nahlas jsou hlasivky uzavřeny, naopak při šepotu jsou částečně a trvale pootevřeny (viz kap. 9.5.1).



Obr.9.31. Model vokálního traktu pro samohlásku *a*

Schéma pro vyhodnocení frekvenčních přenosových charakteristik modelu je na obr. 9.32 a obr. 9.34.



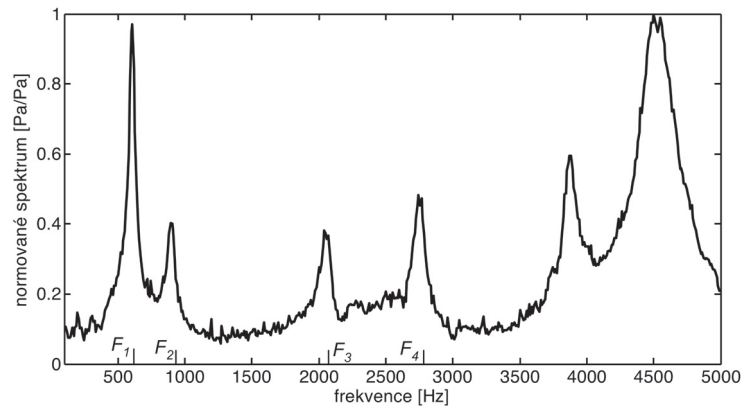
Obr.9.32. Měřicí sestava pro frekvenční přenosovou charakteristiku modelu vokálního traktu samohlásky *a* – pro nahlas: *M* – mikrofón, *PC* – počítač, *FSL* – zvuková karta

Na obr. 9.35 je zobrazena normovaná frekvenční přenosová charakteristika modelu při šepotu. Z charakteristiky je možno vyhodnotit formanty sledované samohlásky.

Na základě charakteristik na obr. 9.33 a obr.9.35 lze konstatovat:

- Rozložení formantů je charakteristické pro samohlásku **a** – pro nahlas i pro šepot.
- Nejvýrazněji se frekvenčně liší u obou charakteristik první formanty; tato skutečnost je dána rozdílnými okrajovými podmínkami na straně hlasivek. Při tvorbě samohlásky nahlas je formant  $F_1$  nižší, nežli je tomu při šepotu.
- Vyšší formanty jsou frekvenčně přibližně obdobné a vzájemně si odpovídají pro oba typy tvorby samohlásky.

► *Obr. 9.35. Normované spektrum samohlásky a při konstantním buzení vokálního traktu harmonickým signálem – šepot*



### 9.5.2. MODEL VOKÁLNÍHO TRAKTU PRO SAMOHLÁSKU „i“

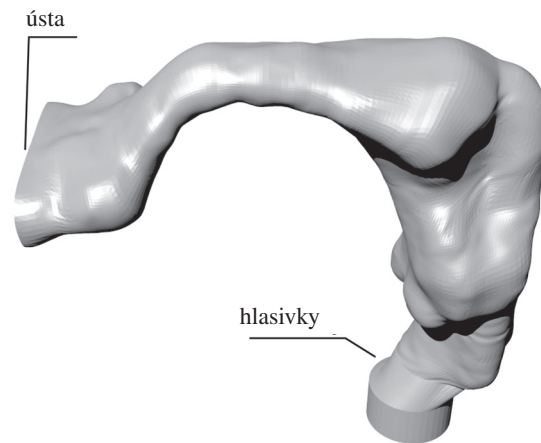
Na obr. 9.36 je zobrazen model vokálního traktu pro tvorbu samohlásky *i*, který lze použít pro analýzu hlasu nahlas i šepotu.

U samohlásky *i* budeme rovněž sledovat spektrální charakteristiky při obou typech tvorby hlasu: nahlas i šepotu. Princip experimentální analýzy příslušných charakteristik je totožný, jako byl použit u samohlásky *a* (obr. 9.32, obr. 9.34).

Na obr. 9.37 je zobrazena frekvenční přenosová charakteristika vokálního traktu samohlásky *i* generované nahlas. Na obr. 9.38 je pak uvedena stejná charakteristika vokálního traktu téže samohlásky generované šepem (Vašek M., aj., 2007).

Na základě charakteristik na obr. 9.37 a obr. 9.38 lze konstatovat:

- rozložení formantů je charakteristické pro samohlásku **i** – pro nahlas i pro šepot,
- nejvýrazněji se frekvenčně liší u obou charakteristik rovněž první formanty; při tvorbě samohlásky nahlas je formant  $F_1$  nižší, nežli je tomu při šepotu,
- vyšší formanty jsou frekvenčně přibližně obdobné a vzájemně si odpovídají pro oba způsoby tvorby hlasu.



*Obr. 9.36. Model vokálního traktu pro samohlásku i*