

EXPERIMENTAL ACOUSTIC MODAL ANALYSIS OF A MALE VOCAL TRACT MODEL

J. Horáček^{*)}, J. Veselý^{*)}, L. Pešek^{*)}, P. Růžicka^{**)}

Summary: Acoustic properties of a physical model of real male vocal tract corresponding to the Czech vowel / a / are analyzed by the experimental modal analysis. The model was designed by direct transferring the data obtained from the magnetic resonance images (MRI), taken during the subject phonation, into the finite element (FE) model and afterwards the method of rapid prototyping was realized for creating the final physical model. The acoustic random excitation was applied at the position of the vocal folds and the response was measured by a miniature microphone in several discrete points along the vocal tract. The measured frequency response functions were evaluated by a global identification method. The resulting eigenfrequencies (formants) and the acoustic mode shapes of vibration are compared with the acoustic measurements carried out during the MRI sequence realization and with the results of the modal analysis of the FE model of the vocal tract for the same vowel / a /.

1. Úvod

V příspěvku jsou prezentovány výsledky experimentální frekvenčně-modální akustické analýzy modelu mužského vokálního traktu. Geometrické tvary a rozměry supraglotického prostoru odpovídají fonaci české samohlásky / a /. Model byl získán s použitím snímků magnetické rezonance (MRI) transformací dat na konečněprvkový (MKP) model [1] a následnou aplikací technologie *rapid prototyping* pro počítačem řízenou výrobu fyzikálního modelu vokálního traktu.

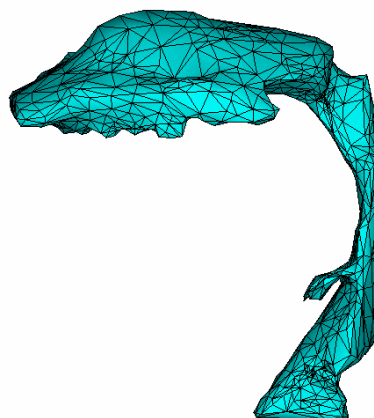
2. Tvorba fyzikálního modelu vokálního traktu

Datové soubory byly získány z MRI snímků sagitálních řezů vokálního traktu sledovaného subjektu při fonaci (viz obr. 1a) se současným záznamem hlasového signálu, z kterého byly později vyhodnocovány formanty [2,3]. Tyto soubory dat byly transformovány do voxel modelu, z kterého byl vygenerován MKP model supraglotického prostoru, příslušný fonované samohlásce. Pro numerickou analýzu takto vytvořených modelů byl použit systém ANSYS 5.7. MKP model pro samohlásku /a/ je uveden na obr. 1b [3]. Na práce [1-3] bezprostředně navázala výroba modelu pro laboratorní experimenty.

^{*)} Ing. Jaromír Horáček, DrSc., Ing. Jan Veselý, Ing. Luděk Pešek, CSc., Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00, Praha 8, e-mail: jaromirh@it.cas.cz

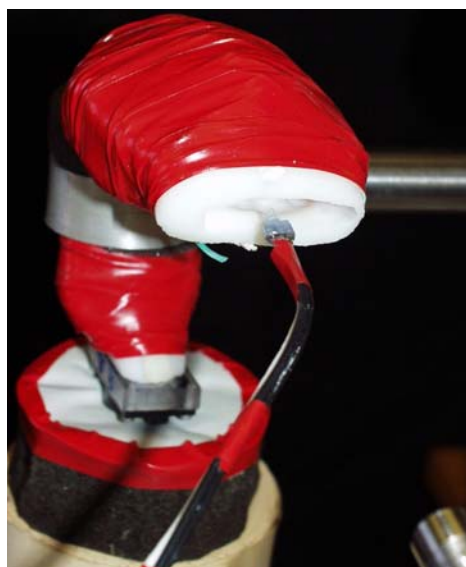
^{**)} Ing. Pavel Růžicka, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, Technická 4, Praha 6, e-mail: ruzicka@biomed.fsid.cvut.cz

Počítačový model vokálního traktu určený pro experimentální analýzu byl vytvořen v CAD programu Unigraphics. Za základ modelu byla vzata prostorová síť trojúhelníků popisující vnitřní povrch supraglottického akustického prostoru. Doplněním o další konstrukční prvky vznikl objemový počítačový model, který posloužil jako vstupní data pro technologii Rapid Prototyping. Technologie Rapid Prototyping zpracovávají počítačová data popisující prostorovou geometrii tělesa a na jejich základě vyrobí fyzický model. Pro zhotovení modelu akustického prostoru byla použita technologie Fused Deposition Modeling, konkrétně stroj FDM 1650 americké firmy STRATASYS. Tato technologie používá k výrobě modelů termoplast ABS, proto jsou modely odolné vůči mechanickému namáhání ($E = 1.64 \cdot 10^9$ Pa při teplotě 20°C) a teplotám do 100°C . Fyzický model vzniká vrstvu po vrstvě, tzn. narůstá ve směru vertikální osy z. Tloušťka vrstvy použitá při výrobě modelu byla 0,1778 mm, tj. nejmenší možná u stroje FDM 1650. Přesnost polohování vytlačovací hlavy je 0,1 mm.



Obr. 1 MRI zobrazení a MKP model vokálního traktu odpovídající české samohlásce /a/.

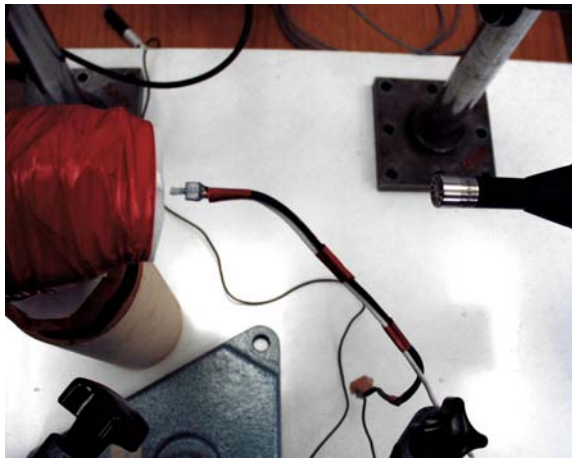
3. Uspořádání experimentu a metodika měření



Obr. 2 Fyzikální model vokálního traktu člověka pro samohlásku /a/.

Vyrobený model vokálního traktu (viz obr. 2) byl nejprve zevnějšku polepen těsnicí páskou, tak aby nedocházelo k průniku vzduchu technologickou spárou dělící model ve vertikální rovině na dvě části. Model byl ve vertikální poloze uchycen v držáku a k jeho spodní části v rovině hlasivek byl připevněn miniaturní (35x20x8 mm) reproduktor LP-35KC08 (rozsah 300-20 000 Hz, výkon 1,5 W). Reproduktor byl napájen ze signálního generátoru měřicího systému B&K PULSE přes výkonový zesilovač LV-102. Použito bylo náhodné buzení v měřicím rozsahu do 6.4 kHz. Akustická odezva byla snímána miniaturním sluchadlovým elektretovým mikrofonom KNOWLES typ 3033 (6x5x2 mm). Tento mikrofón byl připevněn na tenkém drátu tak, aby jím bylo možno postupně proměřit akustickou odezvu v celkem 16. polohách uvnitř modelu vokálního traktu, tj. v ekvidistančně po 1 cm vzdálených bodech, počínaje

polohou u reproduktoru a konče před ústním otvorem (viz obr. 3).



Obr. 3 Miniaturní mikrofon KNOWLES



Obr. 4 Uspořádání experimentu

Signál z mikrofonu KNOWLES byl zesilován předzesilovačem – viz obr. 3 dole. Podobným způsobem a stejným mikrofonem byly měřeny úrovně zvuku v ústní dutině člověka *in vivo* při fonaci subjektů po znecitlivění vokálního traktu [4]. Druhý, přesnější mikrofon hlukoměru B&K typ 2239 byl umístěn ve větší vzdálenosti před modelem ústního otvoru tak, aby neovlivňoval akustické vlastnosti ve vokálním traktu (viz obr. 3 vpravo). Hlukoměr sloužil pro kontrolu správnosti měření a pro ověřování funkčnosti miniaturního mikrofonu.

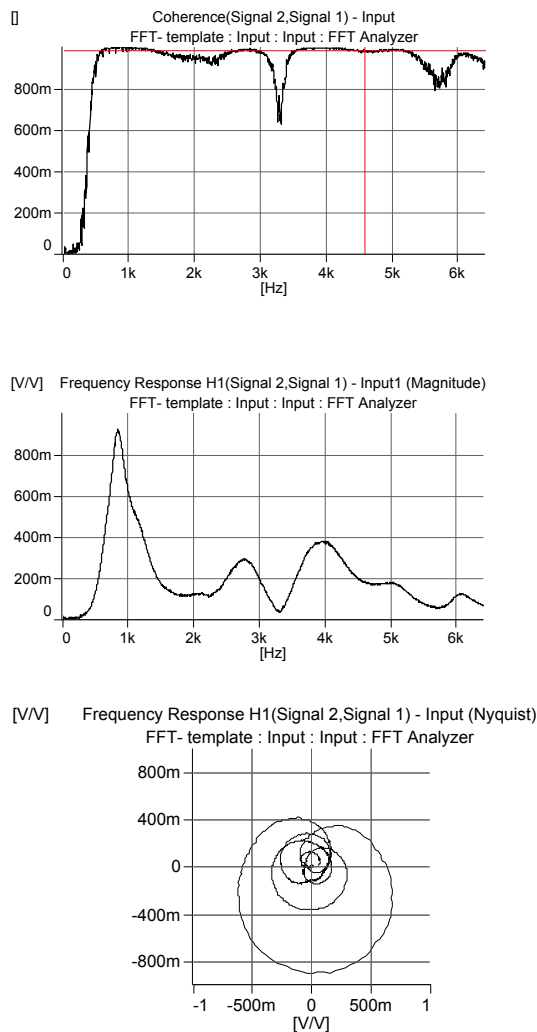
Vstupní i výstupní signály byly snímány a zpracovávány počítačem řízeným systémem B&K PULSE a současně monitorovány zařízením Scope-corder YOKOGAWA 750. Laboratorní uspořádání celého experimentu je patrné z obr. 4, kde měřený model vokálního traktu lze vidět na pravém okraji snímku, vedle měřícího zařízení YOKOGAWA. Na obr. 5 je příklad naměřených charakteristik pro jednu kombinaci poloh budič (reproduktor) – snímač (mikrofon). Koherenční funkce (viz obr. 5a) je v okolí hlavních rezonancí rovna zhruba jedné, tzn. že systém lze považovat přibližně za lineární. Z poklesu koherenční funkce u menšího vrcholu amplitudo-frekvenční charakteristiky na obr. 5b, ležícího v okolí frekvence 2 kHz, lze usuzovat, že se jedná o nějakou parazitní rezonanci. Na obr. 5c je v komplexní rovině zobrazena komplexní přenosová funkce $H_{1j}(f) = \text{Re } H_{1j}(f) + i \text{Im } H_{1j}(f)$ naměřená ve frekvenčním intervalu 0 až 6.4 kHz. Identifikace akustických vlastních frekvencí, útlumu (resp. absorpce zvuku) a akustických tvarů kmitání byla provedena globální metodou vyhlazení [7] všech přenosových funkcí $H_{1j}(f)$ najednou pro $j=1,2,\dots,16$.

4. Výsledky experimentální modální analýzy a jejich porovnání s akustickými měřeními při fonaci subjektu během MRI, s výpočty MKP a s údaji z foniatrické literatury

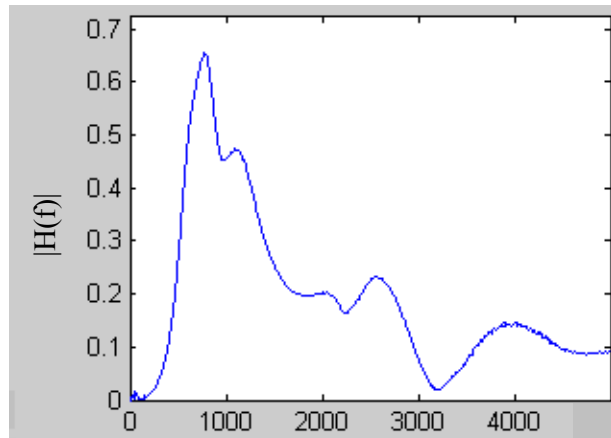
Z naměřené, tzv. součtové křivky $|H(f)| = \sum_{j=1}^{16} |H_{1j}(f)|$ na obr. 6 je patrné, že ve frekvenčním rozsahu 0 až 4 kHz je celkem pět rezonančních frekvencí. Příklad globálního vyhlazení přenosových funkcí $H_{1j}(f)$, $j=1,2,\dots,16$ ve frekvenčním okolí první rezonance po několika iteračních krocích je uveden na obr. 7.

Takto identifikované vlastní frekvence f_k , poměrné útlumy D_k a z nich vypočtené šířky rezonančních vrcholů při poklesu úrovně přenosové funkce o 3 dB:

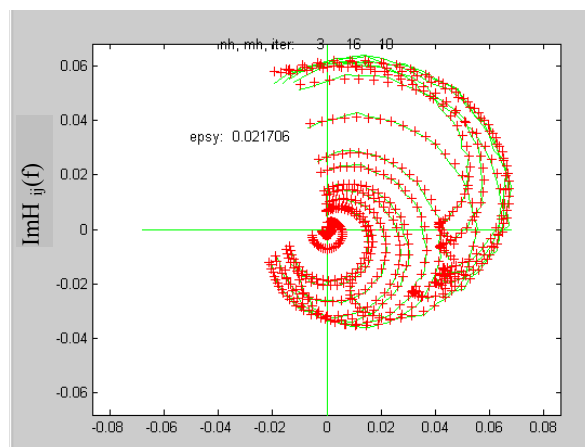
$\Delta f_k = 2 f_{k0} D_k = 2 f_k D_k / \sqrt{1 - D_k^2}$ ($k=1,2,\dots,5$) jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.



Obr. 5 Ukázka naměřených dat: koherenční funkce, absolutní hodnota přenosové funkce a komplexní přenosová funkce ve fázové rovině.

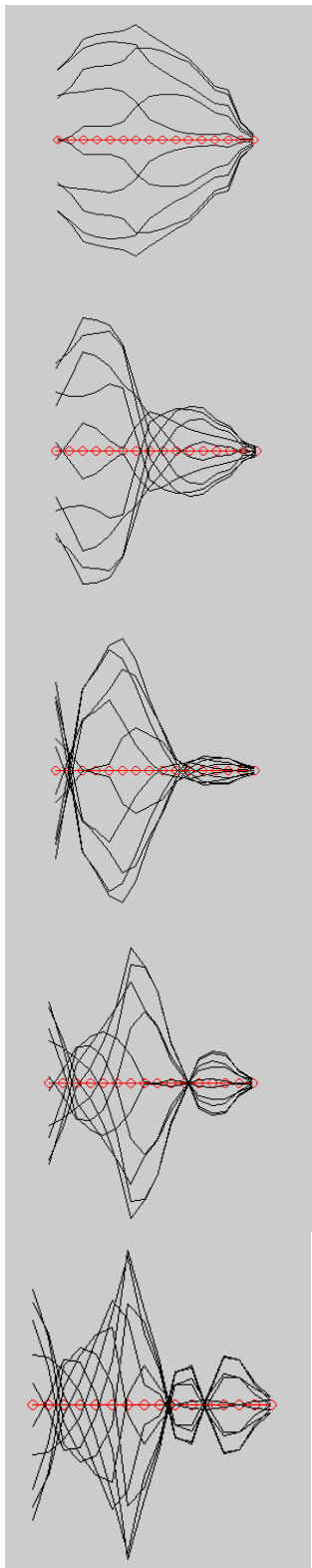


Obr. 6 Součtová křivka naměřených přenosových funkcí.



Obr. 7 Vyhlazené komplexní přenosové funkce $H_{1j}(f)$ v okolí 1. rezonance ($j=1,2,\dots,16$).

Všem pěti vlastním frekvencím f_k odpovídající komplexní vlastní tvary kmitání $\mathbf{v} = (\text{Re } \mathbf{v} + i \text{Im } \mathbf{v})e^{i\omega t}$ jsou animovány na obr. 8, kde jsou výchylky zobrazeny postupně v deseti časových okamžicích během jedné periody kmitání. Vzhledem k naměřenému vysokému útlumu (viz Tab. 1) jsou vlastní tvary kmitání výrazně komplexní a nemají klasické uzlové body.



Obr. 8 Animované vlastní tvary kmitání během jedné periody.

Levému okraji s výraznými amplitudami kmitání zhruba odpovídá rovina hlasivek a pravému konci s téměř nulovými amplitudami akustických tlaků odpovídá pozice mikrofonu cca 1 cm před modelem ústního otvoru.

Poznamenejme, že akustické rezonanční frekvence vokálního traktu se ve foniatrii nazývají formanty. Pro porovnání naměřených vlastních frekvencí uvedených v Tab. 1 s jinými údaji jsou v tabulce Tab. 2 uvedeny frekvenční intervaly prvních tří formantů F1-F3 uváděných pro českou samohlásku / a / ve foniatrické literatuře [5,6]. Kromě toho jsou v další tabulce Tab. 3 uvedeny formantové frekvence převzaté z práce [2] vyhodnocené ze zvukového záznamu během fonace přímo při pořizování MRI sekvencí. Současně jsou zde uvedeny i vlastní frekvence vypočtené modální analýzou MKP modelu samohlásky /a/ - viz obr. 1b a práce [2,3].

5. Diskuse výsledků

Identifikované vlastní frekvence f_k uvedené v Tab. 1 jsou v dobré shodě s formantovými frekvencemi F1-F3 v Tab. 2 a 3, přičemž $f_1 \approx F1, f_2 \approx F2, f_4 \approx F3$. Původ zřejmě parazitní, nevýrazné třetí vlastní frekvence f_3 se nepodařilo objasnit, vzhledem k nemožnosti detailnější 3D experimentální analýzy akustického pole uvnitř modelu vokálního traktu v důsledku jeho malých rozměrů ve srovnání s rozměry použitého, i když miniaturního mikrofonu.

Poněkud horší shoda experimentálně identifikovaných vlastních frekvencí je s vlastními frekvencemi vypočtenými modální analýzou MKP modelů (viz Tab. 3), i když experimentální identifikované vlastní tvary kmitání jsou v jistém kvalitativním souladu s akustickými tvary kmitání vypočtenými pro MKP model vokálního traktu bez tlumení. První tvar kmitu odpovídá délce jedné čtvrtvlny, druhý tvar kmitu má jeden uzel podélných akustických kmitů uvnitř vokálního traktu a třetí a čtvrtý tvar zde má dva uzly – viz obr. 8.

V souladu s realitou však zdaleka není experimentálně zjištěná vysoká úroveň útlumu (absorpce) akustických vln v modelu vokálního traktu. Ve foniatrické literatuře lze nalézt, že šířky 3dB pásem poklesu rezonančních křivek by se u prvních tří formantů měly pohybovat v rozmezí $\Delta F \approx 40 - 250$ Hz, přičemž typická hodnota dle Fanta [10] je $\Delta F \approx 100$ Hz. Jovičič [9] uvádí, že vyšší hodnoty $\Delta F \approx 117 - 160$ Hz lze nalézt jen u šepem vyslovovaných samohlásek. Námi zjištěné hodnoty Δf_k

pro absorpci zvuku (viz Tab.1) na stěnách vokálního traktu tedy vysoko přesahují fyziologicky reálné hodnoty útlumu.

	<i>k</i>				
	1 (F1)	2 (F2)	3	4 (F3)	5
f_k [Hz]	812.9	1093	2175	2677	3841
D_k [%]	18.4	19.3	7.27	10.0	8.86
Δf_k [Hz]	304	430	317	538	663

Tab. 1 Vyhodnocené akustické vlastní frekvence, poměrné útlumy a šířky rezonančních vrcholů pro pokles o 3dB.

Česká samohláska	Frekvenční intervaly formantových frekvencí		
	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
/ a /	700 – 1 100	1 100 – 1 500	2 500 – 3 000

Tab. 2 Frekvenční intervaly formantů F1 - F3 podle Hály, Ramporta a Sedláčka [5,6,8].

Česká samohláska	Vypočtené hodnoty vlastních frekvencí		
	F1 _{vyp} [Hz]	F2 _{vyp} [Hz]	F3 _{vyp} [Hz]
/ a /	628,7	1 145,0	3 028,0
	Naměřené rozsahy formantových frekvencí		
	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
	600 - 840	1 100 – 1 230	2 450 – 2 730

Tab. 3 Z MKP modelu vypočtené vlastní a formantové frekvence F1- F3 naměřené *in vivo* při MRI sekvenci [2,3].

kvalitu zpěvního hlasu. Problémem zůstává v dalších experimentech snížit nereálně vysokou absorpci zvuku na stěnách modelu vokálního traktu.

7. Poděkování

Príspevek byl zpracován díky podpoře grantového projektu GA ČR 106/04/1025 „Modelování vibroakustických systémů se zaměřením na vokální trakt člověka“.

8. Literatura

- [1] Kršek, P. (2000) Possibilities of creation of FEM models from CT/MR data. In: *Proc. Engineering Mechanics 2000*, Svratka, 15.-18.5. 2000, Vol. 3, pp. 27 – 32.
- [2] Dedouch, K., Švec, J. G., Horáček, J., Kršek, P., Havlík, R., Vokřál, J. (2003) Akustická analýza mužského vokálního traktu pro české samohlásky. In: *Sb. Česko-slovenský foniatrický kongres a 14. Celostátní foniatrické dny Evy Sedláčkové*, Brno 11.-13.9. 2003, Audio-Fon centr s.r.o., 60-63.

6. Závěr

Identifikované velikosti prvních tří formantových frekvencí F1 – F3 jsou v poměrně dobré shodě jak s výsledky měření *in vivo* [2], tak s údaji publikovanými pro české samohlásky v literatuře [5,6].

Metodou *rapid prototyping* vytvořené modely lze např. použít pro simulace fonace samohlásek a to s cílem umožnit snadnější a podrobnější experimentální analýzy než jaké lze získat z akustických měření v ústní dutině *in vivo* [4].

Teoretické (MKP) modely i fyzikální modely lze též využít k simulacím vlivu různých defektů, vrozených vad a pooperačních stavů na výslovnost hlásek, resp. na

- [3] Dedouch, K., Horáček, J., Vampola, T., Švec, J.G., Kršek, P., Havlík, R. (2002) Acoustic modal analysis of male vocal tract for Czech vowels. In: *Proc. Interaction and Feedbacks '2002*, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague Nov. 26-27, 2002, pp. 13 – 20.
- [4] Vokřál J, Vohradník M, Horáček J (2001) Measurement of acoustic pressure in supraglottal spaces. In: *Proc. Interaction and Feedbacks '2001*, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague, Nov. 27-28, 2001, pp. 237-244.
- [5] Palková, Z. (1994) *Fonetika a fonologie českého jazyka*. Universita Karlova, Karolinum, Praha.
- [6] Novák A. (1996) *Foniatrye a pedaudiologie. Poruchy hlasu - základy fyziologie hlasu, diagnostika, léčba, reedukace a rehabilitace*. Unitisk s.r.o., Praha.
- [7] Pešek, L. (1999) Globální MIMO identifikační metoda v časové a frekvenční oblasti. In: *Sb. Inženýrská mechanika '99*. Svratka 17.-20.5. 1999, Ústav mechaniky těles, FS VUT Brno, 183-188.
- [8] Hála, B. (1962) *Uvedení do fonetiky češtiny na obecném fonetickém základě*. ČSAV, Praha.
- [9] Jovičič, S. T. (1998) Formant feature difference between whispered and voiced sustained vowels. *Acustica – acta acustica*, 84, 739-743.
- [10] Fant, G.M. (1956) On the predictability of formant levels and spectrum envelopes from formant frequencies. In *For Roman Jakobson*, eds. Halle, M., Lunt, H. and MacLean M., Mouton and Company, Gravenhage, The Netherlands, pp. 109-120.