

FINITE ELEMENT MODELING OF MALE VOCAL TRACT ACOUSTICS CONSIDERING CLEFT PALATE

K. Dedouch¹⁾, J. Horáček²⁾, T. Vampola¹⁾, J. Vokřál³⁾

***Summary:** Finite element (FE) models of real male vocal and nasal tract corresponding to the Czech vowels / i / and / u / are analyzed in this paper. The FE models were designed by direct transferring data obtained from MRI images. The acoustic signals for the Czech vowels / i / and / u / are simulated using transient analysis of investigated FE models in time domain. The frequency and time response functions are calculated in the FE nodes near the lips, nostrils and at the vocal folds. Both FE models involve the effect of cleft palate. Results of numerical solution are compared with the acoustic modal analysis.*

1. Výpočetní konečněprvkové modely

Výpočetní modely reálných vokálních traktů člověka, příslušné českým samohláskám /i/ a /u/ byly získány pomocí přímé transformace datových souborů z magnetické rezonance (MRI) do konečněprvkových modelů. Konečněprvkový model nasálního traktu byl navržen v souladu s anatomickými údaji publikovanými v literatuře a byl k modelům vokálních traktů připojen dodatečně. Oba výpočetní modely tak umožňují studovat i vliv rozštěpu měkkého patra, resp. velofaryngeální insuficience, na fonaci samohlásek /i/ a /u/. Výpočetní modely byly navrženy v systému ANSYS 5.7 s použitím akustických konečných prvků FLUID 30. Materiálové vlastnosti byly reprezentovány rychlostí zvuku $c_0 = 353 \text{ ms}^{-1}$ a hustotou vzduchu $\rho_0 = 1.2 \text{ kgm}^{-3}$ pro 37°C . Okrajové podmínky byly vyjádřeny nulovou hodnotou akustického tlaku v rovině úst a nosních dírek. Pohltivost akustické energie na hraničních plochách výpočetních modelů nebyla uvažována. Pulsní buzení výpočetních modelů bylo realizováno časovými průběhy odpovídající pulsům objemové akustické rychlosti vzduchu protékajícího rovinou hlasivek. Byly uvažovány dva typy těchto časových průběhů pulsů. První byl publikován I.R. Titzem, S. Mapesem a B. Storym [1], druhý typ byl navržen E. O'Leidhinem a P. Murphym [2]. FE model odpovídající české samohlásce / i / je uveden na obr. 1 a na obr. 2 je znázorněn FE model příslušný české samohlásce / u /. Rozštěp měkkého patra byl modelován v rozsahu daném cca 20 konečnými prvky propojujícími vokální a nasální trakt.

2. Matematická formulace úlohy interakce pružné struktury s akustickým mediem

Velikost akustického tlaku ve vyšetřovaném akustickém prostoru je popsána vlnovou rovnicí

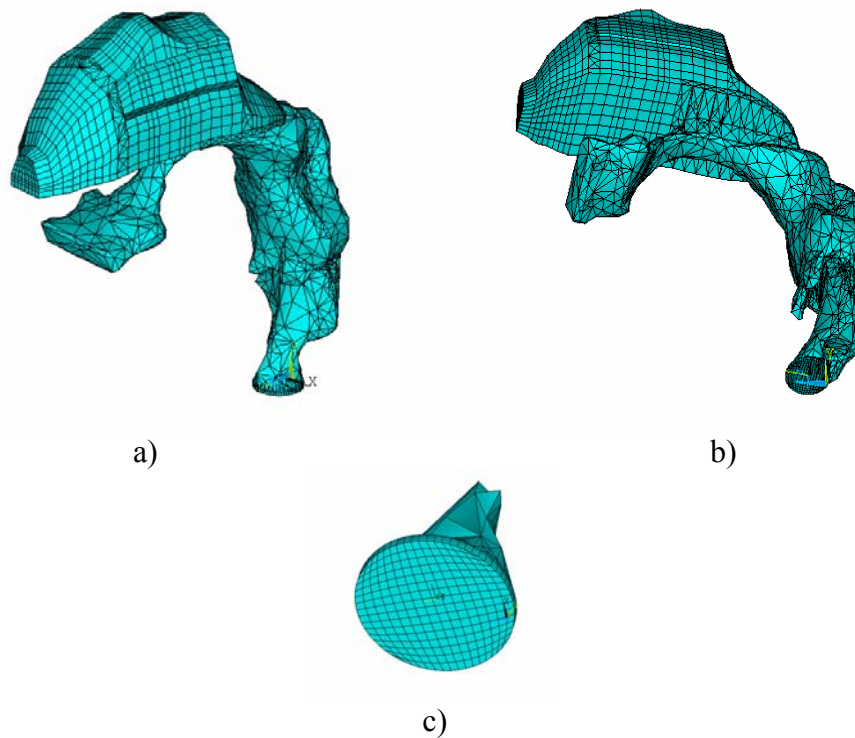
¹⁾ Doc. Ing. Karel Dedouch, CSc., Dr. Ing. Tomáš Vampola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, Karlovo nám. 13, 12135 Praha 2, tel.: 22435 7377, 22435 7244, e-mail: dedouch@fsik.cvut.cz, vampola@fsik.cvut.cz

²⁾ Ing. Jaromír Horáček, DrSc., Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, e-mail : jaromirh@it.cas.cz

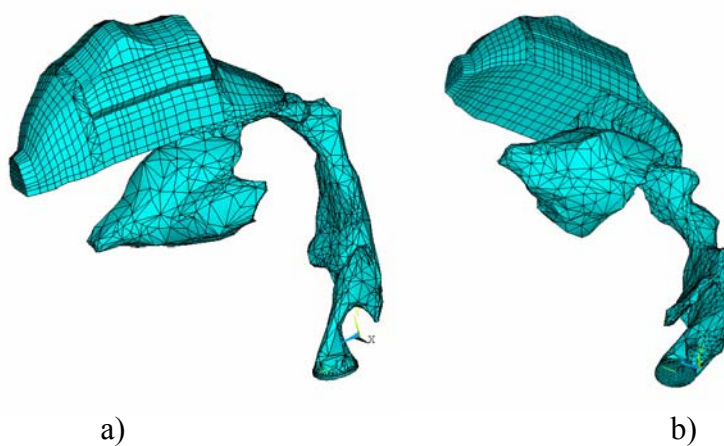
³⁾ Dr. Ing. Jan Vokřál, Foniatriká klinika, 1. LF UK, Žitná 24, 120 00 Praha 2

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (1)$$

kde c_0 je velikost akustické rychlosti



Obr. 1 - a), b) FE model vokálního traktu člověka odpovídající české samohlásce / i / s připojeným nasálním traktem; c) detail dodatečně připojených akustických konečných prvků, na kterých bylo aplikováno vnější buzení v rovině hlasivek.



Obr. 2 - a), b) FE model vokálního traktu člověka odpovídající české samohlásce / u / s připojeným nasálním traktem.

Okrajové podmínky byly v řešených úlohách uvažovány v následujících tvarech:
-na akusticky dokonale tuhé hranici a na otevřeném konci akustických prostorů

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = 0, \quad p = 0, \quad (2)$$

- na hranici pružné struktury s akustickým prostředím

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = -\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{w}_n}{\partial t^2}, \quad (3)$$

kde $\mathbf{n}$ je směr vnější normály k hraniční ploše a $\mathbf{w}_n$ je amplituda výchylky pružné struktury ve směru normály k hraniční ploše.

Po diskretizaci vlnové rovnice získáme pohybovou rovnici elastoakustické soustavy v globálním souřadnicovém systému ve tvaru :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \rho_0 \mathbf{R}^T & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (4)$$

kde $\mathbf{M}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{K}$ jsou globální matice hmotnosti, tlumení a tuhosti, $\mathbf{P}$ je vektor akustických tlaků, příslušných uzlovým bodům akustické struktury, indexy s a f označují pružnou strukturu a akustické medium, $\mathbf{u}$ jsou posuvy pružné struktury v příslušných uzlových bodech, $\mathbf{R}$ je vazební matice a ρ_0 je hustota akustického media.

V případě, kdy je akustické medium buzeno kinematicky zadaným pohybem pružné struktury, obdržíme pohybovou rovnici vyšetřované elastoakustické soustavy ve tvaru :

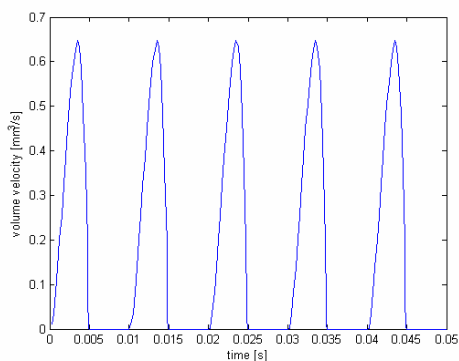
$$\begin{aligned} \mathbf{R}\mathbf{P} &= \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} \\ \mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{B}_f \dot{\mathbf{P}} + \mathbf{K}_f \mathbf{P} &= \rho_0 \mathbf{R}^T \ddot{\mathbf{u}}, \end{aligned} \quad (5)$$

kde je předepsán pohyb pružné struktury v uzlových bodech vektorem $\mathbf{u}(t)$. Pro řešení přechodových dějů v časové oblasti byla použita Newmarkova metoda.

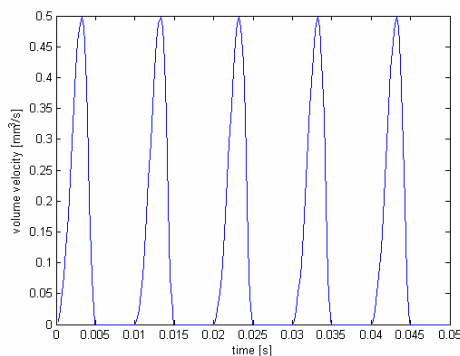
3. Výsledky numerického řešení

Výsledky přechodové dynamické analýzy konečněprvkových modelů byly získány ve tvaru časových průběhů akustických tlaků ve vybraných uzlových bodech vokálního traktu v blízkosti rovině hlasivek, rtů a v nasálním traktu v okolí nosních dírek. FE modely byly buzeny dvěma typy časových průběhů objemových akustických rychlostí, uvažovaných ve vybraných uzlových bodech na začátku vokálního traktu v rovině hlasivek. S ohledem na možnost srovnání vlivu pulsního buzení u obou vyšetřovaných FE modelů, byly původní modely doplněny v rovině hlasivek o malý přídavný akustický válcový prostor. V uzlových bodech, ležících na spodní podstavě, uvnitř kruhu o poloměru rovném 1/3 poloměru průřezu, bylo uvažováno pulsní buzení ve formě časového průběhu objemové akustické rychlosti vzduchu, protékajícího rovinou hlasivek. Časové průběhy dvou typů budících pulsů jsou uvedeny na obr. 3.

Výsledky přechodové akustické analýzy vyšetřovaných konečněprvkových modelů jsou zobrazeny na obr. 4 až 11. Autospektra akustického tlaku příslušná FE modelu vokálního traktu, odpovídajícího samohlásce / i / jsou uvedena pro první typ pulsu na obr. 4 a 5, pro druhý typ pulsního buzení na obr. 6 a 7. Výsledky přechodové analýzy FE modelu odpovídajícího samohlásce / u / jsou zobrazeny pro první typ pulsu na obr. 8 a 9, pro druhý typ pulsního buzení na obr. 10 a 11.



a)

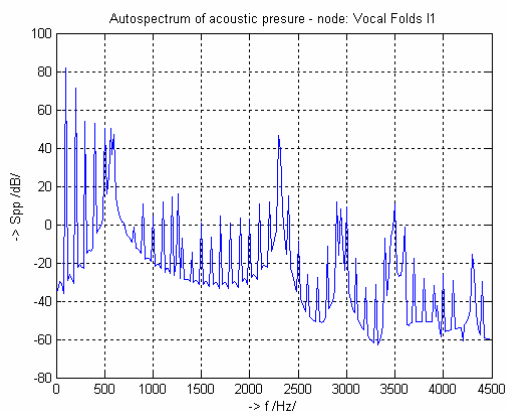


b)

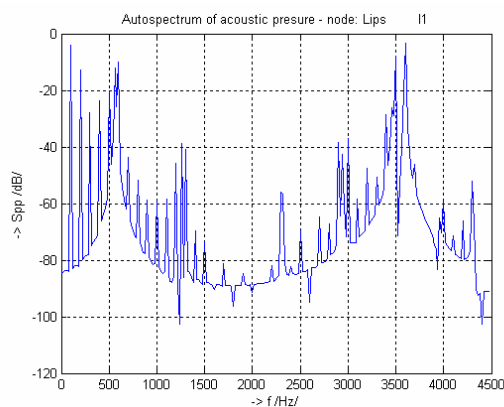
Obr. 3 Průběhy objemových rychlostí vzduchu protékajícího rovinou hlasivek:

a) 1. typ pulsu - časový průběh pulsu publikovaný I.R. Titzem, S. Mapesem a B. Storym [1],

b) 2. typ pulsu - časový průběh pulsu navržený E. O'Leidhinem a P. Murphym [2].



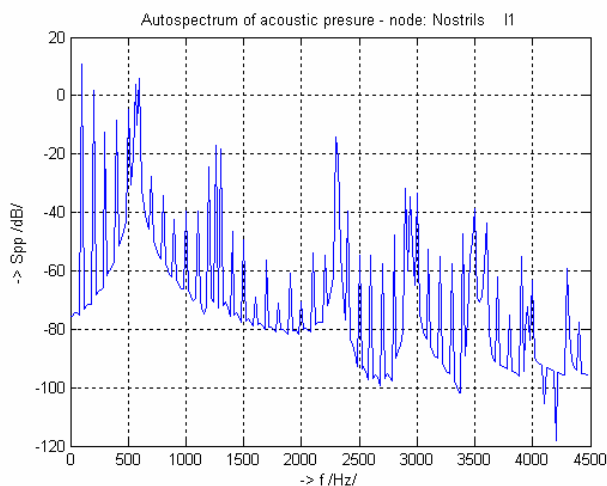
a)



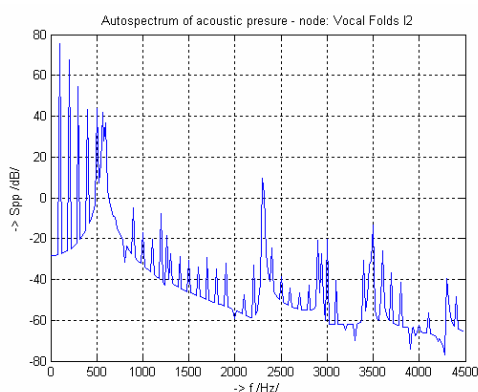
b)

Obr. 4 Autospektra akustického tlaku v uzlových bodech ležících: a) v rovině nad hlasivkami,

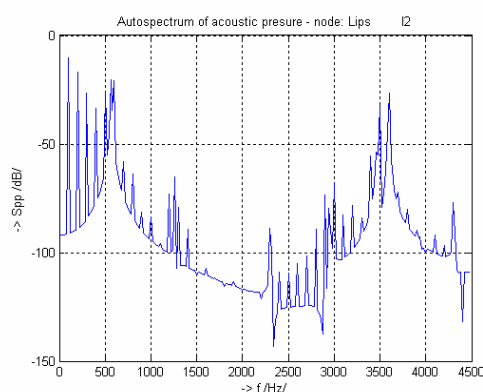
b) v blízkosti úst pro FE model samohlásky / i / pro 1. typ budícího pulsu.



Obr. 5 Autospektrum akustického tlaku v uzlovém bodě v blízkosti nosních dírek pro FE model samohlásky / i / pro 1. typ budícího pulsu.

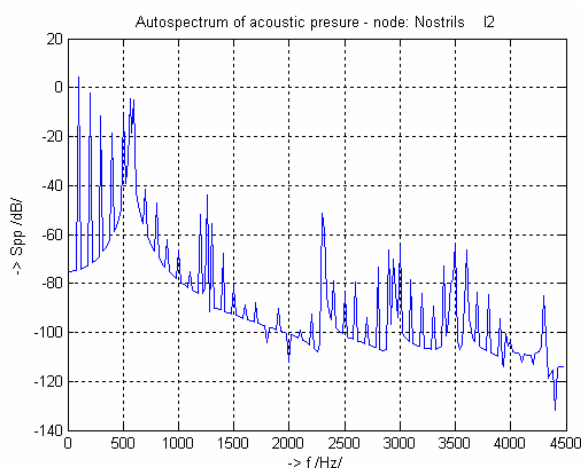


a)

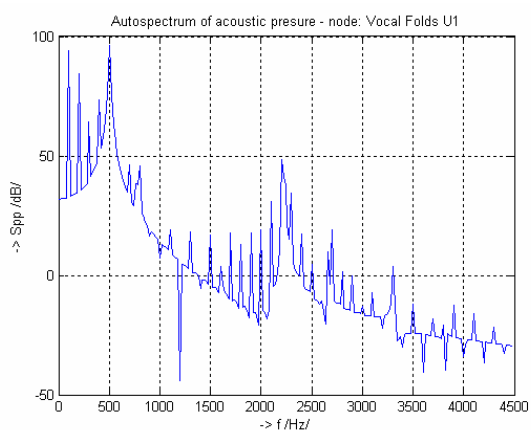


b)

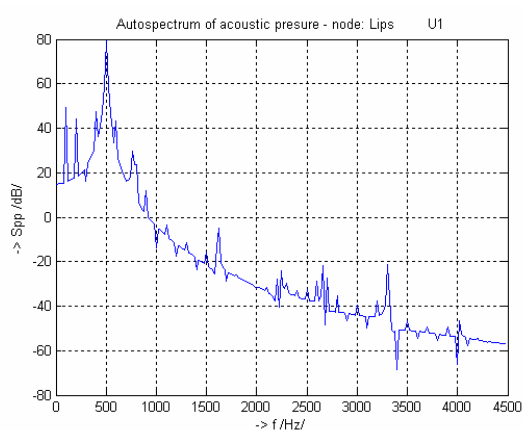
Obr. 6 Autospektra akustického tlaku v uzlových bodech ležících: a) v rovině nad hlasivkami, b) v blízkosti úst pro FE model samohlásky / i / pro 2. typ budícího pulsu.



Obr. 7 Autospektrum akustického tlaku v uzlovém bodě v blízkosti nosních dírek pro FE model samohlásky / i / pro 2. typ budícího pulsu.

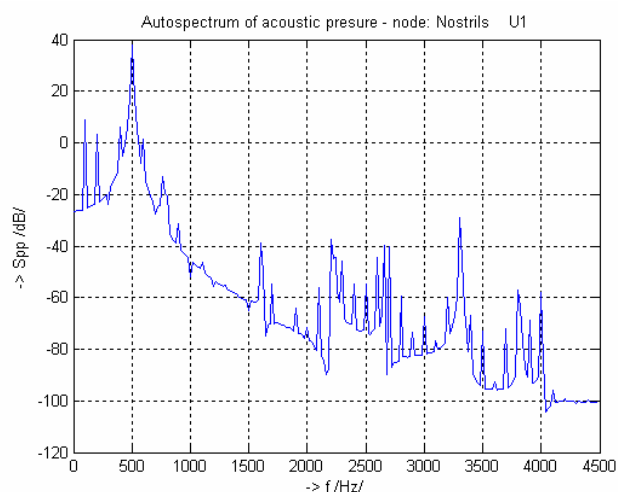


a)

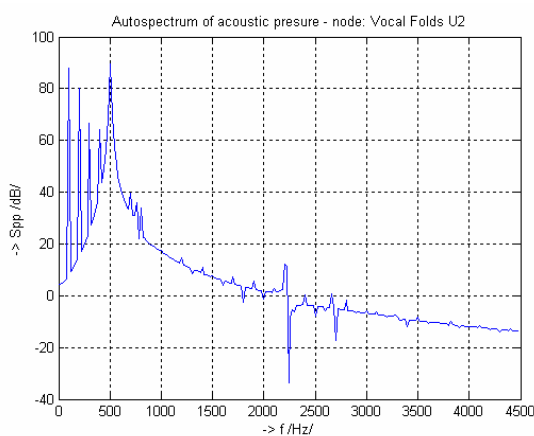


b)

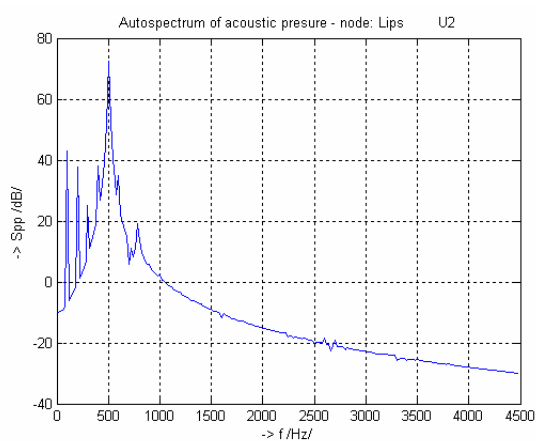
Obr. 8 Autospektra akustického tlaku v uzlových bodech ležících: a) v rovině nad hlasivkami, b) v blízkosti úst pro FE model samohlásky / u / pro 1. typ budícího pulsu.



Obr. 9 Autospektrum akustického tlaku v uzlovém bodě v blízkosti nosních dírek pro FE model samohlásky / u / pro 1. typ budícího pulsu.

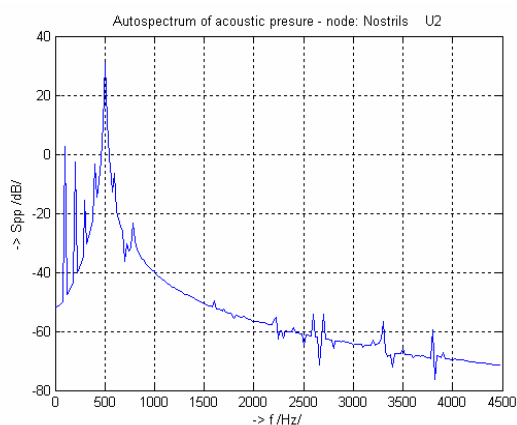


a)



b)

Obr. 10 Autospektra akustického tlaku v uzlových bodech ležících: a) v rovině nad hlasivkami, b) v rovině v blízkosti úst pro FE model samohlásky / u / pro 2. typ budícího pulsu.



Obr. 11 Autospektrum akustického tlaku v uzlovém bodě ležícím v blízkosti nosních dírek pro FE model samohlásky / u / pro 2. typ budícího pulsu.

Výsledky získané z přechodové analýzy FE modelů vokálních traktů byly ověřeny s použitím akustické modální analýzy těchto modelů. Prvé tři akustické rezonanční frekvence F1, F2, F3

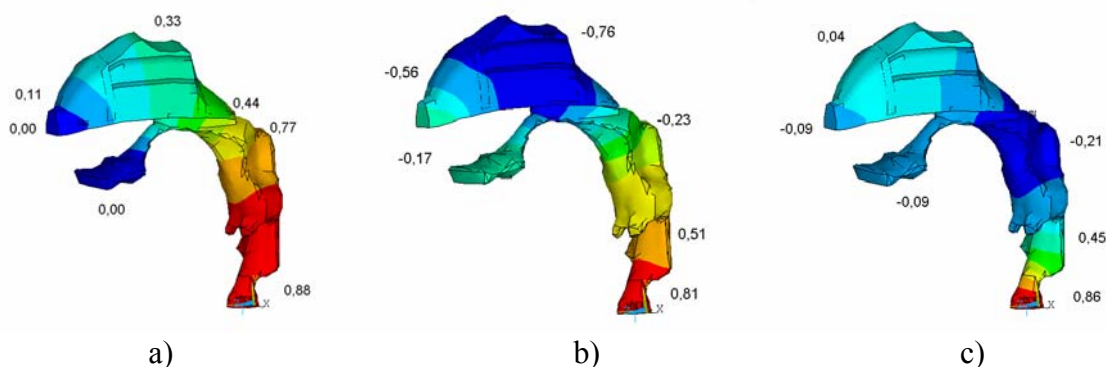
vyhodnocené ze spekter na obr. 4 až 11 jsou v tabulkách Tab.1 (pro samohlásku / i /) a v Tab. 2 (pro samohlásku / u /) porovnány s výsledky modální analýzy pro prvé tři vlastní frekvence. Porovnáme-li výsledky přechodové analýzy FE modelu pro samohlásku / i / s výsledky modální analýzy samotného vokálního traktu bez rozštěpu, je patrné, že vlastní frekvence F2 modelu samotného vokálního traktu odpovídá vlastní frekvenci F3 kompletního modelu, tj. modelu s propojeným vokálním a nasálním traktem. Na obr. 12 jsou uvedeny první tři vlastní tvary kmitání kompletního modelu získané modální analýzou pro samohlásku / i /.

Buzení	Poloha uzlu	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
1. typ pulsu	Nad hlasivkami	560	1 290	2 330
	V blízkosti úst	560	1 330	2 330
	V blízkosti nosu	560	1 330	2 375
2. typ pulsu	Nad hlasivkami	560	1 208	2 317
	V blízkosti úst	560	1 250	2 292
	V blízkosti nosu	560	1 330	2 375
Modální analýza		566,6	1 264,5	2 342,8
Modální analýza modelu bez rozštěpu		254,2	2 357,7	3 194,2

Tab. 1 Výsledky přechodové a modální analýzy FE modelu pro samohlásku / i /.

Buzení	Poloha uzlu	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
1. typ pulsu	Nad hlasivkami	500	786	1 678
	V blízkosti úst	500	770	1 616
	V blízkosti nosu	500	753	1 612
2. typ pulsu	Nad hlasivkami	500	678	-
	V blízkosti úst	500	748	-
	V blízkosti nosu	500	770	-
Modální analýza		500,3	769,4	1 625,8
Modální analýza modelu bez rozštěpu		395,1	819,1	2 123,8

Tab. 2 Výsledky přechodové a modální analýzy FE modelu pro samohlásku / u /.



Obr. 12 Prvé tři akustické vlastní tvary kmitání FE modelu supraglotického traktu člověka pro českou samohlásku / i / : a) F1 = 566,6 Hz, b) F2 = 1 264,5 Hz, c) F3 = 2 342,8 Hz.

Z výsledků analýzy FE modelů vokálního traktu vyplývá, že bylo dosaženo dobré shody hodnot vlastních a rezonančních frekvencí F1 – F3, vyšetřených z přechodové a modální analýzy. U druhého typu pulsního buzení se pro samohlásku / u / nepodařilo vybudit třetí vlastní frekvenci F3, což je zároveň zřejmé z průběhů autospekter akustických tlaků na obr. 10 a 11, kde je patrná dominantní velikost akustické odezvy v blízkosti první rezonanční frekvence F1. Z numerického řešení též vyplývá, že použité časové průběhy pulsního buzení prakticky neovlivnily výsledky analýzy z hlediska určení rezonančních frekvencí F1 – F3, a to u obou FE modelů, jen s výše uvedenou výjimkou pro frekvenci F3 u samohlásky / u /.

4. Závěr

Z výsledků přechodové a modální akustické analýzy FE modelů reálných vokálních traktů člověka, příslušných českým samohláskám / i / a / u / je možné učinit následující závěry:

- oba použité typy pulsního buzení vedly ke stanovení zhruba stejných akustických rezonančních frekvencí F1 – F3 (formantů), a to u obou vyšetřovaných modelů,
- připojený model nasálního traktu výrazně ovlivnil velikosti frekvencí F1-F3, a to zejména u FE modelu pro samohlásku / i /,
- výsledky numerického řešení, získané z přechodové i modální analýzy vyšetřovaných výpočetních modelů spolu navzájem korespondují a jsou v dobré shodě s údaji publikovanými v odborné foniatričké literatuře [6] pro tzv. formanty, což jsou právě námi analyzované frekvence F1 až F3.
- ve shodě s literaturou [7] se vliv rozštěpu na formanty F1-F3 pro obě samohlásky / i / a / u / ukazuje jako velmi významný, což nasvědčuje malé srozumitelnosti řeči při výslovnosti těchto hlásek osobami postiženými velofaryngeální nedostatečností.

5. Poděkování

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

6. Literatura

- [1] Titze, I.R., Mapes, S., Story, B. (1994) Acoustics of the tenor high voice. *J. Acoust. Soc. Am.* **95** (2), pp. 1133 – 1142.
- [2] O'Leidhin, E., Murphy, P. (2003) Preliminary glottal source modeling for pathologic voices. In: *Proc. 3rd International Workshop MAVEBA 2003*, Firenze, Italy, pp. 237 – 240.
- [3] Dedouch, K., Horáček, J., Vampola, T., Vokřál, J. (2003) Velofaryngeal insufficiency studied using finite element models of male vocal tract with experimental verification. In: *Proc. 3rd International Workshop MAVEBA 2003*, Firenze, Italy, pp. 229 – 232.
- [4] 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.
- [6] Novák, A., (1996) *Foniatric a pedaudiologie. Poruchy hlasu*. Unitisk, s.r.o., Praha.
- [7] Vohradník, M., (2001) *Poruchy řečové komunikace u velofaryngeální insuficience*. Scriptorium, Dolní Břežany.