



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**MODELOVÁNÍ VOKÁLNÍHO TRAKTU ČLOVĚKA
S UVAŽOVÁNÍM ROZŠTĚPU PATRA POMOCÍ MKP**

K. Dedouch*, J. Horáček**, T. Vampola***, L. Černý****

V příspěvku jsou uvedeny výsledky akustické modální analýzy výpočetního modelu vokálního traktu člověka, který odpovídá fonaci české samohlásky /a/. Konečněprvkový model supraglotického prostoru byl vytvořen na základě dat, získaných ze snímků z magnetické rezonance. Cílem modální analýzy bylo vyšetření vlivu velikosti plochy rozštěpu patra na hodnoty vlastních frekvencí, které odpovídají jednotlivým formantům. Získané výsledky byly porovnány s velikostmi vlastních frekvencí, které odpovídají zjednodušenému původnímu výpočetnímu modelu vokálního traktu člověka.

Klíčová slova : MKP model, modální analýza, vokální trakt člověka

NÁVRH MKP MODELŮ VOKÁLNÍHO TRAKTU ČLOVĚKA

Původní výpočetní model vokálního traktu člověka [5], který odpovídá anglické samohlásce /a/ byl navržen v souladu s daty, publikovanými autory Story a kol. [1]. Velikost prostoru nosohltanu a velikosti rozštěpu patra a jejich poloha byly navrženy v souladu s údaji, které byly publikovány v literatuře [7]. Nový výpočetní model vokálního traktu člověka vychází z modelu supraglotického prostoru, vytvořeného Krškem na základě snímků, získaných z magnetické rezonance [MRI], [6]. Tento výpočetní model byl doplněn modelem nosohltanu a oba akustické prostory byly vzájemně spojeny prostorem, který byl použit pro modelování rozštěpu patra. U analyzovaných výpočetních modelů nebyla uvažována interakce akustického media s pružnou strukturou, ani vliv pohltivosti hraničních ploch akustických prostorů.

Rozložení akustických tlaků v uzavřeném prostoru je popsáno vlnovou rovnicí

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

*Doc.Ing.Karel Dedouch, CSc., ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2, E-mail : dedouch@fsik.cvut.cz

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

***Dr. Ing. Tomáš Vampola, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2, E-mail : vampola@fsik.cvut.cz

**** MUDr. Ladislav Černý, Foniatriká klinika, 1. lékařská fakulta UK, Žitná 24, Praha 2

kde c_0 je rychlost zvuku ve vyšetřovaném akustickém prostoru. Okrajová podmínka na akusticky dokonalé tuhé hraniční ploše je dána vztahem

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

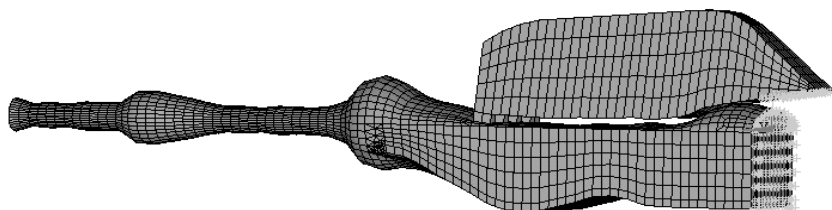
kde $\mathbf{n}$ je směr normály k hraniční ploše. Otevřenému konci akustického prostoru odpovídá podmínka

$$p = 0. \quad (3)$$

Po diskretizaci vlnové rovnice obdržíme pohybovou rovnici popisující rozložení akustických tlaků v jednotlivých uzlových bodech konečnoprvkového modelu. Tato rovnice, zapsaná v maticovém tvaru, je v globálních souřadnicích rovna

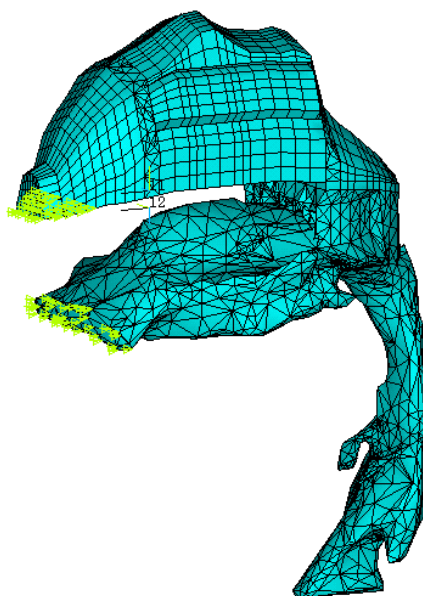
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{P}} + \mathbf{K}\mathbf{P} = \mathbf{0}, \quad (4)$$

kde $\mathbf{M}$ je matice hmotnosti, $\mathbf{B}$ matice tlumení a $\mathbf{K}$ matice tuhosti. $\mathbf{P}$ je vektor akustických tlaků v uzlových bodech. U vyšetřovaných modelů nebylo tlumení uvažováno ($\mathbf{B} = \mathbf{0}$). Pro modální analýzu výpočetních modelů byl použit výpočetní systém ANSYS 5.6 a 5.7, akustické prostory příslušné vokálnímu traktu byly modelovány konečnými prvky FLUID 30. V řešení byly použity následující materiálové konstanty : rychlost zvuku $c_0 = 353,2 \text{ ms}^{-1}$, hustota vzduchu $\rho = 1,2 \text{ kgm}^{-3}$. Původní výpočetní model, odpovídající samohlásce / a /, navržený pro studium vlivu velikosti rozštěpu patra na velikosti vlastních frekvencí supraglotického prostoru je uveden na obr. 1.



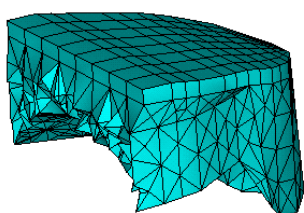
Obr. 1 Původní model vokálního traktu navržený pro samohlásku / a / s uvažováním vlivu rozštěpu patra

Výpočetní model vokálního traktu, navržený pro samohlásku / a / na základě snímků získaných z magnetické rezonance, je uveden na obr. 2. Vzhledem ke komplikovanému geometrickému tvaru akustických prostorů nosohltanu a s ohledem na omezenou rozlišitelnost řezů, ve kterých bylo možné jednotlivé snímky z magnetické rezonance získat, nepodařilo se vytvořit úplný výpočetní model vokálního traktu zahrnující i nosní dutiny pouze s využitím snímků z MRI. Proto byl za základ nového výpočetního modelu použit model supraglotického prostoru z MRI, který byl programově doplněn modelem akustických prostorů nosohltanu spolu se spojovacím akustickým prostorem, který byl využit při modelování jednotlivých variant velikosti rozštěpu patra. Geometrický tvar akustického prostoru nosohltanu byl získán z údajů, publikovaných M.Grimem v [8].

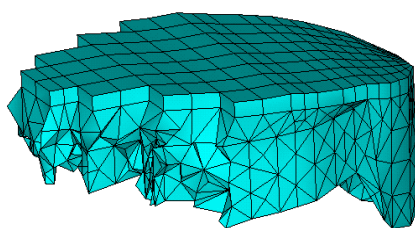


Obr. 2 Výpočetní model pro samohlásku /a/ navržený s použitím snímků z magnetické rezonance – 2. varianta rozštěpu patra

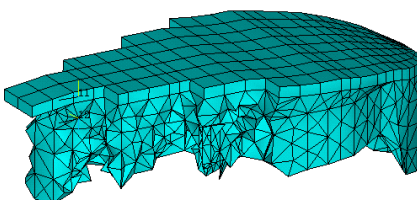
Velikosti akustických prostorů, které spojují supraglotický prostor s prostorem nosohltanu, jsou pro jednotlivé varianty modelovaných rozštěpů uvedeny na obr. 3. Poloha přední části rozštěpu byla umístěna shodně u obou vyšetřovaných modelů, celková plocha rozštěpu patra je však u nově navrženého modelu o něco větší. Velikost rozštěpu byla dána počtem N_r elementů, propojujících nosní a ústní dutinu.



a)



b)



c)

Obr. 3 Velikosti spojovacích akustických prostorů, příslušných variantám rozštěpu patra: a) 3. variantě, b) 4. variantě, c) 5. variantě řešení.

VÝSLEDKY NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ

Velikosti vlastních frekvencí, příslušných původnímu výpočetnímu modelu, jsou uvedeny v tab. 1. Hodnoty byly vypočteny pro předpokládanou velikost rychlosti zvuku $c_0 = 340 \text{ ms}^{-1}$. V tab. 2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty vlastních frekvencí příslušné nově navrženému výpočetnímu modelu vokálního traktu.

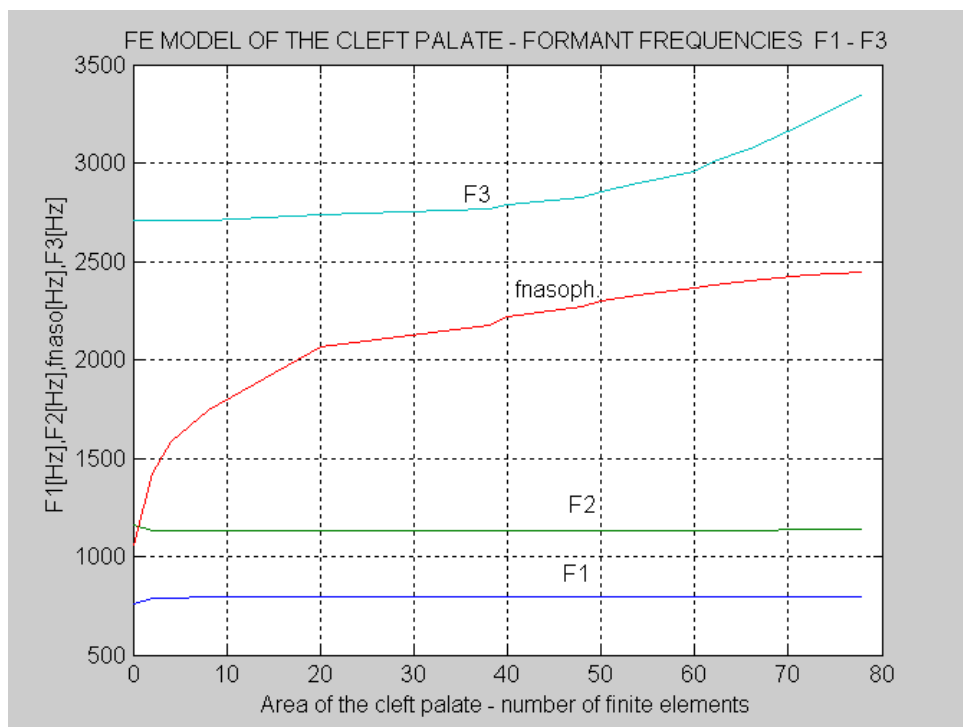
Plocha rozštěpu (počet elem. N_r)	Vlastní frekvence			
	F1 [Hz]	F2 [Hz]	$f_{\text{nasopharynx}}$ [Hz]	F3 [Hz]
0	759,27	1 157,84	1 060,20	2 708,17
2	787,29	1 131,31	1 424,82	2 708,74
4	791,68	1 133,13	1 584,64	2 709,21
8	794,38	1 133,71	1 747,72	2 710,07
20	795,48	1 133,30	2 065,23	2 736,23
38	795,43	1 133,04	2 174,22	2 768,04
40	795,43	1 133,30	2 217,94	2 791,55
48	795,43	1 133,09	2 271,17	2 826,21
50	795,49	1 133,41	2 298,70	2 856,42
54	795,60	1 133,76	2 331,32	2 901,30
60	795,73	1 133,97	2 362,51	2 956,43
62	795,85	1 134,40	2 381,06	3 005,08
66	796,04	1 134,87	2 401,18	3 071,06
72	796,58	1 136,25	2 428,49	3 206,15
78	797,27	1 137,94	2 448,09	3 351,81

Tab. 1 Vlastní frekvence původního výpočetního modelu pro samohlásku / a /
($c_0 = 340 \text{ ms}^{-1}$)

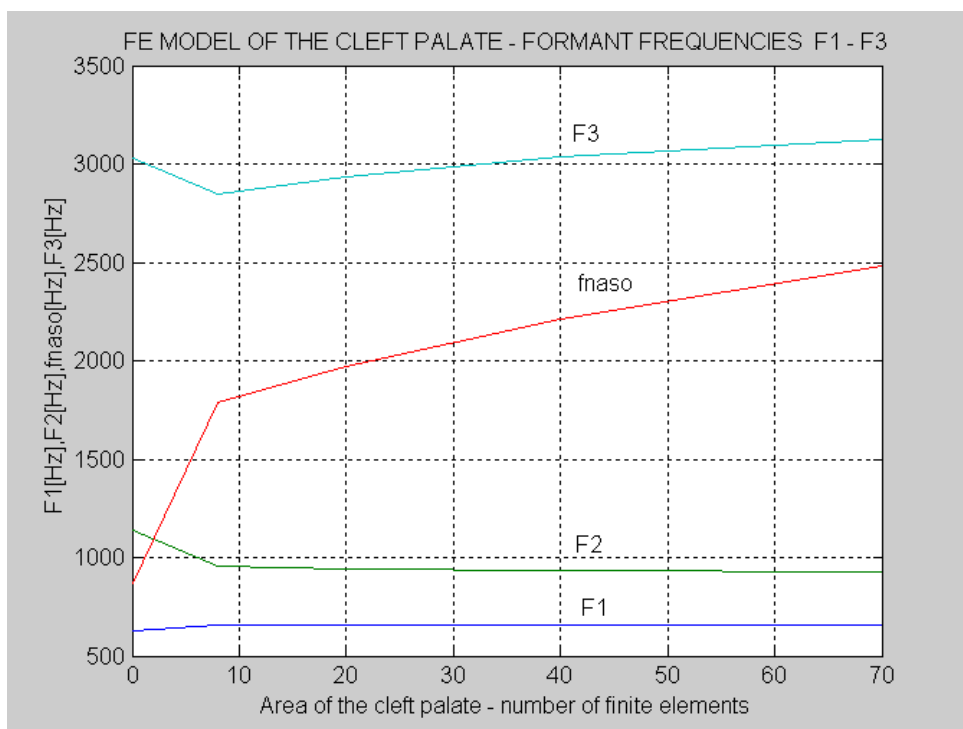
Varianta řešení (odpovídající počet elementů N_r)	Vlastní frekvence			
	F1 [Hz]	F2 [Hz]	$f_{\text{nasopharynx}}$ [Hz]	F3 [Hz]
1. (0)	625,28	1138,54	866,54	3031,91
2. (8)	654,80	953,30	1789,54	2845,72
3. (20)	654,04	943,95	1971,80	2933,30
4. (40)	653,63	935,13	2208,78	3033,37
5. (70)	654,45	928,12	2480,86	3126,98

Tab. 2 Vlastní frekvence nově navrženého výpočetního modelu pro samohlásku / a /
($c_0 = 353,2 \text{ ms}^{-1}$)

Průběhy vlastních frekvencí v závislosti na velikosti plochy rozštěpu patra jsou pro původní výpočetní model vyneseny na obr. 4 a pro nově navržený výpočetní model na obr. 5.

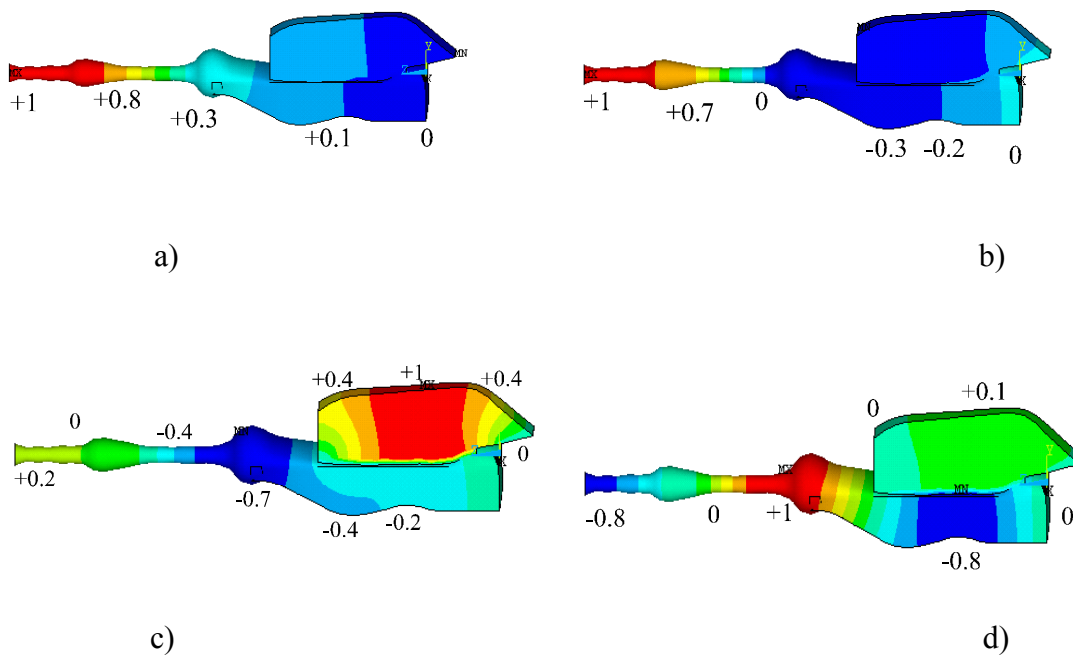


Obr. 4 Vlastní frekvence původního modelu pro samohlásku / a /



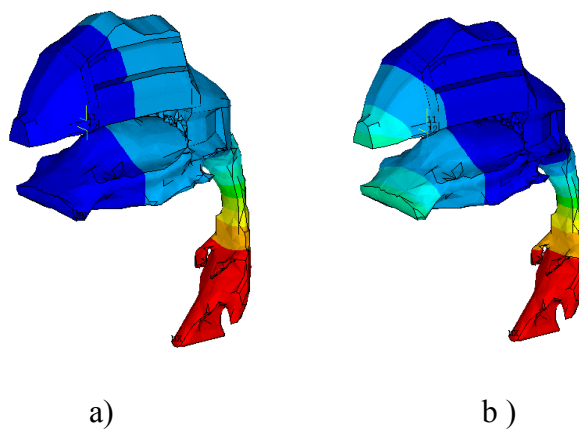
Obr. 5 Vlastní frekvence nově navrženého modelu pro samohlásku / a /

Normované akustické tvary kmitání původního výpočetního modelu pro samohlásku /a/ jsou uvedeny na obr. 6, odpovídající tvary kmitání nově navrženého výpočetního modelu jsou vyneseny na obr. 7 a obr. 8.



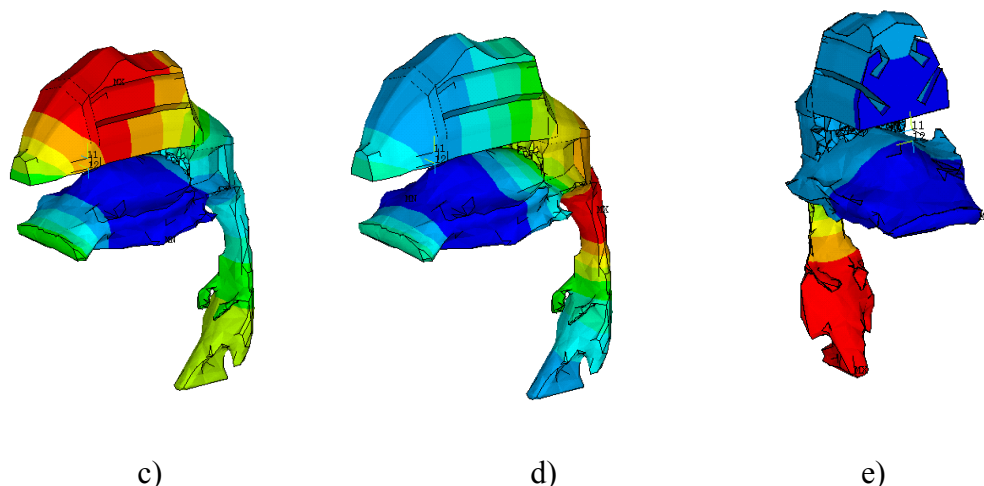
Obr. 6 Normované akustické tvary kmitání FE modelu pro samohlásku / a / s uvažováním rozštěpu patra příslušné variantě řešení pro $N_r = 20$;

a) $F1 = 795,48 \text{ Hz}$; b) $F2 = 1\,133,30 \text{ Hz}$; c) $f_{\text{nasoph.}} = 2\,065,23 \text{ Hz}$;
d) $F3 = 2\,736,23 \text{ Hz}$.



Obr. 7 Normované akustické tvary kmitání FE modelu pro samohlásku / a / s uvažováním rozštěpu patra příslušné 2. variantě řešení ;

a) $F1 = 654,80 \text{ Hz}$; b) $F2 = 953,30 \text{ Hz}$;



Obr. 8 Normované akustické tvary kmitání FE modelu pro samohlásku / a /
s uvažováním rozštěpu patra příslušné 2. variantě řešení ;
c) $f_{\text{nasoph.}} = 1\,789,54\text{ Hz}$; d) $F_3 = 2\,845,72\text{ Hz}$;
e) ukázka *koncha nasalis media* a *koncha nasalis inferior*, F 1, 3.varianta.

ZÁVĚR

V příspěvku je uvedeno porovnání dvou výpočetních modelů vokálního traktu člověka, navržených pro samohlásku / a /, u kterých byl uvažován vliv rozštěpu patra. Cílem modální analýzy obou výpočetních modelů bylo vyšetření vlivu velikosti plochy rozštěpu patra na hodnoty vlastních frekvencí, které přísluší jednotlivým formantům F1, F2 a F3 supraglotického prostoru. Z výsledků modální analýzy původního výpočetního modelu vyplývá, že pouze v případě velmi malé plochy rozštěpu patra je vlastní frekvence supraglotického prostoru, příslušná 2. formantu F2 blízká vlastní frekvenci akustického prostoru nosohltanu ($F_2 = 1\,128\text{ Hz}$, $f_{\text{nasopharynx}} = 1\,316\text{ Hz}$). S rostoucí velikostí plochy rozštěpu je rezonanční frekvence nosní dutiny podstatně větší než formant F2, přičemž se první dva formanty F1 a F2 již nemění a nejsou tedy ovlivňovány akustickými vlastnostmi nosohltanu. U druhého výpočetního modelu dosud nebyla provedena podrobná modální analýza pro velmi malé plochy rozštěpu patra. Z výsledků numerického řešení uvedených v tab. 2 a graficky znázorněných na obr. 5 vyplývá, že modální vlastnosti obou výpočetních modelů jsou velmi podobné. Vlivem propojení ústní a nosní dutiny se první dva formanty F1 a F2 nejprve skokem k sobě přiblíží, ale pak jsou již na velikosti plochy rozštěpu nezávislé. Výsledky numerického řešení obou výpočetních modelů jsou v souladu s poznatky z klinické praxe. Je známo, že při velofaryngeální insuficienci dětí je samohláska / a / nejméně ovlivněna velikostí plochy rozštěpu patra.

LITERATURA

- [1] Story, B. H., Titze, I.R. and Hoffman, E. A.: Vocal tract area functions from magnetic resonance imaging. J. Acoust. Soc. Am., 100 (1), 537 – 554, 1996.
- [2] Dedouch, K., Horáček, J., Veselý, J., Vampola, T., Švec, J.: Dynamic Analysis of the Human Supraglottal Space considering Acoustic – Structural Interaction. In: Sb. Inženýrská mechanika, Svratka, 2 000, str. 65 – 70, ISBN 80 – 86246 – 06 X.
- [3] Dedouch, K., Horáček, J., Švec, J. G.: Frequency modal analysis of

- supraglottal tract. In: Structural Dynamics: Recent Advances. Proc. of the 7th Int. Conference. (Eds. Ferguson N. S. et al.), University Southampton, U.K., 2000, pp. 863-874.
- [4] Dedouch, K., Horáček, J., Vampola, T., Vohradník, M.: Interaction between human supraglottal space and flexible structural boundary. In: Proc. of the VIIIth Conf. Biomechanics of Man 2000 (Eds. Vaverka F., Janura M.), Palacký University Olomouc, Czech Republic, 2000, pp. 177-180.
- [5] Dedouch, K., Horáček, J., Vampola, T., Vohradník, M.: Akustická analýza konečněprvkových modelů supraglottických prostorů s uvažováním rozštěpů patra Interaction and feedbacks 2001, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague, Czech Republic, 2001, pp.: 25 – 32, ISBN 80-85918-69-2
- [6] Dedouch, K., Horáček, J., Vampola, T., Kršek, P., Švec, J.G. : Mathematical modelling of male vocal tract. 2nd International workshop on models and analysis of vocal emissions for biomedical applications, Università degli Studi di Firenze,Firenze, 13 – 15.9.2001
- [7] Vohradník, M.: Poruchy řečové komunikace u velofaryngeální insuficience. Vydalo SCRIPTORIUM, 2001, 134 str., ISBN 80-86197-24-7.
- [8] Grim, M. : Dýchací ústrojí, Charles University, Karolinum, Prague, 2 000.

FINITE ELEMENT MODELING OF MALE VOCAL TRACT CONSIDERING CLEFT PALATE

K. Dedouch^{*}, J. Horáček^{}, T. Vampola^{*}, L. Černý^{***}**

^{*} CTU Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Mechanics

^{**} Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic

^{***} Phoniatriy Laboratory of the 1st Medical Faculty of Charles University

Two finite element models of male vocal tract designed for English vowels / a / are analyzed considering the cleft palate. The first of them is designed on the base of the data published by Story the second FE model corresponds to the real male vocal tract designed by applying of MRI data. Performed acoustic modal analysis is focused on investigation of the influence of the area of cleft palate on the formant frequencies F1, F2 and F3. The results for the vowel / a / indicate, that after a small jump of the acoustic natural frequencies for a very small cleft area the formant frequencies F1 and F2 are influenced by the increasing size of the cleft palate only very slightly.

The research is supported by the Grant Agency of the Czech Republic by the project No 106/ 98/K019 Methods of Mathematical-Physical Modeling of Vibroacoustics Systems Important in Biomechanics of Voice and Hearing.