



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

INFLUENCE OF GEOMETRIC CONFIGURATION OF HUMAN VOCAL TRACT ON PHONATION OF CZECH VOWELS

T. Vampola^{*}, J. Horáček^{**}

Summary: *1D and 3D finite element models of supraglottal tract designed for Czech vowel / a / are analyzed. Performed modal analysis is focused on investigation of the influence of the geometric configuration on the formant frequencies. The interaction of flexible structure with fluid is taken into account in the 3D finite element model. The sensitivity analyses were performed for 3D finite element model. For tuning of the human vocal tract model according measured acoustic pressures in front of the lips is necessary use multi objective optimization method.*

1. Úvod

Lidský hlas obsahuje velký počet harmonických složek, které rozhodují o druhu vyslovené hlásky. Tvoření hlásek závisí v podstatě na resonanci dutiny hrtanu a úst. Jejich měkké stěny působí tlumivě a umožňují zesilovat široký obor tonů kolem jejich vlastní frekvence. Hodnoty této frekvence (formanty) se mění podle polohy jazyka, vzdálenosti zubů a rtů. Oběma dutinami se nejvíce zesilují vrchní složky hlasu, které leží v okolí formantů, a tím se mění povaha vydávaného zvuku. Jednotlivé hlásky jsou charakterizovány frekvencí hlavního formantu, na který je naladěna ústní dutina. Pro srozumitelnost řeči jsou nejdůležitější frekvence mezi 400 až 5000 Hz. Počet harmonických složek obsažených v daném tónu a poměr jejich intenzit k intenzitě základní frekvence určuje zabarvení hlasu.

Při sestavení matematického modelu reálného vokálního traktu člověka, který by umožňoval predikovat změny kvality hlasu při jeho geometrické modifikaci, je tedy nezbytné zahrnout i vliv vyšších harmonických složek.

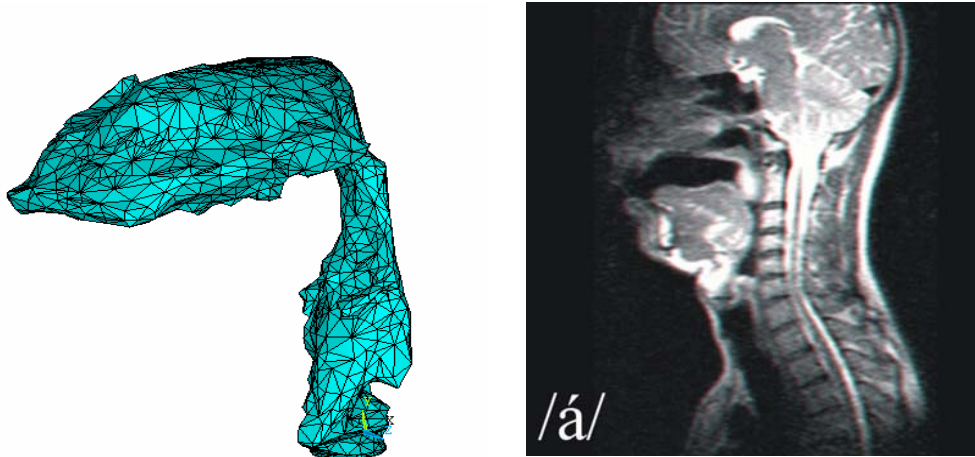
V příspěvku je analyzován vliv geometrické konfigurace vokálního traktu na hodnoty vlastních frekvencí pro českou samohlásku / a /. Ve výpočtovém modelu, byla zahrnuta pohltivost hraničních ploch prostorů, vyzařovací akustická impedance v rovině úst a vliv interakce akustických prostorů s poddajnou strukturou.

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

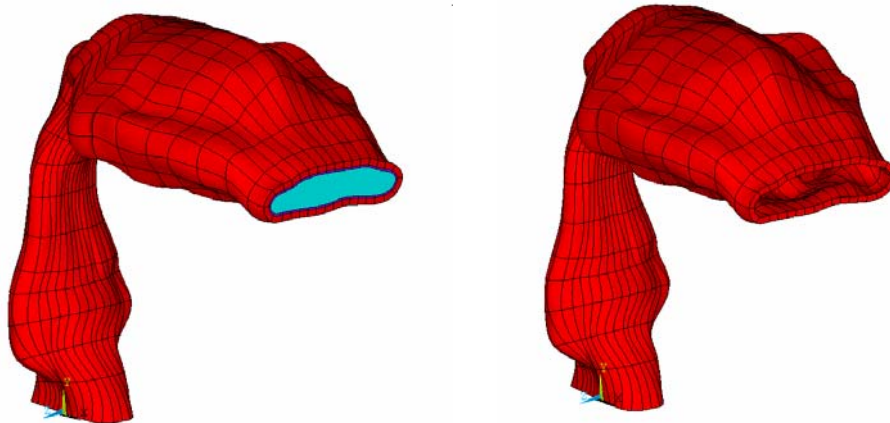
^{**} Ing. Jaromír Horáček, DrSc., Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8, E-mail : jaromirh@it.cas.cz

2. Návrh výpočetních modelů

Pro sestavení matematického modelu reálného vokálního traktu člověka byla použita metoda MKP. Model vokálního traktu odpovídající české samohlásce / a / byl vytvořen přímou transformací dat z metody magnetické rezonance. Nevýhodou tohoto přístupu je ztráta informace o geometrických entitách modelu a jejich obtížná modifikovatelnost. Proto byl sestaven algoritmus umožňující zpětně vytvořit informace o geometrické konfiguraci vokálního traktu a umožnit jeho snadnou tvarovou změnu včetně zahrnutí okolního poddajného prostředí.



Obr.1 Výpočetní model pro samohlásku /a-*přímá transformace dat*/



Obr. 2 Výpočetní model pro samohlásku /a- *geometrická úprava tvaru*/

3. Matematická formulace

Rozložení tlaků v uzavřeném akustickém prostoru je popsáno vlnovou rovnicí:

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

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:

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

Okrajová podmínka mezi poddajnou strukturou a tekutinou

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = -\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{w}_n}{\partial t^2} \quad (4)$$

kde \mathbf{w}_n je posuv poddajné struktury ve směru normály kmitající plochy.

Provedeme-li diskretizaci daného elastoakustického systému pomocí metody konečných prvků, lze pohybové rovnice vyjádřit v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \rho_0 \mathbf{R}^T & \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (5)$$

kde \mathbf{M}_s , \mathbf{B}_s , \mathbf{K}_s jsou výsledné matice hmotnosti, tlumení a tuhosti popisující deformace poddajné struktury. Matice \mathbf{M}_f , \mathbf{B}_f , \mathbf{K}_f jsou výsledné matice hmotnosti, tlumení a tuhosti popisující deformace tekutiny. \mathbf{P} je vektor akustických tlaků definovaných v uzlech konečno-prvkové sítě a \mathbf{u} je vektor deformací poddajné struktury. \mathbf{R} je matice propojující tvarové funkce použité pro popis deformace poddajné struktury a tekutiny. ρ_0 je hustota vzduchu.

4. Jedno dimensionální model vokálního traktu

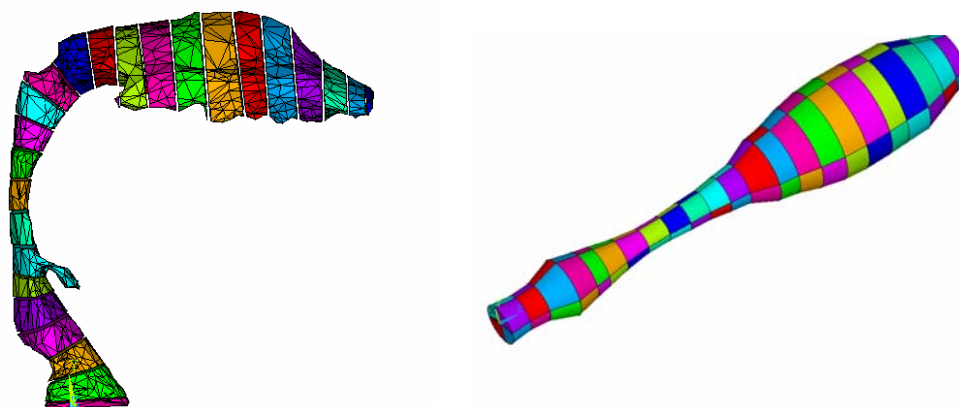
Pro modelování vokálního traktu lze použít jedno dimensionální model sestavený z válcových či kónických elementů definovaného průřezu a délky (obdobu metody přenosových matic). Avšak jeho platnost je omezena předpokladem, že akustický tlak je konstantní v příčném řezu systému. Tento model neumožňuje zahrnout vliv geometrického tvaru vokálního traktu. Je zřejmé, že 1D model nemůže věrně predikovat informace vyšších harmonických složek přenášeného signálu.

V odborné literatuře je platnost aproximace vokálního traktu 1D modelem je omezena vztahem:

$$f_{mezní} = \frac{0.5861 c_0}{2r} \quad (6)$$

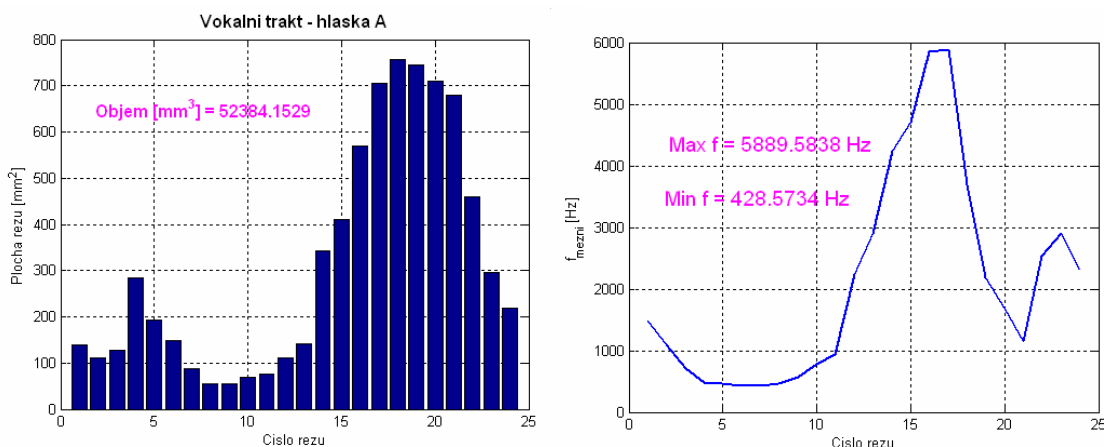
Kde $f_{\text{mezní}}$ je maximální hodnota frekvence, kterou lze 1D modelem postihnout, c_0 je rychlost zvuku ve vyšetřovaném akustickém prostoru a r je poloměr příčného řezu modelu.

Pro ověření platnosti vztahu (6) byl z 3D MKP modelu odvozen 1D model sestavený z 23 kónických elementů, kde plocha jednotlivých řezů odpovídá velikosti plochy reálného 3D modelu.



Obr. 3 Výpočetní model pro samohlásku /a 1D model/

Modální analýza 1D modelu byla provedena pro rychlost zvuku $c_0 = 353 \text{ ms}^{-1}$, hustotu vzduchu $\rho = 1,2 \text{ kgm}^{-3}$. Byla modelována akustická vyzařovací impedance v rovině úst a uzavřený akustický prostor v úrovni hlasivek.



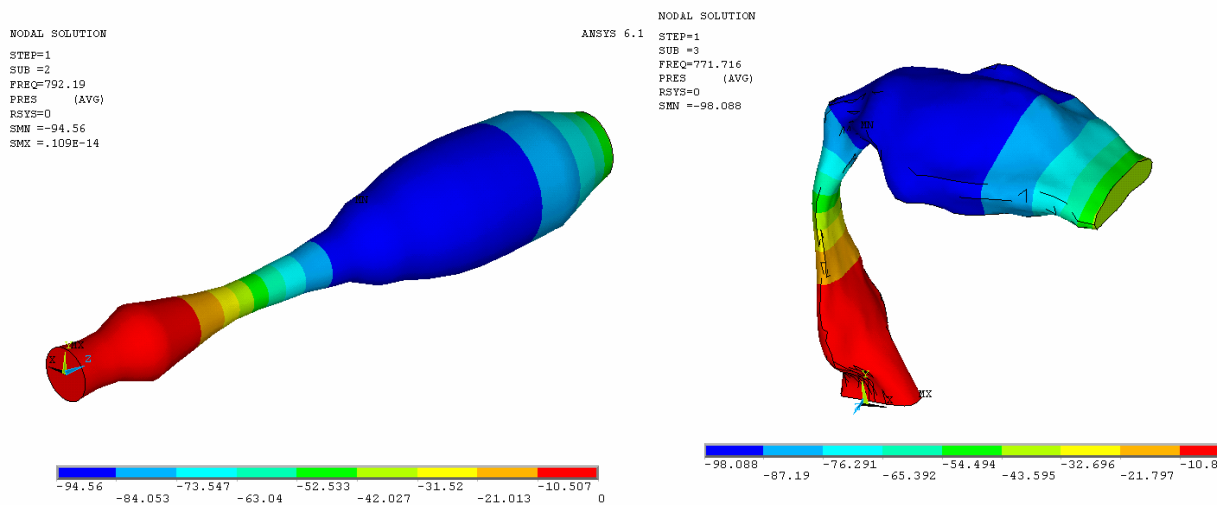
Obr. . 4 Plocha řezů pro samohlásku /a 1Dmodel/, mezní frekvence 1D modelu

Z obrázku (4) je patrné že mezní frekvence spadají do frekvenčního rozsahu 400 až 5000 Hz. Je tedy zřejmé, že pro modelování vyšších harmonických složek přenášeného akustického signálu pro predikci hlasové kvality je nezbytné modelovat vokální trak 3D modelem. Z obrázku (5) však také vyplývá, že pro nižší hodnoty frekvencí je vypovídající

hodnota 1D modelu v dobré shodě s 3D modelem. Vypočtené hodnoty vlastních frekvencí jsou patrné z následující tabulky .

Tab. 1 Vlastní frekvence modelu hlásky /a/

Vlastní frekvence [Hz] 1D/3D modelu –hláska A				
-9±j792	-69±j2674	-52±j3698	-	-51±j4698
-8±j771	-62±j2600	-52±j3554	-11±j4036	-38±j4453



Obr. 5 První vlastní frekvence pro samohlásku /a/ 1D model/3D model

5. Akustická vyzařovací impedance

Pro modelování akustické vyzařovací impedance byla použita analogie s kmitající kruhovou deskou. Mechanickou impedanci kruhové desky harmonicky kmitající v nekonečné stěně lze odvodit ve tvaru:

$$Z_{mv} = \pi R^2 c_0 \rho \left[1 - 2 \frac{J_1(2kR)}{2kR} + j 2 \frac{\mathcal{G}_1(2kR)}{2kR} \right] \quad (7)$$

Kde R je poloměr kmitající desky, c_0 rychlost zvuku, ρ hustota vzduchu, k vlnové číslo, J_1 Besselova funkce prvního řádu a \mathcal{G}_1 Struvovova funkce prvního řádu.

Rozvedeme-li funkce v řadu lze měrnou akustickou vyzařovací impedanci nalézt ve tvaru:

$$Z_a = \frac{c_0 \rho}{S} [A(\omega) + jB(\omega)] \quad (8)$$

Kde S je vyzařovací plocha otevřených úst a výrazy A, B jsou funkcí frekvence kmitající desky. Ze vztahu (8) lze odvodit činitel pohltivosti akustických vln, který je v dobré shodě s měřenými hodnotami akustické impedance:

$$\beta = \frac{1}{0.5 + 0.25 \left(\frac{x}{\rho c_0} + \frac{\rho c_0}{x} \right)} \quad (9)$$

Kde x je reálná složka měrné akustické impedance.

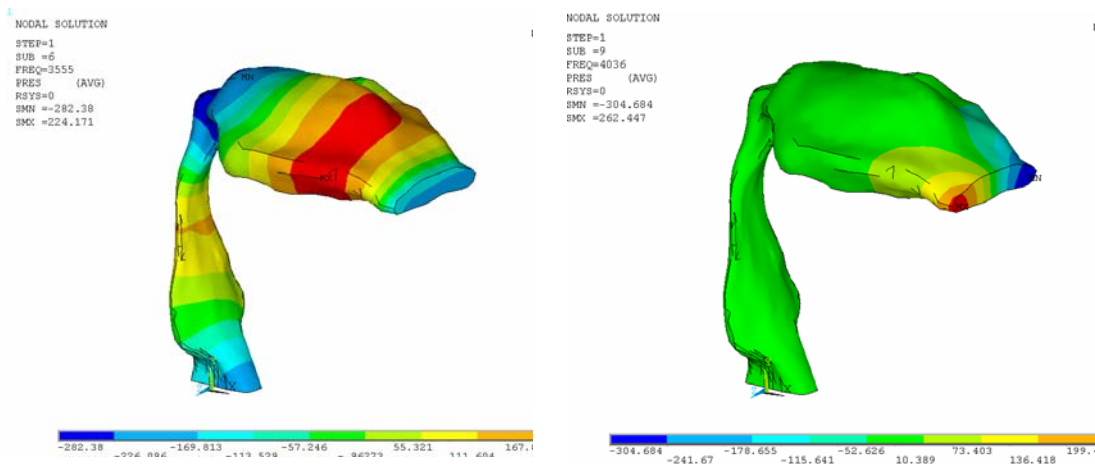
6. Tří dimensionální model vokálního traktu

Na 3D modelu vokálního traktu byl simulován vliv interakce poddajné struktury s akustickým prostorem. Materiálové charakteristiky pro poddajnou strukturu byly převzaty z [1], kde z provedených měření vyplývá, že pro uvažování vlivu poddajné struktury na vokální trakt je třeba uvažovat dodatečnou hmotnost $m=1.5 \text{ g/cm}^2$, tuhost $k=33000 \text{ dyn/cm}^3$ a odpor $b=1060 \text{ dyn s /cm}^3$. Všechny hodnoty jsou vztaženy na jednotku plochy definující hranice akustického prostoru. Tyto údaje byly přepočteny na fyzikální parametry použité pro modelování strukturní části modelu (viz. Obr.2) Dosažené výsledky modální analýzy jsou patrné z následující tabulky. Uvažováním poddajné struktury v modelu vokálního traktu vede ke zvýšení první vlastní frekvence systému a výraznějšímu zatlumení všech vypočtených frekvencí. Vypočtené výsledky jsou v dobré shodě s údaji publikovanými v [1].

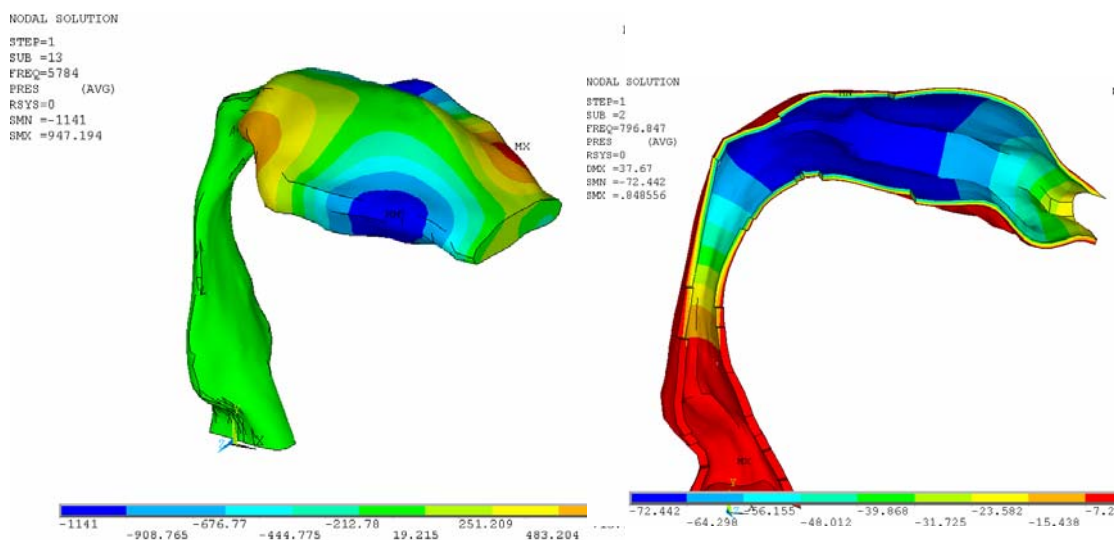
Tab. 2 Vlastní frekvence modelu hlásky /a/

Vlastní frekvence [Hz] 3D modelu –hláska A -akustický prostor/ interakce				
-8±j771	-62±j2600	-52±j3554	-11±j4036	-38±j4453
-29±j796	-85±j2581	-81±j3519	-29±j3961	-69±j4426

Z obr (6) je patrné, že již čtvrtý vlastní tvar kmitu neodpovídá kmitání rovinné akustické vlny. Touto hodnotou vlastní frekvence je omezena platnost použití 1D modelu. Použití 1D modelu nad touto mezní frekvencí vede k odfiltrování příčných vlastních tvaru.



Obr. 6 Třetí, čtvrtá vlastní frekvence pro samohlásku /a/ 3D model



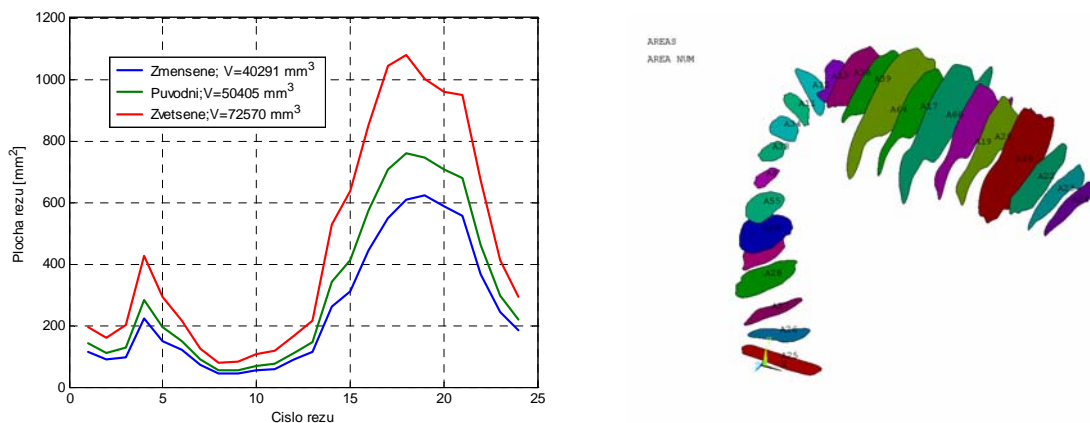
Obr. 7 Pátá vlastní frekvence pro samohlásku /a/, První vlastní frekvence poddajné struktury

7. Citlivost 3D modelu vokálního traktu na geometrickou konfiguraci

Pro sestavení reálného vokálního traktu člověka, který by byl schopen věrně predikovat změnu hlasové kvality při geometrické modifikaci akustických prostorů se jeví nezbytné naladit geometrii modelu podle změřených tlakových polí. Při sestavení MKP modelu přímou transformací dat z metody magnetické rezonance panuje určitá nejistota o geometrické přesnosti získaných dat. Tuto nejistotu lze celkem snadno prokázat porovnáním spektrální výkonové hustoty naměřených a vypočtených tlakových polí v úrovni úst. Či subjektivním poslechem vyslovované a generované samohlásky.

Nezbytným předpokladem pro ladění sestaveného modelu vokálního traktu na požadované hodnoty vlastních frekvencí je posouzení jeho citlivosti na změnu geometrické konfigurace akustických prostorů. Pro výpočet citlivosti jsme použili děleného 3D MKP

modelu samohlásky /a/ dle obr. 3. Při počítačové simulaci byla variována plocha jednotlivých řezů vokálního traktu a zjišťovány hodnoty vlastních frekvencí. Při variaci bylo uvažováno “nafouknutí“ definičních řezů o -1mm a 2mm . Při výpočtu bylo uvažováno postupné “nafouknutí“ jednotlivých řezů a následně “nafouknutí“ všech řezů najednou.

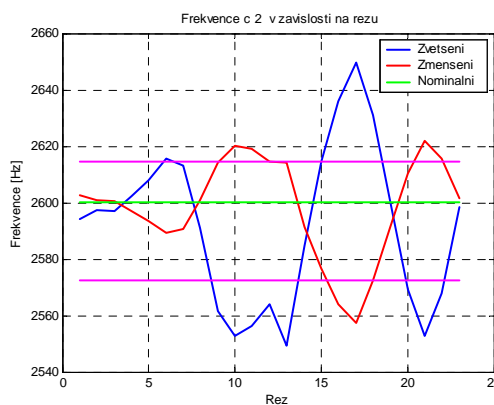
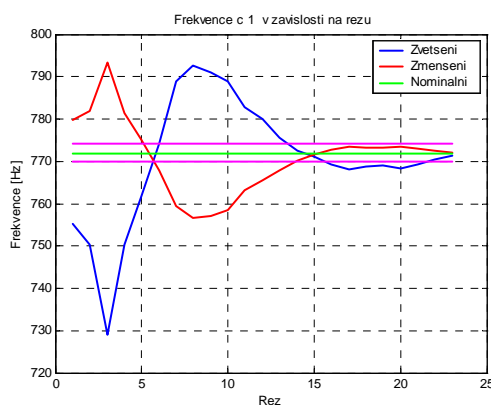


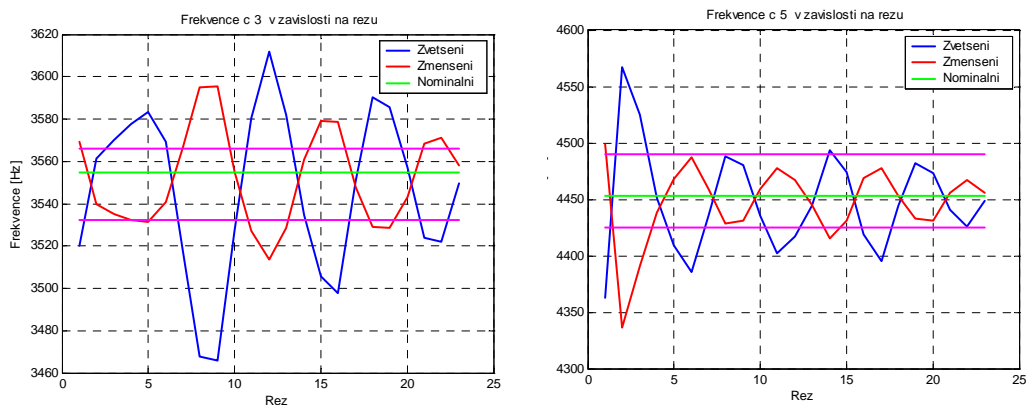
Obr. 8 Definiční řezy pro samohlásku /a/

Dosažené výsledky jsou patrné s následujícími obrázky a tabulky.

Tab. 3 Citlivost vlastních frekvencí na variaci definičních řezů

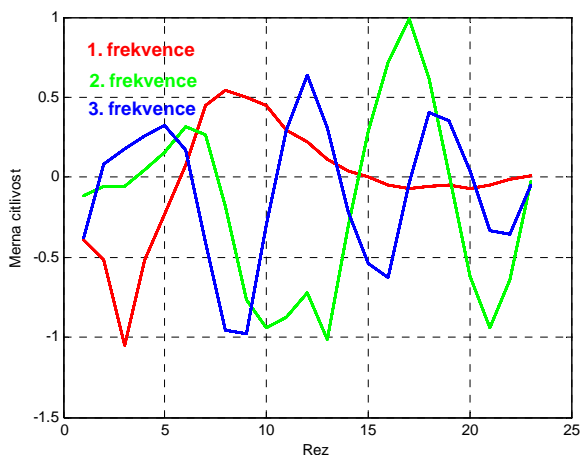
Citlivost vlastních frekvencí na variaci definičních řezů pro samohlásku /a/			
frekvence	f_{\min} [Hz]	f_{\max} [Hz]	Δ [Hz]
1.	730	790	60
2.	2550	2650	100
3.	3470	3610	140
4.	3680	4290	610
5.	4340	4560	220
6.	4650	5300	650





Obr. 9 Citlivost vlastních frekvencí na variace definičních řezů pro samohlásku /a/

Z obr.9 jsou patrná vhodná místa modifikace definičních řezů vokálního traktu při přeladění jednotlivých vlastních frekvencí. Při přeladění první vlastní frekvence v oblasti modifikace do pátého definičního řezu nedojde k ovlivnění druhé vlastní frekvence, ale patrně dojde ke změně páté vlastní frekvence. Z prezentovaných výsledků je patrné, že pro ladění reálného vokálního traktu dle měřených akustických polí v rovině úst bude nezbytné použít více kriteriální optimalizační metodu.



Obr. 10 Měrná citlivost vlastních frekvencí na variace definičních řezů pro samohlásku /a/

8. Závěr

V příspěvku je analyzován vliv geometrické konfigurace vokálního traktu na hodnoty vlastních frekvencí pro českou samohlásku / a /. Ve výpočtovém modelu, byla zahrnuta pohltivost hraničních ploch akustických prostorů, vyzařovací akustická impedance v rovině úst a vliv interakce akustických prostorů s poddajnou strukturou.

Jsou prezentovány výsledky modální analýzy konečno-prvkových modelů 1D a 3D vokálního traktu odpovídající české samohláске / a /. 3D MKP model byl dále rozšířen o vliv poddajné struktury. Pro 3D MKP model vokálního traktu byla zjištěna frekvenční citlivost modelu na geometrické modifikace definičních ploch. Z dosažených výsledků je

patrný frekvenční rozsah pro který může být použit 1D model vokálního traktu. Pro sestavení reálného vokálního traktu člověka, který by byl schopen věrně predikovat změnu hlasové kvality při geometrické modifikaci akustických prostorů se jeví nezbytné naladit geometrii modelu podle změřených polí akustických tlaků. Z obr. 10 vyplývá pro ladění modelu nutnost použití více kriteriální optimalizační metody.

9. Poděkování

The research is supported by the Grant Agency of the Czech Republic by the project No 106/04/1025 Modeling of Vvibroacoustic Systems Focused on Human Vocal Tract

10. 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 vocal 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] Vohradník, M.: *Poruchy řečové komunikace u velofaryngeální insuficience.* Vydalo SCRIPTORIUM, 2001, 134 str., ISBN 80-86197-24-7.
- [6] Titze, I.R.: *Principles of Voice Production.* Prentice – Hall, London 1994.
- [7] Palková, Z.: *Phonetics and Phonology of the Czech Language.* Charles University, Karolinum, Prague, 1994.