

COMPUTATIONAL MODELLING OF EFFECT OF TONSILLECTOMY ON PRODUCTION OF CZECH VOWELS

P. Švancara*, J. Horáček**

Summary: *In this study the effect of tonsillectomy on production of Czech vowels is numerically examined. The finite element (FE) models of the acoustic spaces corresponding to the human vocal tracts and acoustic space around the human head are used in numerical simulations of phonation. Models for Czech vowels /a/, /e/, /i/, /o/ and /u/ are analyzed. Similar experimental studies on living subjects are not easily realisable. The acoustic resonant characteristics of the FE models are studied using modal and transient analyses (excitation by a short pulse). The production of vowels is simulated in time domain using transient analysis of the FE models excited by Liljencrants-Fant's (LF) glottal signal model. Calculated results show that tonsillectomy causes frequency shifts of some formant frequencies mostly down to lower frequencies. Biggest shifts were obtained for 2nd and 3rd formants for vowel /o/ ~300Hz down to lower frequencies and for 2nd (~450Hz) and 3rd (~150Hz) formants for vowel /u/ down too. The frequency shifts of the formants are significantly dependent on position and size of the tonsils.*

1. Úvod

Cílem tohoto příspěvku je analyzovat pomocí výpočtového modelování vliv odebrání krčních mandlí (tonzilektomie) na výslovnost českých samohlásek. Zda se hlas po operaci změní či nikoliv je důležitou otázkou pro hlasové profesionály (zpěváky, moderátory), stojícími před rozhodnutím, zda si nechat vyjmout krční mandle, jsou-li k tomu nějaké medicínské důvody.

Vliv odebrání krčních mandlí (tonzilektomie) na výslovnost samohlásek byl doposud studován pouze experimentálně. Hori et al. (1996) měřil u 40 pacientů polohu formantů pěti japonských samohlásek před odebráním mandlí a následně po operaci. Z výsledků vyplynulo, že odebrání mandlí výrazně ovlivnilo pouze polohu třetího formantu (F3) a to nejvíce u samohlásky /o/. Saida et al. (1996) u skupiny 20 japonských pacientů zjistil, že ačkoli se projevovala tendence ke snižování třetího formantu po tonzilektomii, odebrání mandlí nemělo výrazný vliv na fonaci samohlásek. Ilk et al. (2002) experimentálně studoval vliv tonzilektomie na výslovnost tureckých samohlásek. Byly zjištěny změny v poloze formantu F3 a jeho šířce pro samohlásku /o/ a mírné snížení šířky druhého a třetího formantu pro samohlásku /a/.

* Ing. Pavel Švancara: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2896/2; 616 69 Brno; tel.: +420.608 624 648, e-mail: svancara@fme.vutbr.cz

** Ing. Jaromír Horáček, DrSc.: Ústav termomechaniky, Akademie věd České republiky; Dolejškova 5; 182 00 Praha 5; tel.: +420.286 890 383, e-mail: jaromirh@it.cas.cz

Hlavní nevýhodou těchto experimentálních analýz je, že pacienti jsou obtížně schopni reprodukovat danou samohlásku stejným způsobem při měření před a po operaci. Výsledky je tedy třeba zpracovávat statisticky z omezeného souboru dat.

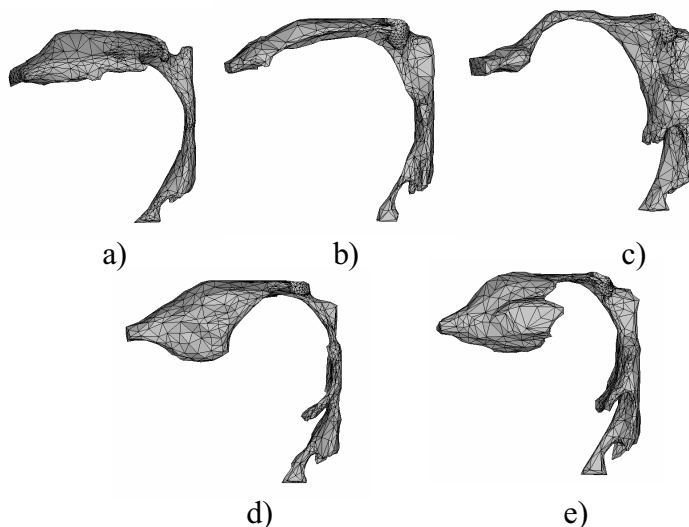
V předchozích pracích autorů (Dedouch et al., 2002; Dedouch et al., 2003; Švancara et al. 2004) byly studovány akustické charakteristiky vokálního traktu zdravého člověka a vliv velofaryngeální insuficience a rozštěpu patra na tyto charakteristiky. K tomu byly pomocí magnetické rezonance vytvořeny konečněprvkové (MKP) modely vokálních traktů pro české samohlásky /a/, /e/, /i/, /o/ a /u/ (Dedouch et al., 2002) při ustálené fonaci dané samohlásky (viz obr. 1).

2. MKP modely vokálních traktů

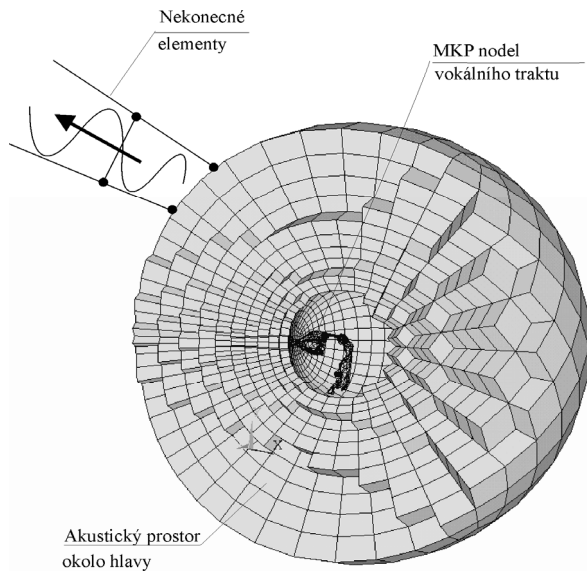
Pro simulaci šíření akustických vln od úst do volného prostoru byl k MKP modelům vokálních traktů přidána konečněprvková síť ve tvaru duté koule (viz obr. 2), reprezentující akustický prostor okolo hlavy. Na jejím povrchu byly aplikovány tzv. nekonečné prvky. Tyto prvky mají geometrii protaženou do „nekonečna“ a speciální tvarovou funkci, zajišťující simulaci vyzařování akustických vln do volného prostoru.

Následně byly MKP modely vokálních traktů ručně upraveny přidáním akustických prostorů, které vzniknou odebráním mandlí, viz obr. 3. Byl použit zjednodušený geometrický tvar mandlí. Protože po operaci obvykle dochází k zajizvení a částečnému stažení tkáně v okolí odebraných mandlí, byl vytvořen další model s přibližně polovičním objemem mandlí. Pro každou samohlásku byly tedy vytvořeny tři MKP modely: (i) vokální trakt s mandlemi, (ii) vokální trakt po odebrání mandlí (objem akustického prostoru jedné mandle $\sim 1.5 \text{ cm}^3$), (iii) vokální trakt po odebrání mandlí s uvažováním stažení tkáně po operaci (objem akustického prostoru jedné mandle $\sim 0.7 \text{ cm}^3$).

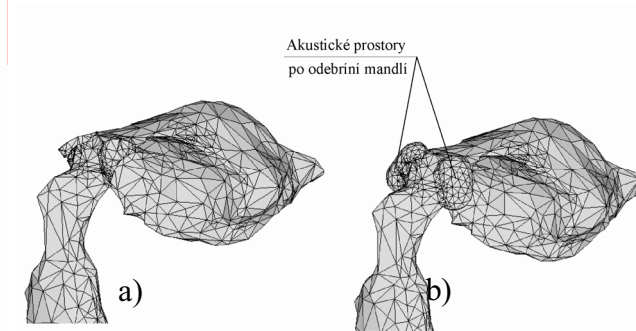
Akustická modální a přechodová analýza byla provedena v programovém systému SYSNOISE 5.5. Pro vzduch byla uvažována rychlost zvuku $c_0 = 353 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a hustota $\rho_0 = 1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Akustické tlumení bylo modelováno pomocí normálové impedance Z na stěnách vokálního traktu. Normálová impedance byla pro uvažovaný materiál, tj. pro měkkou tkáň s modulem pružnosti v tahu $E = 5 \text{ MPa}$ a hustotou $\rho = 1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, uvažována frekvenčně konstantní $Z = 83\,666 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Abé et al., 1996).



Obrázek 1. MKP modely vokálních traktů pro české samohlásky: a) /a/ b) /e/ c) /i/ d) /o/ e) /u/.



Obrázek 2. Řez MKP modelem vokálního traktu pro samohlásku /u/ s akustickým prostorem okolo hlavy.



Obrázek 3. Detail MKP modelu pro samohlásku a) vokální trakt s mandlemi b) vokální trakt po odebrání mandlí.

3. Matematický model

Vlnová rovnice popisující rozložení akustického tlaku p ve vokálním traktu má tvar

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

kde c_0 je rychlost zvuku a t je čas, s okrajovými podmínkami:

- pro akusticky dokonale odrazivou plochu $\partial p / \partial \mathbf{n} = 0$
- pro pohltivou hraniční plochu s předepsanou normálovou impedancí $Z = p / v_n$,

kde \mathbf{n} je normála k hraniční ploše a v_n je rychlost ve směru normály k hraniční ploše.

Při aplikaci metody konečných prvků (MKP) je vlnová rovnice diskretizována a má pro řešení v časové oblasti tvar

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{p}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{p}(t) = \mathbf{f}(t), \quad (2)$$

kde \mathbf{M} , \mathbf{C} , a \mathbf{K} jsou akustické matice hmotnosti, tlumení a tuhosti, \mathbf{p} je vektor akustických tlaků v uzlech MKP sítě a \mathbf{f} je vektor akustických sil. Rovnice (2) je řešena v programovém systému SYSNOISE pomocí implicitní Newmarkovy integrační metody přímou integrací ve zvolených časových krocích.

4. Analýza vlastních frekvencí

Pro určení vlastních frekvencí (formantů) MKP modelů vokálních traktů byla nejdříve provedena modální analýza samostatných vokálních traktů (bez akustického prostoru okolo hlavy) s okrajovou podmínkou nulového tlaku v ústech a bez uvažování pohltivosti stěn vokálního traktu. Vypočtené vlastní frekvence do 5kHz pro jednotlivé modely jsou uvedeny v Tab. 1.

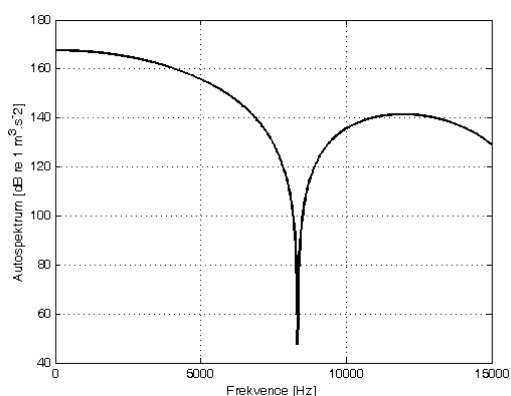
Tabulka 1. Vypočtené vlastní frekvence

Samohláska /a/						Samohláska /o/					
#	S mandlemi [Hz]	Bez mandlí [Hz]	Rozdíl [Hz]	Bez mandlí - menší objem [Hz]	Rozdíl [Hz]	#	S mandlemi [Hz]	Bez mandlí [Hz]	Rozdíl [Hz]	Bez mandlí - menší objem [Hz]	Rozdíl [Hz]
F1	678	683	5	686	8	F1	464	475	11	476	12
F2	1177	1137	-40	1150	-27	F2	776	773	-3	776	0
F3	2869	2875	6	2924	55	F3	2675	2392	-283	2483	-192
F4	4113	3992	-121	4038	-75	F4	3521	3179	-342	3216	-305
F5	4286	4308	22	4312	26	F5	4415	4503	88	4499	84
F6	4442	4494	52	4492	50	F6	4709	4776	67	4791	82
Samohláska /e/						Samohláska /u/					
#	S mandlemi [Hz]	Bez mandlí [Hz]	Rozdíl [Hz]	Bez mandlí - menší objem [Hz]	Rozdíl [Hz]	#	S mandlemi [Hz]	Bez mandlí [Hz]	Rozdíl [Hz]	Bez mandlí - menší objem [Hz]	Rozdíl [Hz]
F1	569	553	-16	563	-6	F1	389	396	7	398	9
F2	1530	1480	-50	1500	-30	F2	827	846	19	845	18
F3	2504	2444	-60	2475	-29	F3	2358	1907	-451	1978	-380
F4	3027	2812	-215	2829	-198	F4	3484	3328	-156	3346	-138
F5	4020	4090	70	4113	93	F5	4519	4493	-26	4497	-22
Samohláska /i/											
#	S mandlemi [Hz]	Bez mandlí [Hz]	Rozdíl [Hz]	Bez mandlí - menší objem [Hz]	Rozdíl [Hz]						
F1	258	248	-10	251	-7						
F2	2374	2267	-107	2307	-67						
F3	3188	3213	25	3198	10						
F4	3809	3763	-46	3794	-15						
F5	4778	4722	-56	4741	-37						

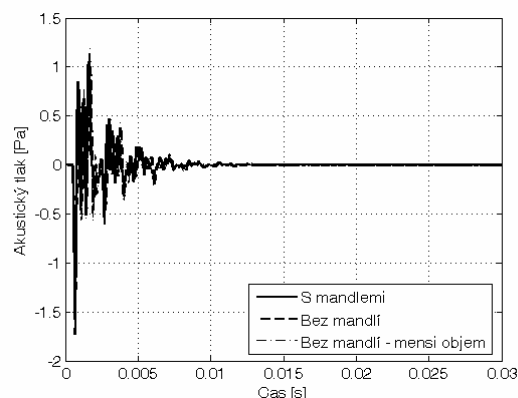
Jako další krok byly vlastní frekvence kompletních MKP modelů (s akustickým prostorem okolo hlavy a s uvažováním pohltivosti stěn) počítány pomocí přechodové analýzy v časové oblasti. MKP model byl buzen v místě hlasivek krátkým trojúhelníkovým pulsem objemového zrychlení $dU_g(t)$ definovaného vztahem

$$\frac{dU_g(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{dU_{g\max}}{t_d/2} t & , 0 < t < t_d/2 \\ dU_{g\max} - \left[\frac{dU_{g\max}}{t_d/2} \left(t - \frac{t_d}{2} \right) \right] & , t_d/2 \leq t < t_d \\ 0 & , t_d \leq t \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

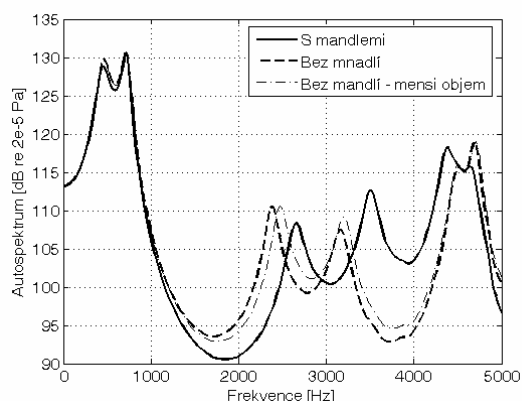
kde $dU_{g\max}$ je maximální objemové zrychlení a t_d je doba trvání pulsu. Byly použity tyto hodnoty: $dU_{g\max} = 400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ a $t_d = 0.25 \text{ ms}$. Autospektrum tohoto pulsu je zobrazeno na obr. 4 a je dostatečně ploché v analyzovaném frekvenčním rozsahu 0 až 5 kHz. Vypočtený časový průběh akustického tlaku a jeho autospektrum v jednom z uzlů MKP sítě blízko rtů pro samohlásku /o/ jsou zobrazeny na obr. 5 a 6 a to pro všechny tři modely (s mandlemi, po odebrání mandlí a po odebrání mandlí s uvažováním stažení tkáně po operaci – menší objem). Na obr. 7 je zobrazeno vypočtené autospektrum pro samohlásku /u/.



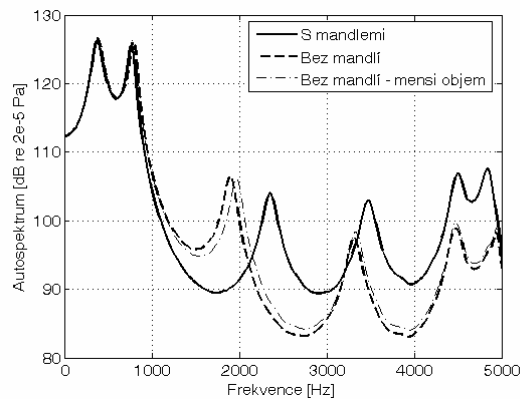
Obrázek 4. Autospektrum budicího pulsu.



Obrázek 5. Časový průběh akustického tlaku blízko rtů, samohláska /o/.



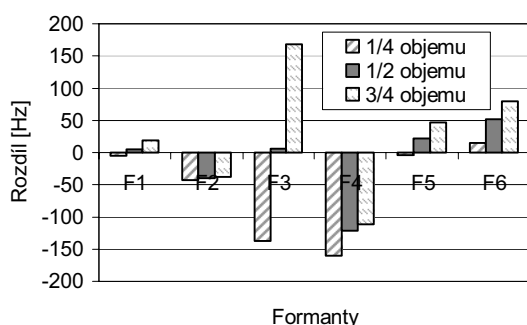
Obrázek 6. Autospektra akustického tlaku blízko rtů, samohláska /o/.



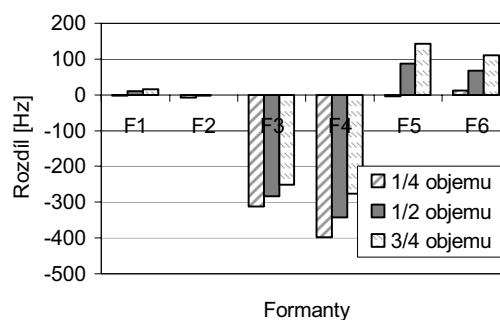
Obrázek 7. Autospektra akustického tlaku blízko rtů, samohláska /u/.

Vlastní frekvence vokálních traktů odečtené z vypočtených autospekter odpovídají dobře vlastním frekvencím vypočteným pomocí modální analýzy (Tab. 1) a odpovídají také dobře formantům publikovaným pro jednotlivé samohlásky ve foniatrické literatuře (Palková, 1994; Novák, 1996). Z výsledků vyplývá, že odebrání mandlí způsobilo posun některých formantů především směrem k nižším frekvencím. Největší posun byl zjištěn u druhého a třetího formantu u samohlásky /o/ a to přibližně o 300 Hz směrem k nižším frekvencím. Dále pak u druhého (~450 Hz) a třetího (~150 Hz) formantu u samohlásky /u/ také směrem k nižším frekvencím. U modelů kde bylo uvažováno stažení tkáně po operaci, byl posun formantů menší. U samohlásky /a/ se v analyzovaném frekvenčním pásmu do 5000 Hz objevil jeden příčný mod v horizontálním směru.

Jako další krok byla analyzována citlivost posunu formantů na změnu polohy a velikosti mandlí. Nejdříve byla měněna část objemu mandlí, která zasahuje do akustického prostoru vokálního traktu. Byly uvažovány tři varianty: (i) $\frac{1}{4}$ objemu mandlí zasahuje do vokálního traktu, (ii) $\frac{1}{2}$ objemu mandlí zasahuje do vokálního traktu – tento případ byl uvažován v předchozích výpočtech, (iii) $\frac{3}{4}$ objemu mandlí zasahuje. Vypočtené rozdíly polohy formantů po a před tonzilektomií pro samohlásku /a/ jsou zobrazeny na obr. 8 a na obr. 9 pak pro samohlásku /o/.



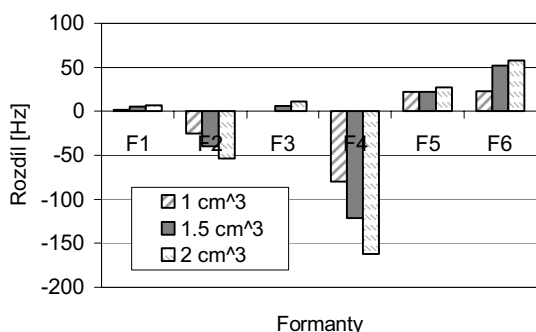
Obrázek 8. Rozdíl polohy formantů po a před odebráním mandlí pro různé polohy mandlí, samohlásky /a/.



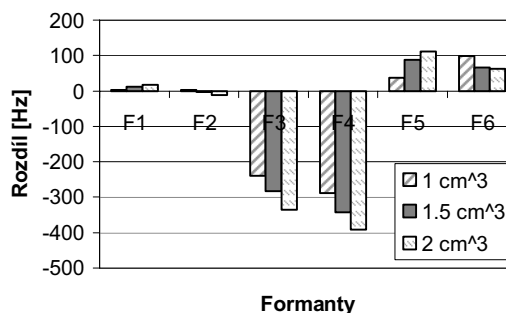
Obrázek 9. Rozdíl polohy formantů po a před odebráním mandlí pro různé polohy mandlí, samohlásky /o/.

Dále, pro konstantní polohu mandlí ($\frac{1}{2}$ objemu mandlí zasahuje do vokálního traktu) byla měněna velikost objemu mandlí. Opět byly analyzovány tři varianty: (i) objem jedné mandle 1 cm^3 , (ii) objem jedné mandle 1.5 cm^3 (bráno v předchozích výpočtech) a (iii) objem jedné mandle 2 cm^3 . Vypočtené rozdíly polohy formantů po a před odebráním mandlí jsou zobrazeny pro samohlásku /a/ na obr. 10 a pro samohlásku /u/ na obr. 11.

Z výsledků je vidět, že poloha některých formantů je velice závislá na velikosti mandlí a jejich poloze ve vokálním traktu. Například u samohlásky /a/ se mění rozdíl polohy třetího formantu po a před tonzilektomií od -137 Hz do $+168 \text{ Hz}$ se změnou části objemu mandlí, která zasahuje do akustického prostoru vokálního traktu.



Obrázek 10. Rozdíl polohy formantů po a před odebráním mandlí pro různé velikosti mandlí, samohláska /a/.



Obrázek 11. Rozdíl polohy formantů po a před odebráním mandlí pro různé velikosti mandlí, samohláska /o/.

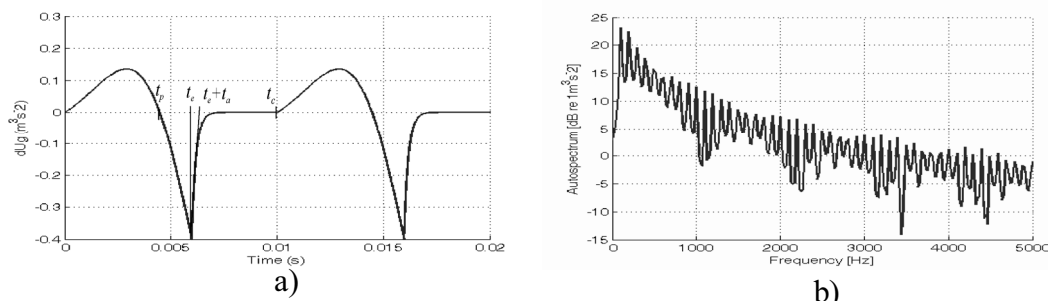
5. Numerická simulace vyslovování samohlásek

Pro simulaci vyslovování samohlásek byly MKP modely buzeny v místě hlasivek analyticky popsáním průběhem objemového zrychlení. Jedná se o čtyřparametrický, tzv. Liljencrants-Fantův (LF) model (Fant et al., 1985). Každá perioda objemového zrychlení je tvořena dvěma částmi

$$\frac{dU_g(t)}{dt} = \begin{cases} E_0 e^{\alpha t} \sin \omega_g t & , 0 \leq t < t_e \\ -\frac{E_e}{\varepsilon t_a} \left(e^{-\varepsilon(t-t_e)} - e^{-\varepsilon(t_c-t_e)} \right) & , t_e \leq t < t_c \end{cases} \quad (4)$$

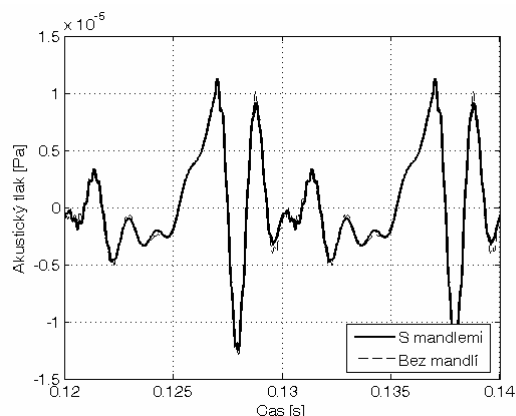
kde t_c je rovno periodě. Časové konstanty t_p , t_e , t_a společně s maximálním negativním objemovým zrychlením E_e úplně určují průběh objemového zrychlení během jedné periody. Jejich význam ilustruje obr. 12a), kde je zobrazen detail dvou period. V této práci byly použity normalizované parametry

$$R_a = \frac{t_a}{t_c - t_e}, \quad R_k = \frac{t_e - t_p}{t_p}, \quad R_g = \frac{t_c}{2t_p}. \quad (5)$$

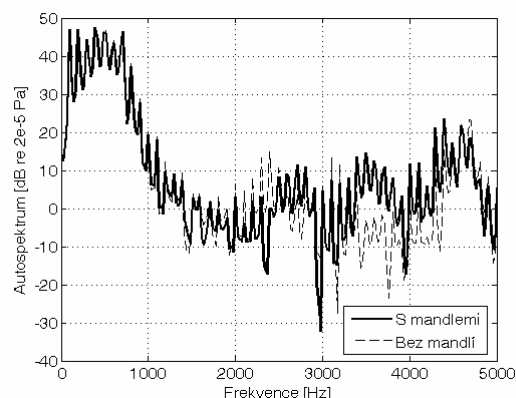


Obrázek 12. a) Detail dvou period průběhu objemového zrychlení.
b) Autospektrum průběhu objemového zrychlení.

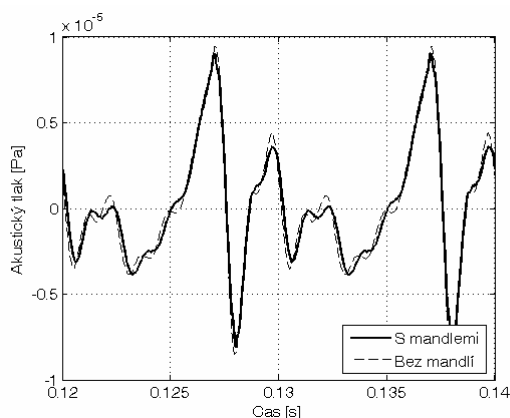
Použité hodnoty parametrů odpovídají normální fonaci: $R_a = 0.05$ ms, $R_k = 0.34$, $R_g = 1.12$, $E_c = 0.4$ m³s⁻². Autospektrum průběhu objemového zrychlení je zobrazeno na obr. 12b). MKP modely byly buzeny vždy patnácti pulsy objemového zrychlení s periodou odpovídající základní frekvenci $F_0 = 100$ Hz. Numerická simulace byla provedena pomocí přechodové analýzy v časové oblasti s časovým krokem $\Delta t = 1 \cdot 10^{-5}$ s. Příklady vypočtených akustických tlaků 0.2 m před ústy (detail v intervalu 0.12s až 0.14s) a jejich autospektrum pro samohlásku /o/ jsou zobrazeny na obr. 13 a obr. 14. Pro samohlásku /u/ pak na obr. 15 a obr. 16.



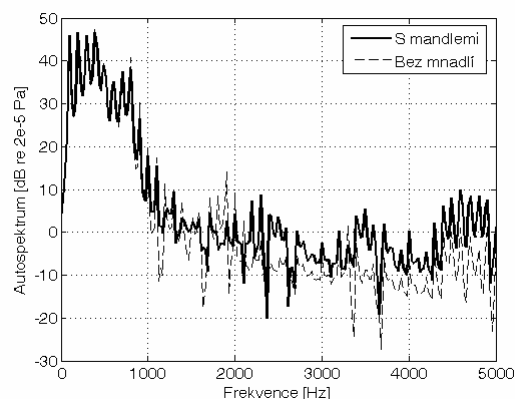
Obrázek 13. Vypočtený akustický tlak 0.2m před ústy, v intervalu 0.12s až 0.14s, samohlásky /o/.



Obrázek 14. Autospektra vypočteného akustického tlaku 0.2 m před ústy, samohlásky /o/.



Obrázek 15. Vypočtený akustický tlak 0.2m před ústy, v intervalu 0.12s až 0.14s, samohlásky /u/.



Obrázek 16. Autospektra vypočteného akustického tlaku 0.2 m před ústy, samohlásky /u/.

6. Diskuze

Rezonanční frekvence nalezené v autospektrech vypočtených akustických tlaků odpovídají dobře experimentálním datům pro formanty uvedeným ve foniatrické literatuře a výsledkům analýzy vlastních frekvencí MKP modelů. Řešení v časové oblasti umožňuje vytvořit zvukové soubory pro posouzení kvality vyslovované samohlásky poslechem. Pro vytvoření delšího zvukového záznamu byly vícekrát zopakovány poslední čtyři periody, kdy je odezva již ustálená. Srovnání těchto zvukových souborů pro vokální trakt s mandlemi a po odebrání mandlí vykazuje poněkud odlišnou barvu vyslovovaných samohlásek. U modelu s polovičním objemem akustických prostorů po odebrání mandlí již tento rozdíl není slyšitelný.

7. Závěr

Byly vytvořeny MKP modely vokálních traktů pro české samohlásky /a/, /e/, /i/, /o/ a /u/ s akustickým prostorem kolem hlavy člověka, umožňující pomocí přechodové analýzy s analyticky popsaným budícím signálem v úrovni hlasivek (Liljencrants-Fantův model) numerickou simulaci vyslovování těchto samohlásek. Tyto modely byly dále upraveny přidáním akustických prostorů vzniklých odebráním mandlí, pro posouzení vlivu tonzilektomie na jejich výslovnost. Vytvořené MKP modely umožňují sledovat šíření akustických vln od úst dále do okolního prostoru a řešení v časové oblasti umožňuje vytvářet zvukové soubory pro ověření kvality vyslovované samohlásky poslechem.

Ze získaných výsledků vyplývá, že vlastní frekvence MKP modelů odpovídají dobře hodnotám formantů uvedeným v české foniatrické literatuře. Také rezonanční frekvence nalezené ve spektrech při simulaci vyslovování samohlásek odpovídají hodnotám formantů v literatuře a vlastním frekvencím získaným modální analýzou. Odebrání mandlí způsobilo posun některých formantů především směrem k nižším frekvencím. Největší posun byl zjištěn u druhého a třetího formantu u samohlásky /o/ a to přibližně o 300 Hz směrem k nižším frekvencím. Dále pak u druhého (~450 Hz) a třetího (~150 Hz) formantu u samohlásky /u/ také směrem k nižším frekvencím. Největší posuny formantů byly zjištěny v případech, kdy jsou mandle umístěny blízko kmitny odpovídajícího vlastního tvaru kmitů. U modelů, kde bylo uvažováno stažení tkáně po operaci, byl posun formantů menší. Posun formantů je ovšem velice závislý nejen na velikosti mandlí, ale i na jejich poloze ve vokálním traktu. Například u samohlásky /a/ se mění rozdíl polohy třetího formantu po a před tonzilektomií od -137 Hz do +168 Hz se změnou části objemu mandlí, která zasahuje do akustického prostoru vokálního traktu.

Závěrem lze tedy konstatovat, že odebrání mandlí způsobí posun některých vyšších formantů samohlásek směrem k nižším frekvencím, ale tento vliv je velice individuální a silně závisí na konkrétní anatomii vokálního traktu a poloze a velikosti mandlí.

8. Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory grantu GAČR č. 106/04/1025 „*Modelování vibroakustických systémů se zaměřením na vokální trakt člověka*“.

9. Literatura

Abé, A., Hayashi, K., Sato M. (1996) *Data book of mechanical properties of living cells, tissues and organs*. Springer-Verlag, Tokyo.

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: *Interaction and Feedbacks '2002* (Zolotarev, I. ed.), Institute of Thermomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, pp. 13-20.

Dedouch, K., Horáček, J., Vampola, T., Vokřál, J. (2003) Velofaryngeal insufficiency studied using finite element models of male vocal tract with experimental verification, in: *Models and analysis of vocal emissions for biomedical applications* -MAVEBA (Manfredi, C. ed.), Firenze, Italy, pp. 229-232.

- Fant, G., Liljencrants, J., Lin, Q. (1985) A four parameter model of glottal flow, in: *STL-QPSR 4*, Sweden, pp. 1-13.
- Hori, Y., Koike, Y., Ohyama, G., Otsu, S., Abe, K. (1996) Effects of tonsillectomy on articulation, *Acta Otolaryngol*, 523, pp 248-251.
- Ilk, H. G., Eroglu, O., Satar, B., Özkaptan, Y. (2002) Effects of tonsillectomy on speech spectrum. *Journal of Voice*, 16, 4, pp. 580-586.
- Novák, A. (1996) *Phoniatrics and pedaudiology. Voice disorders –principles of voice physiology, diagnostics, treatment, reeducation and rehabilitation*. Unitisk s.r.o., Prague.
- Palková, Z. (1994) *Phonetics and phonology of the Czech language*. Charles University Karolinum, Prague.
- Saida, H., Hirose, H. (1996) Acoustic changes in coice after tonsillectomy, *Acta Otolaryngol*, 523, pp. 239-241.
- Švancara, P., Horáček, J., Pešek L., (2004) Numerical modelling of production of Czech vowel /a/ based on FE model of the vocal tract, in: *Inter. Conference on Voice Physiology and Biomechanics*, Marseille, France, pp.163- 166.