

INFLUENCE OF VELOPHARYNGEAL INSUFFICIENCY ON PHONATION OF CZECH VOWELS

T. Vampola^{*}, J. Horáček^{**}

Summary: The effects of velopharyngeal insufficiency on acoustic frequencymodal characteristics of human supraglottal spaces are investigated. The finite element model was developed from magnetic resonance images (MRI) of the subject during phonation. The influence of the velopharyngeal insufficiency on phonation of the Czech vowels /A,I,U/ is numerically simulated in time domain. The Liljecrants-Fant's pulse is used for excitation of the acoustic system.

1. Úvod

Obor biomechaniku hlasu, zabývající se generováním zvuku hlasivkami a šířením zvukových vln vokálním traktem člověka je vědním oborem, který se v současné době velmi dynamicky rozvíjí. Analýza generace zvuku hlasivkami a jeho šíření vokálním traktem, lebečními kostmi, měkkými tkáněmi lidské hlavy až k percepci zvuku příslušnými mozkovými centry představuje velmi složitý komplexní problém. Defekt některého z prvků přenosového systému má za následek poruchy vnímání zvuku člověkem a tím i vlastního hlasového projevu. Proto je nutné věnovat náležitou pozornost analýze reálných cest šíření zvuku a jejich vibroakustických charakteristik. Výpočtové modely a zejména numerické simulace fonace v časové oblasti mohou být využívány při studiu generace hlasu, k modelování vlivu vrozených vad v oblasti vokálního traktu člověka, k simulacím pooperačních stavů osob s nedomykavostí uzávěru měkkého patra, resp. pacientů po dstranění nádorů.

Kmitočtový rozsah řeči pokrývá téměř celé sluchové pásmo asi od 80 Hz do 16 kHz. Většina energie řeči je obsažena v kmitočtech pod 1 kHz a prakticky veškerá energie do 2 kHz. Zbytek energie obsažený ve vysokých tónech má však pro srozumitelnost řeči velký význam, neboť sluch je v těchto oblastech citlivější. Proto je pro posouzení změny hlasové kvality (v důsledku geometrické modifikace či patologické změny vokálního traktu) takové matematické modely, které jsou s dostatečnou přesností schopné zahrnout i vliv vyšších frekvenčních rozsahů.

V příspěvku je prezentován způsob sestavení matematických modelů vokálního traktu vhodných pro analyzování vliv nedomykavosti uzávěru měkkého patra na fonační charakteristiky českých samohlásek.

2. Geometrická konfigurace reálného vokálního traktu člověka

Výchozí geometrická konfigurace reálného vokálního traktu člověka, byla získána pomocí metody magnetické rezonance. Na obr. 1 je prezentován snímek z metody MR ve středním

^{*} Dr. Ing. Tomáš Vampola, Ústav mechaniky FS ČVUT v Praze, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2, e-mail: tomas.vampola@fs.cvut.cz

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

sagitálním řezu. Na obr. 2 je ukázán MKP model vokálního traktu odvozený přímou transformací snímků magnetické rezonance do MKP sítě dle postupu uvedeného v (Kršek, 2000).



Obr.1 Sagitální řez, hláska /A/



Obr. 2 MKP model, hláska /A/

Tvarová modifikace, či připojení spolukmitající hraniční tkáně na takto sestavený MKP model je značně komplikované. Proto byl navržen algoritmus zpětné transformace MKP sítě do geometrických entit. Tento přístup umožňuje parametrizaci geometrického popisu a snadnou následnou modifikovatelnost modelu včetně připojení hraničních tkání. Algoritmus je založen na principu definičních řezů. Na obr. 3 a obr. 4 jsou uvedeny tvary a polohy definičních řezů pro rekonstrukci vokálního traktu při fonaci české samohlásky /A/.



Obr. 3 Definiční objemy, hláska /A/

Obr. 4 Definiční řezy, hláska /A/

Zrekonstruované parametrické modely vokálního traktu při fonaci českých samohlásek /A/ a /I/, jsou uvedeny na obr. 5 a obr. 6.



Obr. 5 Rekonstruovaná hláska /A/

Obr. 6 Rekonstruovaná hláska /I/

3. Budicí puls

Při generování akustických tlakových polí vokálního traktu vyvstává otázka vhodného buzení systému. Hlasivky v podstatě generují periodicky se opakující rozruch, který se dále šíří vokálním traktem. Pro další analýzy byl použit tzv. čtyř parametrický Liljencrantsův-Fantův model definující rozruch generovaný hlasivkami pomocí časové derivace objemové rychlosti dle (Fant, et al. 1985). Pro každou základní periodu hlasivkového signálu lze vyjádřit časovou derivaci objemové rychlosti ve tvaru

$$\frac{\mathrm{d}(w_g)}{\mathrm{d}t} = \begin{cases} E_0 e^{\alpha t} \sin(\omega_g t), & 0 < t < t_e \\ -\frac{E_e}{\varepsilon t_a} \left(e^{-\varepsilon(t-t_e)} - e^{-\varepsilon(t_e-t_e)} \right), & t_e \le t \le t_c, \end{cases}$$
(1)

kde čas *t* leží v intervalu [0, $t_c = T_0$]. T_0 je perioda odpovídající základní frekvenci pro kterou je puls generován. Hodnoty t_p , t_e a t_a spolu s parametrem E_e a základní periodou pohybu jednoznačně definují tvar generovaného pulsu viz obr. 7. Výraz pro hodnotu objemové rychlosti $w_g(t)$ procházející hlasivkami lze odvodit integrací definičních vztahů (1).

$$w_{g}(t) = \begin{cases} \frac{E_{0}\omega_{g}}{\omega_{g}^{2} + \alpha^{2}} \left[\frac{\alpha}{\omega_{g}} e^{\alpha t} \sin(\omega_{g} t) - e^{\alpha t} \cos(\omega_{g} t) + 1 \right], & 0 < t < t_{e} \\ \frac{E_{e}}{\varepsilon t_{a}} \left[\frac{1}{\varepsilon} \left(e^{-\varepsilon(t-t_{e})} - e^{-\varepsilon t_{e}} \right) + t e^{-\varepsilon(t_{c}-t_{e})} \right], & t_{e} \le t \le t_{c}. \end{cases}$$

$$(2)$$

Zavedeme-li bezrozměrové parametry

$$R_{a} = \frac{t_{a}}{t_{c} - t_{e}}, \ R_{k} = \frac{t_{e} - t_{p}}{t_{p}}, \ R_{g} = \frac{T_{0}}{2 t_{p}},$$
(3)

lze pro zvolené parametry $E_e = 0.4 \text{ m}^3 \text{s}^{-2}$, $R_g = 1.12$, $R_k = 0.34$ a základní frekvenci $F_0 = 100 \text{ Hz}$, odpovídající mužskému hlasu a podmínky spojitosti objemové rychlosti dopočítat zbývající parametry.



Obr. 7 Budící puls časové derivace objemové rychlosti v úrovni hlasivek

Obr. 8 Budící puls časové derivace objemové rychlosti v úrovni hlasivek

Na obr. 7 je uveden budicí puls derivace objemové rychlosti s vyznačenými řídícími parametry tak, jak byl použit pro následné numerické simulace fonace. Na obr. 8 je uveden budicí puls objemové rychlosti získaný integrací.

4. Vyzařovací mechanická impedance

Mezi nejvýznamnější mechanismy disipace energie vokálního traktu patří vyzařování akustické vlny v rovině úst do otevřeného akustického prostoru. Běžně je tento jev modelován akustickým vysílačem nultého řádu, či použit model pístově kmitající tuhé kruhové desky v nekonečné stěně pro nějž je např. v práci (Merhaut, 1986) odvozen vztah pro hodnotu akustické impedance ve tvaru

$$Z_{a} = \frac{c_{0}\rho_{0}}{S} (A+iB), \quad A = 1 - \frac{J_{1}(2kR)}{kR}, B = \frac{H_{1}(2kR)}{1+kR}, \tag{4}$$

kde Besselovy funkce J1 a Stráveno funkce H1 lze vyjádřit pomocí řad

$$J_1(2kR) = \left(\frac{2kR}{2}\right) \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!(m+1)!} \left(\frac{2kR}{2}\right)^{2m},$$
(5)

$$H_1(2kR) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{\Gamma(m+\frac{3}{2})\Gamma(m+\frac{3}{2}+1)} \left(\frac{2kR}{2}\right)^{2m+2}.$$

Ve vztahu (4) je c₀ rychlost šíření zvuku v daném prostředí a ρ_0 je hustota daného prostředí, R je ekvivalentní poloměr kruhové desky vypočtený z plochy definičního řezu v rovině úst a $k = \frac{\omega}{c_0}$ je vlnové číslo. Na obr. 9 jsou porovnány průběhy akustické vyzařovací impedance

pro různé hodnoty ekvivalentního poloměru akustického vysílače nultého řádu. Na obr. 10 jsou porovnány průběhy akustické vyzařovací impedance pro vysílač nultého řádu a pístově kmitající desky stejného ekvivalentního poloměru. Je patrné, že pro nižší hodnoty budících frekvencí lze prezentované průběhy s dostatečnou přesností aproximovat lomenou čarou.



Obr. 9 Vyzařovací impedance akustického vysílače 0-tého řádu



Obr. 10 Vyzařovací impedance akustického vysílače 0-tého řádu / pístově kmitající desky

5. Nedomykavost uzávěru měkkého patra

Sestavené 3D MKP parametrické modely byly využity pro modelování a posouzení defektů vokálního traktu. V příspěvku je analyzován vliv nedomykavosti uzávěru měkkého patra na fonaci hlásek postiženého subjektu. Z lékařské literatury je známo (Vohradník, M., 2001), že míra huhňavosti závisí na rezonančních vlastnostech dvou spojených rezonátorů – orálního a nazálního, přičemž je vypozorováno, že při tvorbě samohlásek je tzv. otevřenou huhňavostí nejméně ovlivněna samohláska /A/ a nejvíce samohlásky I/A a U/A. Nedomykavost uzávěru měkkého patra je stav, kdy měkké patro a svalovina hltanu v činnostech polykání, dýchání či řeči netvoří optimální uzávěr mezi oro a nazofaryngem, který je nutný pro nerušené provedení těchto funkcí. Akustická analýza velofaryngeální insuficience je zaměřena především na změnu barvy hlasu, protože se jedná především o změny rezonanční. Pro modelování tohoto defektu řeči byl použit model vokálního traktu pro samohlásky /A/, /I/ a /U/. ke kterým byl dodefinován akustický prostor nazálního traktu (Dedouch, 2001). Akustické prostory byly propojeny dodatečným akustickým objemem proměnné velikosti modelující různý stupeň nedomykavosti uzávěru měkkého patra (Vampola, 2005). Výpočtový model řešené soustavy je patrný z obr.11 a 12.

Pro posouzení vlivu velikosti propojovacího akustického objemu mezi vokálním a nazálním traktem na fonaci českých samohlásek, byly nejprve pro sestavené modely vyšetřeny hodnoty vlastních frekvencí pro hustotu vzduchu 1.2 kgm⁻³ a rychlost zvuku 353 ms⁻¹. Na hraničních plochách modelu byla uvažována pohltivost akustických vln definovaná činitelem pohltivosti $\beta = 0.005$. Akustický tlak v rovině úst a nosních otvorů byl předpokládán nulový.



Obr. 11 MKP model velofaringeální nedostatečnosti, hláska /A/



Na obr. 13, 14 a 15 jsou znázorněny prvé vlastní tvary kmitu řešené soustavy pro samohlásky /*A*/, /*I*/ a /*U*/ s velikosti nedomykavosti uzávěru měkkého patra definovaného propojovací plochou $S = 134 \text{ mm}^2$.



Obr.13 První vlastní tvar kmitu, hláska /A/, F1=669 [Hz], *S*=134 mm²

Obr.14 První vlastní tvar kmitu, hláska /*I*/, F1=557 [Hz], *S*=134 mm²

Na obr. 16 je uveden vlastní tvar kmitu pro převážně nazální rezonani pro model vokálního traktu při fonaci samohlásky /*I*/. S rostoucí velikostí plochy *S*, propojující nosní a ústní dutinu, se ve frekvenčním spektru nad druhou formantovou frekvencí F2 postupně oddělují další dvě, převážně nazální rezonance (F2 < f_{naso} < F3). Díky jejich blízkosti a velkému tlumení jsou obě nasální rezonance poměrně silně vázány, podobně jako je tomu pro malé velikosti propojovacího objemu, kde je frekvence f_{naso} silně vázána s druhý formantem F2.

Vypočtené hodnoty vlastních frekvencí pro samohlásku /A/ jsou sumarizovány v tabulce 1, hodnoty vlastních frekvencí pro samohlásku /I/ jsou uvedeny v tabulce 2 a hodnoty vlastních frekvencí pro samohlásku /U/ jsou uvedeny v tabulce 3. Zvýrazněné hodnoty přísluší převážně nazálním tvarům kmitu.



Obr.15 První vlastní tvar kmitu, hláska /U/, F1=596 [Hz], $S=134 \text{ mm}^2$

Obr.16 Třetí vlastní tvar kmitu, hláska /I/, F3=1467 [Hz], *S*=134 mm²

| Tab.1 Vlastní frekvence, samohláska /A/ | | | | | | | |
|---|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|--|--|--|
| F [Hz] | $S=0 \text{ mm}^2$ | $S=50 \text{ mm}^2$ | $S=134 \text{ mm}^2$ | $S=255 \text{ mm}^2$ | | | |
| 1 | -50.8±j644.2 | -51.6±j 666.0 | -51.7±j669.1 | -51.7±j669.8 | | | |
| 2 | -33.9±j1165.4 | -49.2±j1014.9 | -46.9±j1030.0 | -45.0±j1038.2 | | | |
| 3 | -49.1±j3034.8 | -36.8±j1368.4 | -54.3±j1466.1 | -55.0±j1712.7 | | | |
| 4 | -51.2±j3995.7 | -54.2±j1419.4 | -39.8±j1563.0 | -43.3±j1841.2 | | | |
| 5 | -43.2±j4191.2 | -47.9±j2997.1 | -47.7±j3031.1 | -49.4±j3093.1 | | | |
| 6 | -56.1±j4787.0 | -51.6±j3168.6 | -51.3±j3289.7 | -48.2±j3415.1 | | | |

Tab.2 Vlastní frekvence, samohláska /I/

| F [Hz] | $S=0 \text{ mm}^2$ | $S=50 \text{ mm}^2$ | $S=134 \text{ mm}^2$ | $S=255 \text{ mm}^2$ |
|--------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | -32.2±j255.0 | -34.2±j 506.4 | -35.5±j557.4 | -35.8±j571.2 |
| 2 | -48.2±j2415.9 | -51.1±j1104.9 | -49.7±j1223.8 | -49.4±j1283.6 |
| 3 | -73.4±j3135.8 | -54.2±j1420.9 | -54.4±j1467.8 | -55.0±j1711.6 |
| 4 | -51.1±j3904.5 | -49.1±j2490.1 | -47.8±j2538.2 | -45.5±j2584.6 |
| 5 | -77.0±j4738.6 | -52.9±j3097.1 | -70.2±j3158.8 | -49.9±j3222.0 |
| 6 | -75.8±j5498.3 | -68.9±j3140.9 | -50.8±j3244.6 | -60.3±j3509.9 |

| Tab.3 Vlastní frekvence, samohláska /U/ | | | | | | | |
|---|--------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|--|--|--|
| F [Hz] | $S=0 \text{ mm}^2$ | $S=50 \text{ mm}^2$ | <i>S</i> =134 mm ² | $S=255 \text{ mm}^2$ | | | |
| 1 | -48.8±j420.3 | -49.0±j 582.2 | -49.1±j596.2 | -50.6±j699.8 | | | |
| 2 | -30.8±j844.6 | -30.6±j848.9 | -34.4±j892.8 | -30.4±j1173.7 | | | |
| 3 | -60.3±j2164.8 | -51.8±j1044.5 | -47.5±j1151.2 | -48.2±j1291.3 | | | |
| 4 | -79.6±j3574.2 | -54.2±j1420.1 | -54.4±j1472.2 | -58.2±j2208.6 | | | |
| 5 | -84.6±j4646.8 | -58.6±j2508.9 | -56.8±j2546.6 | -60.4±j2843.1 | | | |
| 6 | -39.7±j5018.6 | -48.4±j3136.2 | -56.1±j3220.1 | -61.1±j3343.3 | | | |

Je zřejmé, že propojení akustických prostor nejen viditelně ovlivnil všechny tři formantové tvary kmitu pro frekvence F1-F3, ale zároveň způsobil vznik dalších rezonancí v okolí frekvence f_{naso} . Při porovnání tvarů kmitání pro modely bez propojení (S = 0) a s propojením (S = 50, 132, 255 mm²) je patrné, že tvary pro formanty F1, F2 a F3 jsou vzájemně afinní. Byly vypočteny vždy dvě vlastní frekvence f_{naso} odpovídající převážně akustickým kmitům v nazální části MKP modelu. Prvá frekvence $f_{naso,1}$, odpovídající převážně antisymetrickým kmitům v horizontálním směru (viz obr. 16). Druhá, oro-nazální frekvence $f_{naso1,2}$ odpovídá převážně symetrickým vertikálním kmitům vzduchu v ústní a nosní dutině.

Pro posouzení změny kvality hlasového projevu v důsledku propojení vokálního a nazálního traktu byly provedeny numerické simulace fonace v časové oblasti. Z vypočtených tlakových charakteristik byly generovány zvukové záznamy pro subjektivní posouzení hlasové kvality. Budicí puls v úrovni hlasivek byl uvažován ve tvaru definovaném v odstavci 3. Při výpočtu odezvy systému byla simulována frekvenčně závislá vyzařovací akustická impedance dle odstavce 4.







Obr.18 Měrný tlak, S=50mm², hláska /*I*/

Na obr.17 a obr. 18 jsou prezentovány průběhy měrných akustických tlaků v rovině úst a nosu pro samohlásky /A/ a /I/. Je patrné, že v okamžiku propojení akustických prostorů dochází k poklesu tlaku před ústy. Pro samohlásku /A/ v souladu s (Vohradník, M., 2001) nedochází k dramatické změně tlakových charakteristik s variující se plochou propojení vokálního a nazálního traktu. Naopak pro samohlásky /U/ a /I/ dojde k výraznému poklesu hodnot tlaků v rovině úst. Vliv velikosti propojovacího objemu mezi vokálním a nazálním traktem je patrný z obr. 19, 20 a 21.



Uvedené průběhy jsou v souladu s klinickým ověřením, že huhňavostí je nejméně ovlivněna samohláska /A/ a nejvíce samohlásky /I/ a /U/.

Na obr.22 a 23 jsou uvedeny spektrální výkonové hustoty tlakových charakteristik v rovině úst a nosu pro model soustavy modelující nedomykavost uzávěru měkkého patra při fonaci hlásky /A/a /I/ definovanou plochou propojení $S = 50 \text{ mm}^2$ pro buzení LF pulsem.







ю

150

1134

Pro porovnání jsou na obr. 24 a 25 ukázány přenosové funkce mezi hlasivkami a rovinou úst pro model soustavy modelující nedomykavost měkkého patra při fonaci hlásky /A/a /I/ při buzení širokopásmovým pulsem je patrný vznik nového rezonančního vrcholu poplatný oro-nasálnímu vlastnímu tvaru kmitu.



Obr.24 Přenosová funkce, hláska/A/

Obr.25 Přenosová funkce, hláska /I/,

4000

F [Hz]

5000

6000

7000

6. Závěr

V příspěvku je prezentován způsob sestavení matematických modelů vokálního traktu vhodných pro analýzu vlivu nedomykavosti uzávěru měkkého patra na fonační charakteristiky českých samohlásek. Pro modely respektující akustickou vyzařovací impedanci i pohltivost hraničních ploch byly vypočteny hodnoty vlastních frekvencí. Je patrné, že propojení akustických prostor nejen viditelně ovlivní všechny tři formantové tvary kmitu pro frekvence F1-F3, ale zároveň způsobí vznik dalších rezonancí v okolí frekvence f_{naso} . Modely fokálního traktu člověka modelující nedomykavost uzávěru měkkého patra byly dále využity k predikci

T. Vampola, J. Horáček

změny hlasové kvality. Pomocí numerických simulací fonací byly získány průběhy tlakových polí v rovině úst a nosu. Na modelech se podařilo prokázat závěry vyplývající z klinické praxe , že nedomykavostí uzávěru měkkého patra jsou narozdíl od samohlásky /A/ nejvíce ovlivněny samohlásky /U/ a /I/.

7. Poděkování

Tato práce vznikla v rámci podpory GA ČR v grantovém projektu č. 106/04/1025 "Modelování vibroakustických systémů se zaměřením na vokální trakt člověka".

8. Literatura

Dedouch, K.; Horáček, J.; Vampola, T.; Kršek, P.; Švec, JG, 2001. Mathematical modelling of male vocal tract. In: *Proc. MAVEBA*, Sept.13-15, 2001, Firenze, pp. 6-8

Fant, G.; Liljencrants, J.; Lin, Q., 1985. A Four Parameter Model of Glottal Flow. In *STL-QPSR* 4, KTH, Stockholm, Sweden, pp.1-13.

Kršek, P., 2000. Possibilities of creation of FEM models from CT/MR data. In: Engineering Mechanics 2000, Svratka, 15.-18.5. 2000, Vol. 3, pp. 27 – 32.

Merhaut, J., 1976. Teoretické základy elektroakustiky . Academia.

Vampola, T.; Horáček, J.; Veselý, J.; Vokřál, J., 2005. Modelling of influence of velopharyngeal insufficiency on phonation of vowel /A/. In: *Proc. MAVEBA*, Oktb.29-31, 2005, Firenze, pp. 43-46.

Vohradník, M., 2001. *Communication disorders by velopharyngeal insufficiency*. Prague - Dolni Březany: Scriptorium, 2001, pp.134-145.