

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ACOUSTICS OF A SIMPLIFIED PHYSICAL VOCAL TRACT MODEL FOR PHONATION OF VOWEL /A/ BY LF PULSE EXCITATION

J. Kryštůfek¹, T. Vampola², J. Horáček³

Summary: *The paper is focused on experiment of investigation of acoustics properties of 3D simplified model of human vocal tract for phonation of vowel /a/. The physical model was excited by LF pulse and acoustic pressure was measured in specific points. Measured values were evaluated and compared with values calculated by Finite Element Method (FEM).*

1. Úvod

Lidský hlas, jakožto akustický signál, se skládá z velkého počtu harmonických složek, které jsou násobkem základní frekvence tvořené hlasivkami. Vzájemná velikost jejich amplitud umožňuje rozeznávat jednotlivé samohlásky a má vliv na barvu hlasu. Největší vliv na kvalitu hlasu mají frekvenční složky v rozmezí 70 až 5000 Hz. Nástrojem pro tvorbu hlasu je vokální trakt, který se chová jako proměnlivý akustický filtr (Obr. 1), jež zesiluje nebo zeslabuje, v závislosti na vyslovované hlásce, určité složky frekvenčního spektra generátoru vstupního akustického signálu, kterými jsou v případě lidského hlasu hlasivky. Cílem této práce bylo ověření chování zjednodušeného 3D modelu vokálního traktu člověka při buzení LF pulzem (Fant et al., 1985), který je analytickým modelem průběhu zrychlení objemového toku vzduchu hlasivkami. Výsledkem buzení tohoto modelu LF signálem by měl být časový průběh akustického tlaku a jeho frekvenční spektrum odpovídající hlásce /a/.

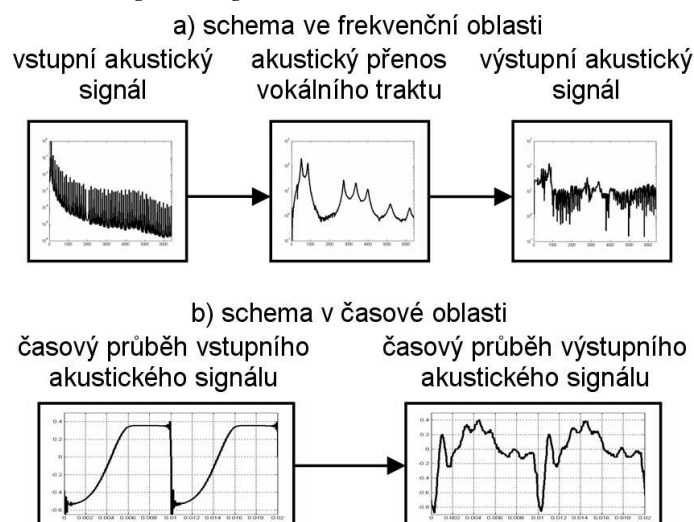
2. Geometrie modelu

Základem pro tvorbu 3D modelu vokálního traktu byly snímky hrtanu a dutiny ústní, vytvořené metodou magnetické rezonance. Ty byly vytvořeny při fonaci samohlásek, v našem případě samohlásky /a/. Dutiny nosní nebyly, s ohledem na geometrickou složitost a jejich menší vliv

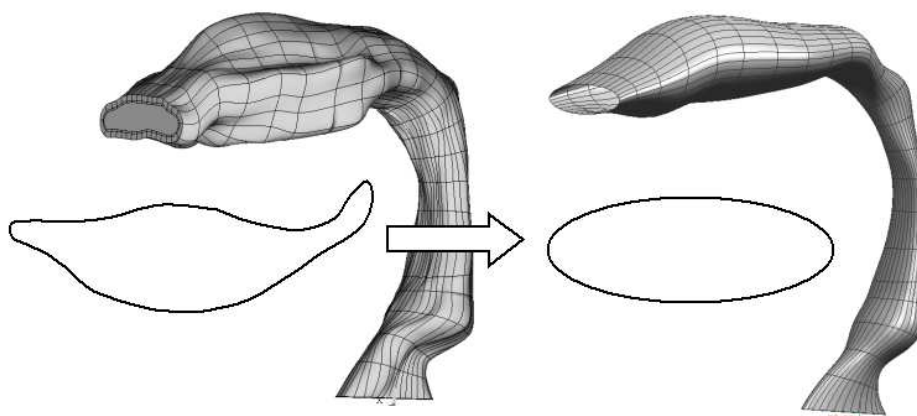
¹ Ing. Jan Kryštůfek, Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00, Praha 8, e-mail: jan.krystufek@fs.cvut.cz

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

³ Ing. Jaromír Horáček, DrSc., Ústav termomechaniky AV ČR, Dolejškova 5, 182 00, Praha 8, e-mail: jaromirh@it.cas.cz



Obrázek 1: Blokové schema funkce systému vokálního traktu člověka

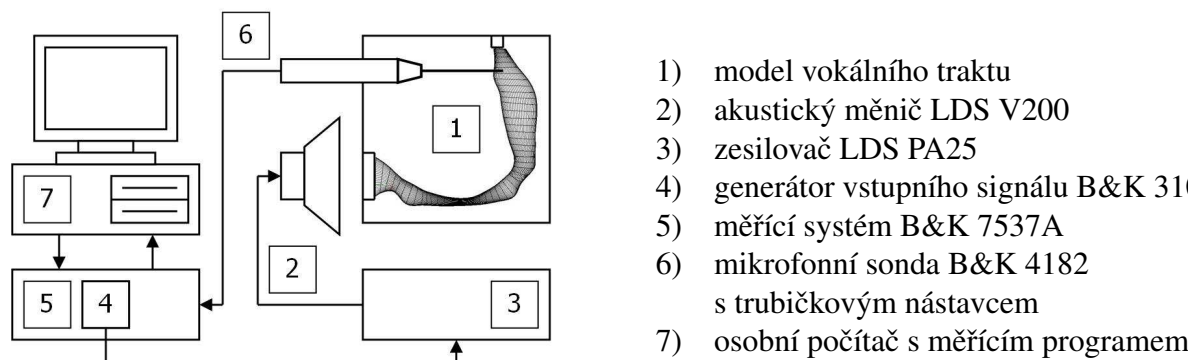


Obrázek 2: Zjednodušení 3D modelu vokálního traktu

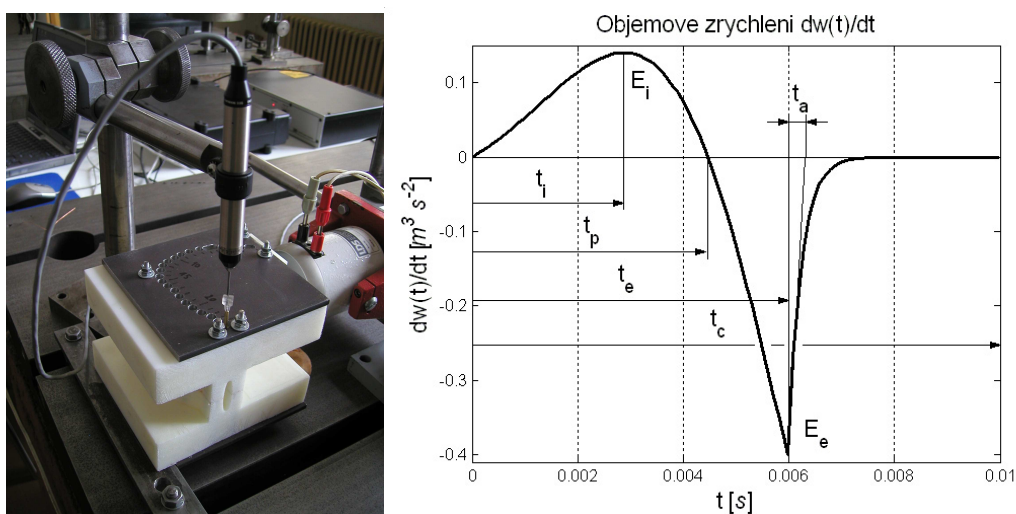
na akustické vlastnosti supraglotických prostor člověka, uvažovány. Pro zmenšení počtu parametrů, souřadnic bodů, byla 3D síť transformována na spojitou hladkou parametrickou plochu. Pak byla provedena další zjednodušující transformace převádějící jednotlivé řezy parametrické plochy, popsané kubickými spline funkcemi, na eliptické řezy. Proložení takových řezů vznikl zjednodušený 3D model (Obr. 2). Touto transformací došlo k značnému zmenšení počtu parametrů, kdy každý řez byl popsán pouze velikostí hlavních poloos, natočením řezu a polohou jeho těžiště v prostoru. Použitá transformace byla popsána v článku Kryštofek et al. (2005), kde byly porovnány přenosy obou parametrických modelů a prokázána oprávněnost použití zjednodušeného modelu.

3. Měření

K realizaci experimentu bylo použito systému Brül&Kjær (B&K) PULSE 8.1, který se skládá z externího zařízení pro generování (typ 3109 obr. 3, blok 4) a zpracování signálu (typ 7537A obr. 3



Obrázek 3: Schema zapojení měřicí soustavy



Obrázek 4: Měření mikrofonní sondou zhora (vlevo), parametry LF pulzu (vpravo)

blok 5) a z osobního počítače (obr. 3, blok 7), vybaveného síťovou kartou a programem PULSE, pro jeho ovládání. Před vstupem do akustického měniče byl signál z generátoru zesílen v zesilovači Ling Dynamic Systems (LDS) PA25 (obr. 3, blok 3). Akustickým měničem byl elektrodynamický budič LDS V200 (obr. 3, blok 2) vytvářející akustický tlak prostřednictvím pístku eliptického průřezu utěsněného latexovou membránou. Fyzický model zjednodušeného 3D modelu dutin vokálního traktu byl postupně buzen třemi různými akustickými signály. Jednalo se o LF pulz opakující se s frekvencí 100 Hz , dále o akustický signál generovaný skutečnými hlasivkami se základní frekvencí 80 Hz a širokopásmový šum v rozsahu 5 Hz až 6400 Hz . Měřením akustické odezvy v místě úst, při buzení v místě hlasivek, byly získány frekvenční přenosové charakteristiky zjednodušeného modelu vokálního traktu pro hlásku /a/.

3.1. LF pulz

K buzení byl použit Liljencrants-Fantův model (Fant et al., 1985) průběhu objemového zrychlení vzduchu při průtoku hlasivkami popsaného rovnicemi:

$$\frac{dw}{dt} = Ee^{\alpha t} \sin(\omega t), \quad t \in (0, t_e) \quad (1)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{-E_e}{\epsilon t_a} [e^{-\epsilon(t-t_e)} - e^{-\epsilon(t_c-t_e)}], \quad t \in \langle t_e, t_c \rangle \quad (2)$$

kde t [s] je čas a w [m^3/s] je objemová rychlost. Vstupní veličinou pro budič je v našem případě poloha píستku v čase. Tu vypočteme podle následujících vztahů:

$$v(t) = \frac{w(t)}{S} \quad (3)$$

$$x(t) = \int v(t) dt = \int \frac{w(t)}{S} dt = \frac{1}{S} \int w(t) dt \quad (4)$$

kde předpokládáme konstantní plochu píستku S [m^2] a jeho proměnou rychlost v [m/s]. Po dvojí integraci výrazů 1 a 2 dostaneme vztah pro výpočet polohy:

$$\begin{aligned} \int w dt &= \int \left\{ \frac{E}{\alpha^2 + \omega^2} e^{\alpha t} [\alpha \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t)] + C \right\} dt = \\ &= \frac{E}{\alpha^2 + \omega^2} \left[\alpha \int e^{\alpha t} \sin(\omega t) dt - \omega \int e^{\alpha t} \cos(\omega t) dt \right] + Ct + D = \\ &= \frac{E}{\alpha^2 + \omega^2} [\alpha I - \omega J] + Ct + D \\ I &= \int e^{\alpha t} \sin(\omega t) dt = \frac{e^{\alpha t}}{\alpha^2 + \omega^2} [\alpha \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t)] \\ J &= \int e^{\alpha t} \cos(\omega t) dt = \frac{e^{\alpha t}}{\alpha^2 + \omega^2} [\alpha \cos(\omega t) + \omega \sin(\omega t)] \\ C &= \frac{E\omega}{\alpha^2 + \omega^2} \\ D &= \frac{E}{\alpha^2 + \omega^2} \frac{2\alpha\beta}{\alpha^2 + \omega^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \int w dt &= \frac{E_e}{\epsilon t_a} \left[\frac{e^{-\epsilon(t-t_e)}}{-\epsilon^2} + \frac{t^2}{2} e^{-\epsilon(t_c-t_e)} \right] + Ft + G \\ F &= \frac{E_e}{\epsilon t_a} \left(\frac{1}{\epsilon} + t_c \right) e^{-\epsilon(t_c-t_e)} \\ G &= \frac{E}{\alpha^2 + \omega^2} [\alpha I(t_e) - \omega J(t_e)] + Ct_e + D - \frac{E_e}{\epsilon t_a} \left[\frac{1}{-\epsilon^2} + \frac{t_e^2}{2} e^{-\epsilon(t_c-t_e)} \right] + Ft + G \end{aligned} \quad (6)$$

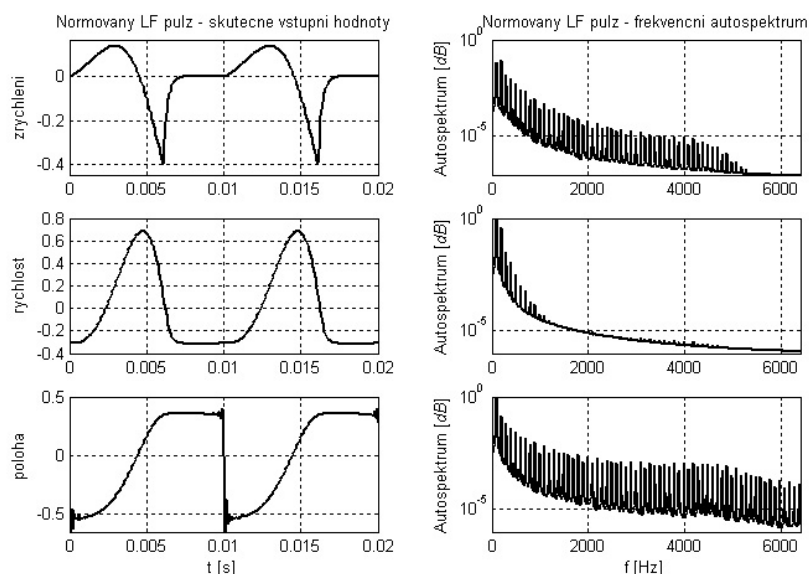
kde byly integrační konstanty C , D , F a G získány z podmínek:

$$w(0) = 0, \quad \int w(0) dt = 0, \quad w(t_c) = 0, \quad \int w_-(t_e) dt = \int w_+(t_e) dt \quad (7)$$

Pro výpočet průběhu polohy pro buzení se základní frekvencí 100 Hz byly použity následující hodnoty parametrů LF modelu:

$$\begin{array}{ll} n=0.062461 & \alpha = 345.152029384626 \\ t_c=0.01 & \epsilon = 3984.708236694348 \\ E_e=0.4 & \omega = \frac{\pi}{t_p} \\ E=0.057902175532 & t_p = \frac{0.01}{2} \frac{1}{1.12} \\ t_e = t_p(1 + 0.34) & t_a = n(0.01 - t_e) \end{array}$$

Odpovídající signály realizované měřícím systémem a jejich spektra pro zrychlení, rychlost i posuv jsou vyneseny na obr. 5.



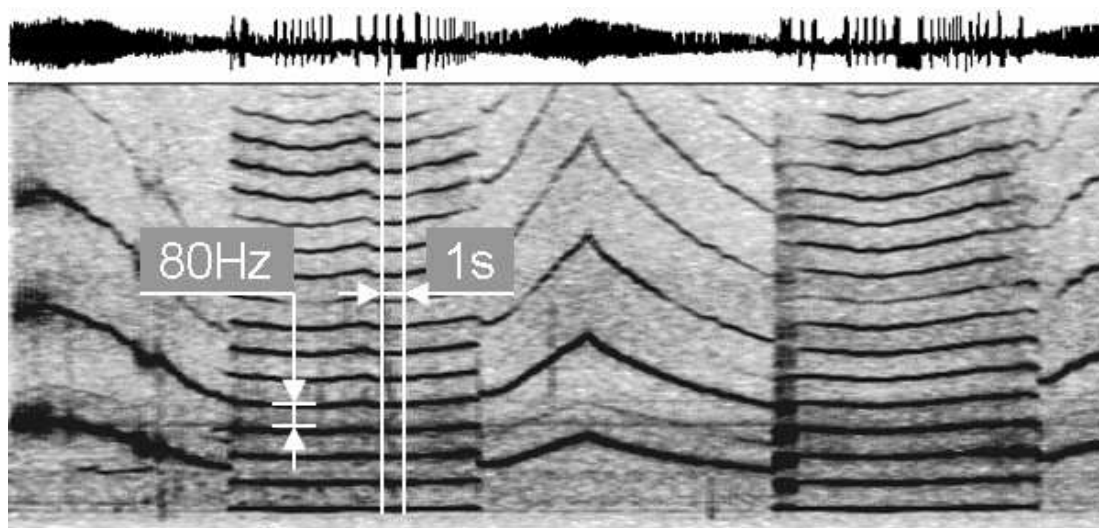
Obrázek 5: normované časové průběhy (zhora dolů) objemového zrychlení, rychlosti a polohy (vlevo), jejich frekvenční spektra (vpravo)

3.2. Budící signál skutečných hlasivek

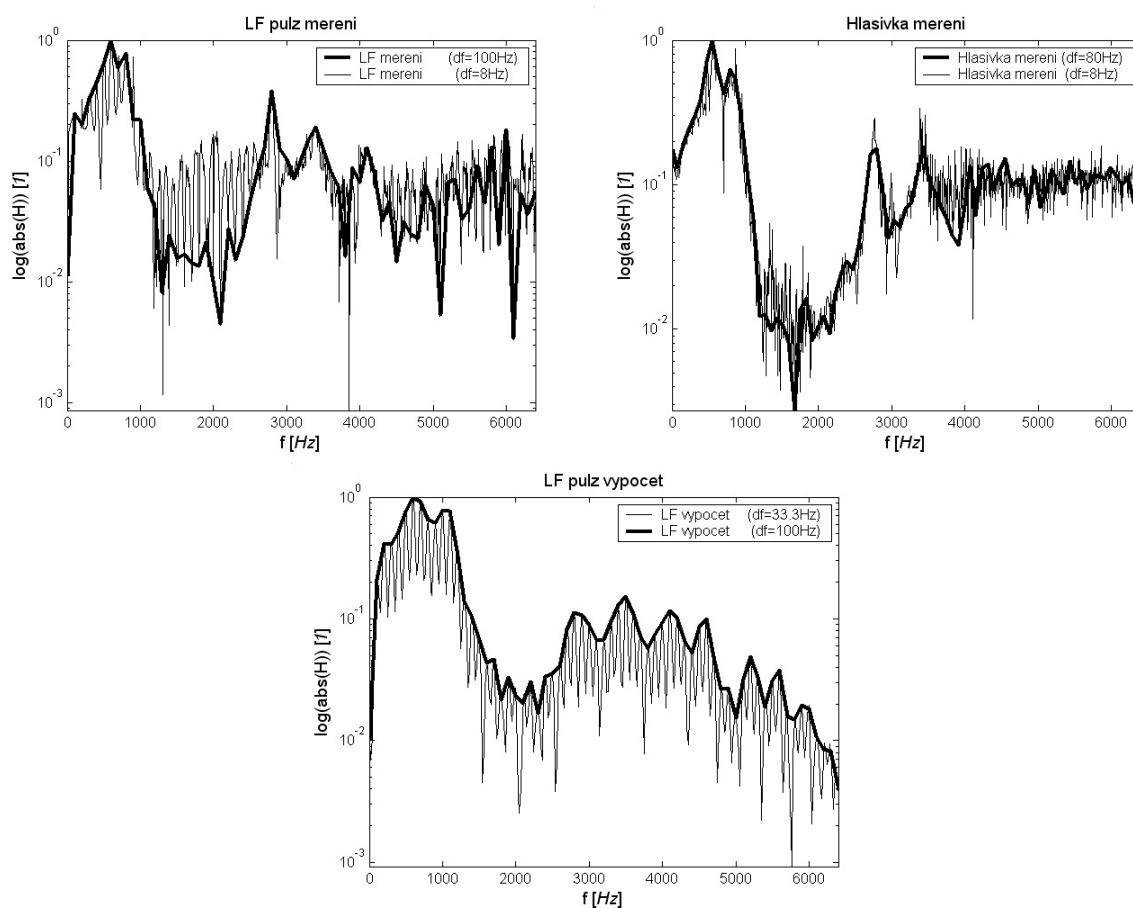
Jako vstupní budící signál skutečných hlasivek byl použit časový průběh akustického tlaku naměřený na preparátu hrtanu (Horáček et al., 2004). Kmitání hlasivek bylo na preparátu vybuzeno proudem vzduchu. Regulace kmitání bylo dosaženo napínáním hlasivek při konstantním objemovém toku. Časový průběh tlaku nad hlasivkami byl měřen pomocí mikrofonní sondy. Z celkového záznamu časového průběhu tlaku byla vybrána část s konstantním frekvenčním spektrem délky 1 s (viz. obr. 6). Pro realizaci měření byla tato část opakována, čímž vznikl vstupní signál potřebné délky.

4. Výpočet

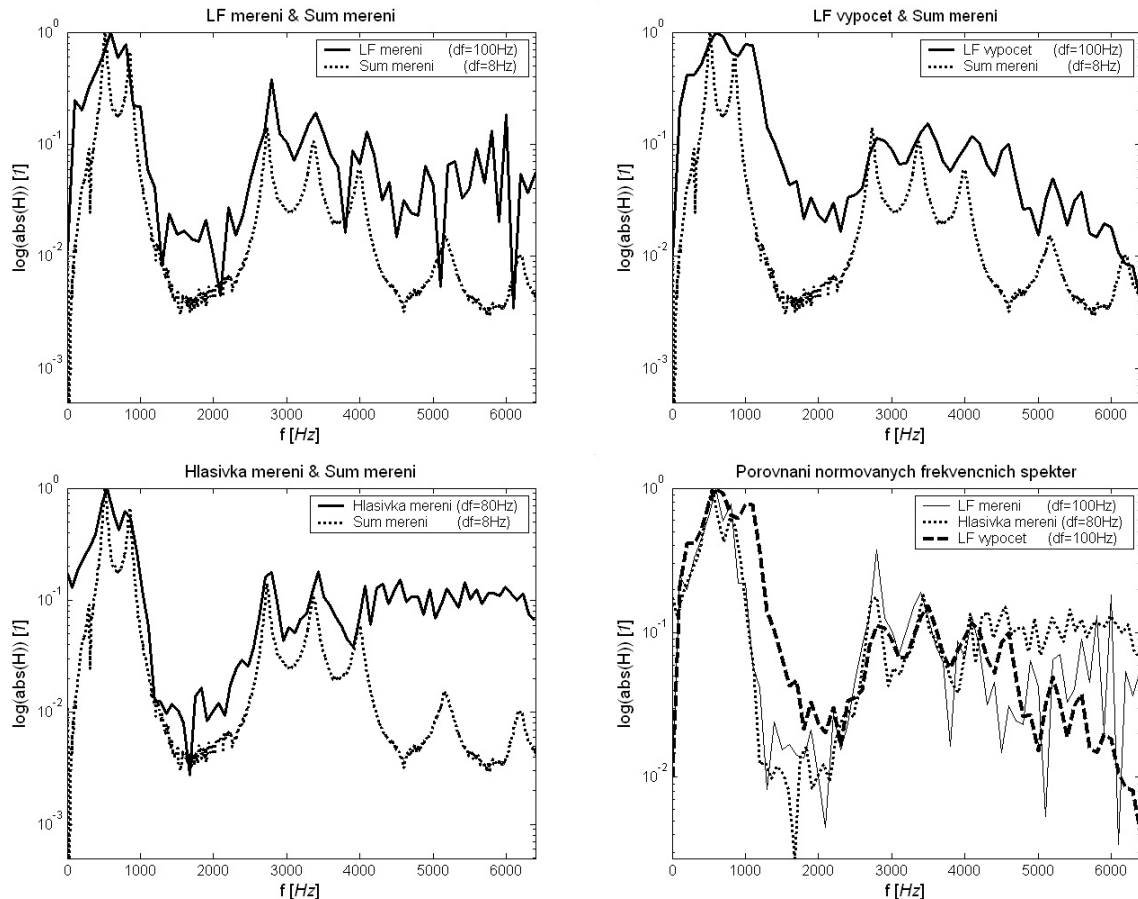
Pro zjednodušený 3D model vokálního traktu byly vypočteny hodnoty akustických vlastních frekvencí za předpokladu nulového akustického tlaku v místě úst. Pro výpočty byla uvažována hustota vzduchu 1.2 kgm^{-3} , rychlost zvuku 343 ms^{-1} a akustická admitance na hraničních plochách modelu $MU = 0.005$. Pro přechodovou analýzu v časové oblasti byla modelována mechanická vyzařovací impedance. Pro její výpočet byla použita analogie pístově kmitající kruhové desky v dokonale tuhé stěně o poloměru zohledňujícím vyzařovací plochu v rovině úst. Vypočtené frekvenční spektrum časového průběhu tlaku v místě úst, pro buzení LF pulzem popsáním v odstavci 3.1., je vyneseno na obr. 7.



Obrázek 6: Záznam akustického signálu tvořeného skutečnou hlasivkami



Obrázek 7: Frekvenční spektra s minimální vzorkovací frekvencí a se základní frekvencí při buzení: a) LF pulzem - měřeno (vlevo nahoře), b) signálem hlasivek - měřeno (vpravo nahoře), c) LF pulzem - vypočteno (uprostřed dole)



Obrázek 8: Porovnání frekvenčních spekter výstupních akustických signálů (plně) s přenosem vokálního traktu naměřeným při jeho buzení šumem (tečkovaně): a) buzení LF pulzem - naměřeno (vlevo nahoře), b) buzení signálem skutečných hlasivek - naměřeno (vlevo dole), c) buzení LF pulzem - vypočteno (vpravo nahoře); d) porovnání všech tří průběhů: plně - LF měření, tečkovaně - hlasivka měření, čárkovaně - LF výpočet (vpravo dole).

5. Výsledky

Výsledky měření a výpočtu jsou souhrně uvedeny na obr. 8, kde jsou porovnány obálky spekter tří výstupních signálů, získaných měřením a výpočtem při buzení LF pulzem a měřením při buzení signálem hlasivek se spektrem výstupního signálu při buzení šumem.

6. Závěr

Z porovnání získaných výsledků vyplývá dobrá shoda spekter naměřených hodnot výstupních akustických tlaků pro buzení LF pulzem i reálným signálem hlasivek se spektrem získaným při buzení modelu šumem. Výrazné odlišnosti ve velikosti amplitud vyšších frekvencí spekter jsou způsobeny šumem v signálu u buzení akustickým signálem skutečných hlasivek a v obou případech charakteristikou dynamického budiče. Ke vzniku šumu v signálu akustické odezvy pro vyšší frekvence při buzení signálem hlasivek zřejmě došlo vlivem špatného navázání při jeho opakování. Spektrum vypočtených hodnot tlaku je mírně posunuto do vyšších frekvencí a ve frekvenční oblasti nad 4 kHz jsou na něm vidět formanty (rezonance), které nebylo možno v experimentu vybudit. Rozdíl v poloze formantů je nejspíše způsoben nepatrným rozdílem

geometrie výpočtového a fyzického modelu v oblasti úst.

Na závěr lze konstatovat, že použitý způsob buzení s časovým průběhem výchylky tvaru LF odpovídá buzení skutečnými hlasivkami.

7. Poděkování

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

Literatura

- Kryštůfek, J., Vampola, T., Horáček, J., & Veselý, J. 2005: *Měření a výpočet akustických vlastností zjednodušeného modelu vokálního traktu při fonaci samohlásky /a/*, in: Interaction and Feedbacks 2005, Inst. of Thermomechanics AS CR, Prague, pp. 55–62.
- Fant, G., Liljencrants, J., & Lin, Q. 1985: *A four parameter model of vocal flow*, in: STL-QPSR 4/1985, pp. 1–13.
- Horáček, J., Švec, J. G., Veselý, J., & Vilkman, E. 2004: *Bifurkations in excised larynges caused by vocal fold elongation*, in: International conference of voice physiology and biomechanics, Marseille, pp. 87–90.
- Dedouch, K., Švec, J. G., Horáček, J., Kršek, P., Havlík, R., & Vokřál, J. 2003: *Akustická analýza mužského vokálního traktu*, in: XIV. celostátní foniatrické dny Evy Sedláčkové, Audio-fon centrum s.r.o., Brno, pp. 60–63.