



MEASUREMENT OF THE VOCAL-FOLD VIBRATION

J. HORÁČEK*, J. G. ŠVEC**, J. VESELÝ*, E. VILKMAN***, I. KLEPÁČEK****

Summary: *The study presents the measurement set-up and selected results of experimental investigation of various dynamic and phonation characteristics of human vocal folds. The experiments performed with excised larynges were focused mainly on study of non-linear vibration effects and on creation of plaster castings of the larynx in a defined fixed phonation position.*

1. Úvod

Lidský hlas je tvořen prvotně v hrtanu, kde vzduch proudící z plic rozkmitává hlasivky, a periodické tlakové fluktuace, vzniklé v důsledku oscilací velikosti mezihlasivkové štěrbiny (glottis), budí akustické kmity ve vokálním traktu člověka. Tyto akustické kmity modifikované frekvenčně-modálními vlastnostmi vokálních dutin člověka pak vytvářejí jednotlivé hlásky a tóny (Fant 1960, Titze 1994). Lidská řeč a zpěv je tedy důsledkem složitých vzájemných interakcí vibrující poddajné živé tkáně, vzdušného proudu a akustického rezonátoru (filtru) tvořeného vokálním traktem člověka mezi hlasivkami a ústním otvorem.

V Ústavu termomechaniky AV ČR byla v rámci řešení komplexního grantového projektu GA ČR 106/98/K019 „Matematicko-fyzikální modelování vibroakustických systémů v biomechanice hlasu a sluchu“ realizována ve spolupráci s několika lékařskými pracovišti řada unikátních měření vibrací hlasivek na preparátech hrtanů za fonace. Vibrace byly měřeny laserovým vibrometrem, elektroglograficky, stroboskopicky a videokymografickou kamerou. Současně s tím byla zaznamenávána řada dalších parametrů jako emitovaný zvuk, subglotický tlak, předpětí hlasivek, průtočné množství a teplota proudícího vzduchu. Kromě toho byla vyvinuta speciální metodika tvorby sádrových odlitků hrtanů pro zjišťování tvaru hlasivek při jejich fonačním postavení. Získané výsledky umožňují zpřesnit paralelně vytvářené matematické modely aeroelastického chování lidských hlasivek (Horáček & Švec 2000) a získat hlubší poznatky o bifurkacích a nelineárních dynamických jevech, k nimž někdy dochází při fonaci. Máme zde na mysli například frekvenční přeskoky mezi falzetovými a hrudními pěveckými rejstříky u zpěváků (Švec a kol. 1999).

* Ing. Jaromír Horáček, DrSc., Ing. Jan Veselý, Ústav termomechaniky AV ČR,
Dolejškova 5, 182 00 Praha 8

** Dr. Jan G. Švec, PhD., Medical Healthcom, s.r.o., Řešovská 10, 181 00 Praha 8

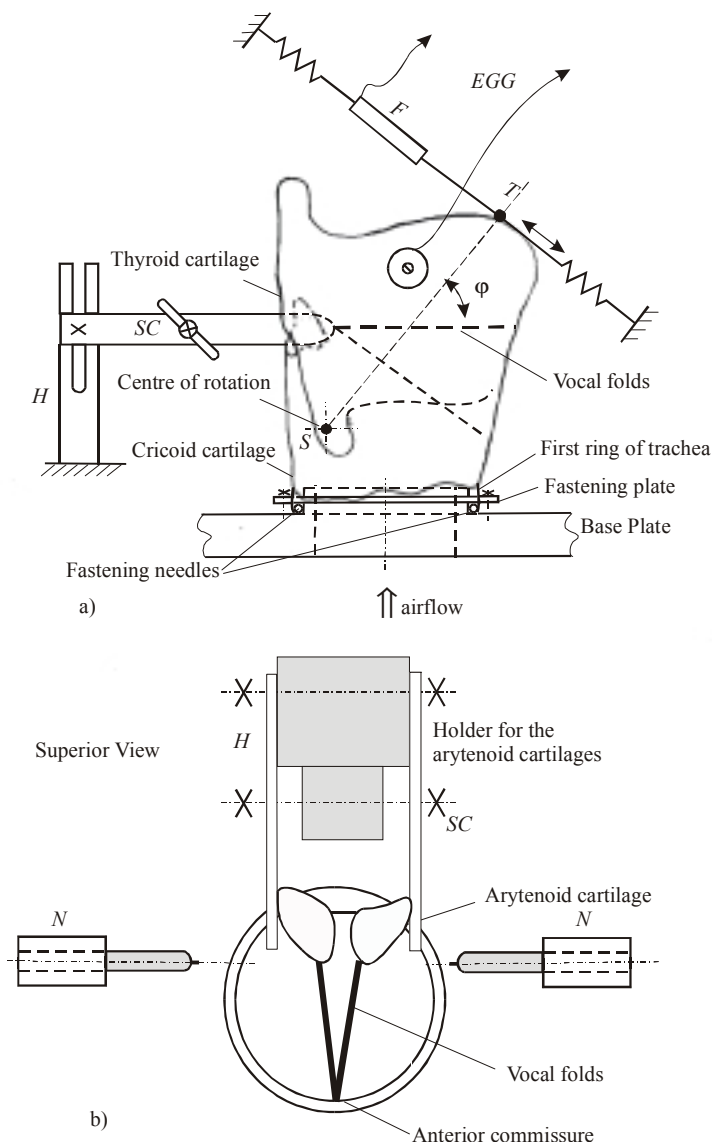
*** Prof. Dr. Erkki Vilkmán, Department of Otolaryngology and Phoniatics.,
University of Oulu and Helsinki University Central Hospital, Finland

**** MUDr. Ivo Klepáček, CSc., Anatomický ústav 1. LF UK, U nemocnice 3, 128 00 Praha 2

2. USPOŘÁDÁNÍ EXPERIMENTU

Experimentální zařízení bylo z větší části navrženo jedním ze spoluautorů příspěvku prof. Vilkmanem na základě jeho zkušeností s podobnými experimenty realizovanými na univerzitě v Tampere (Vilkman 1987) a podrobněji bylo popsáno v našem předešlém příspěvku (Horáček a kol. 2000).

Testovaný hrtan byl prstencovou chrupavkou připevněn k základové desce a držákem H a dvojicí jehel N zapíchnutých do chrupavky štítné byl fixován ve vertikální poloze (viz obr. 1). Fonační postavení hlasivek bylo dáno sevřením hlasivkové chrupavky pomocí šroubu SC na držáku H, měnícím tzv. addukci hlasivek, a otáčením chrupavky štítné kolem kloubu S měnícím napětí hlasivek. Toto napětí bylo monitorováno polovodičovým snímačem síly F (Vaněk & Cibulka 1994). V rovině hlasivek byly k hrtanu připevněny elektrolotografické elektrody EGG.

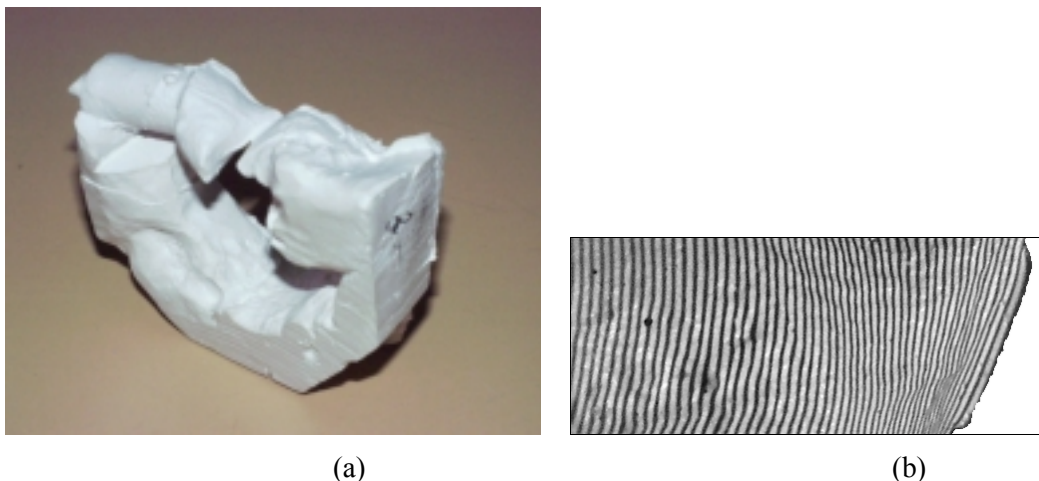


obr. 1 – Upevnění měřeného hrtanu

Schéma celého experimentu je ukázáno na obr. 2. Vzduch z tlakové nádoby byl přiváděn přes plovákový průtokoměr VM do uzavřené nádoby s horkou vodou kde se probubláváním zvyšila jeho



komponent (otiskovací růžová sádra, alabastrová, kamenná a supertvrdá sádra). Spodní a horní část odlitku byla z vnějšku hrtanu spojena přemostěním tak, aby obě části odlitku na sebe prostorově přesně navazovaly. Po ztuhnutí sádry byl odlitek zlomen, a obě části odlitku (horní a dolní) byly po vyjmutí z hrtanu opět k sobě přesně slepeny (viz obr. 3a). Sádrový odlitek byl pak otisknut do zalévací hmoty ADISIL typu silikonového polymeru a tím byla získána trvalá forma dlouhodobě uchovávací detaily povrchu. Získaná forma sloužila k odlití dalších sádrových kopií, popř. k přípravě odlitků z kovové směsi typu Woodova kovu. Jemná struktura otiskovací sádry umožňuje studovat nejen globální tvar hlasivkového prostoru při fonaci, ale jsou zde zachyceny i detaily na tkáňové úrovni jako je jizevnatění nebo drobné hypertrofie epitelu.



obr. 3 – a) sádrový odlitek hrtanu, b) projekce rastru na analyzovanou část

3. BIFURKAČNÍ JEVY

Typické výsledky měření bifurkačních jevů jsou znázorněny na obr. 4-6.

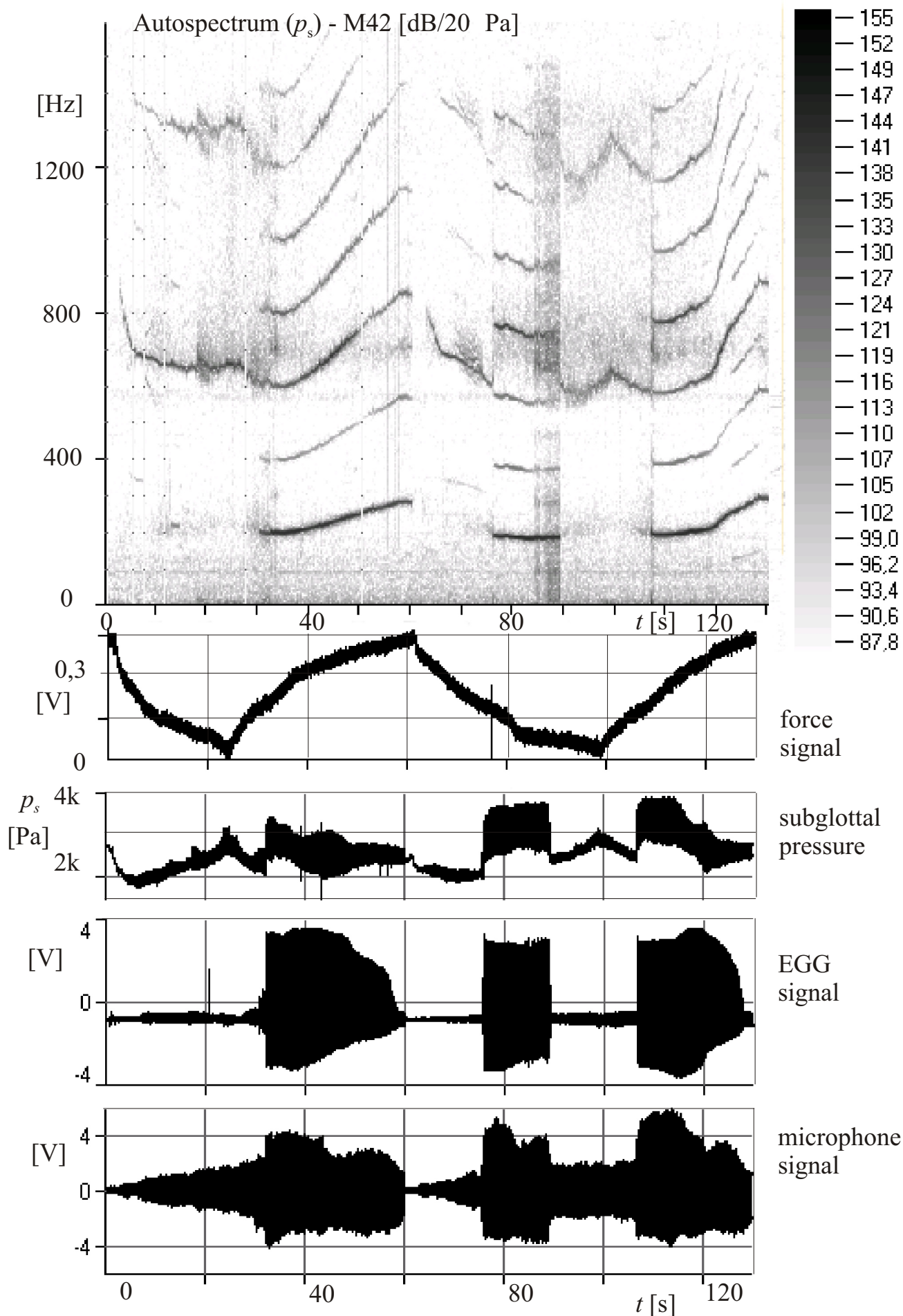
Na obr. 4 je uvedeno spektrum naměřeného subglotického tlaku spolu s časovými záznamy průběhů síly F napínající hlasivky, subglotického tlaku p_s , signálu EGG a zvuku z mikrofону v časovém rozsahu zhruba 0 až 130s při konstantním průtoku $Q=0.4$ l/s. Základní vlastní frekvence F_0 kmitání hlasivek nejprve s pozvolným uvolňováním předpětí hlasivek poklesla na hodnotu mezi 600-700 Hz. Při následném zvyšování napětí hlasivek došlo po cca 30 sekundách k prudkému přeskoku na druhý režim kmitání s podstatně nižší základní frekvencí $F_0 \approx 200-300$ Hz, která se s předpětím hlasivek postupně zvyšovala. Třetí způsob kmitání hlasivek se nachází v časových intervalech cca 85-90s a 125-130s, kde byla základní frekvence kmitání ještě zhruba poloviční ($F_0 \approx 100-150$ Hz). Poznamenejme, že tyto náhlé frekvenční přeskoky mezi jednotlivými režimy kmitání byly v podstatě stejně patrné na všech snímaných signálech (subglotický tlak, EGG, mikrofón, popř. laserový vibrometr).

Časové průběhy signálů pro 1. a 2. režim kmitání jsou znázorněny na obr. 5. Pro první režim kmitání jsou ($t \approx 25$ s) se tlakový a zvukový signál blíží harmonickým průběhům, přičemž signál EGG se nachází v oblasti šumu. Pro druhý režim kmitání ($t \approx 40$ s) mají všechny signály periodický průběh s podstatně vyššími amplitudami EGG a zvukového signálu.

Komplikovanější případy přeskoků mezi několika režimy kmitání jsou patrné z měření jiného hrtanu na obr. 6, kde lze nalézt 4-5 různých režimů kmitání hlasivek.

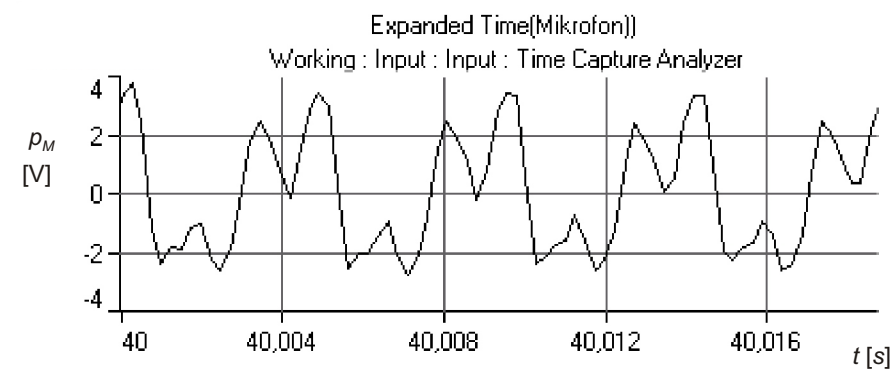
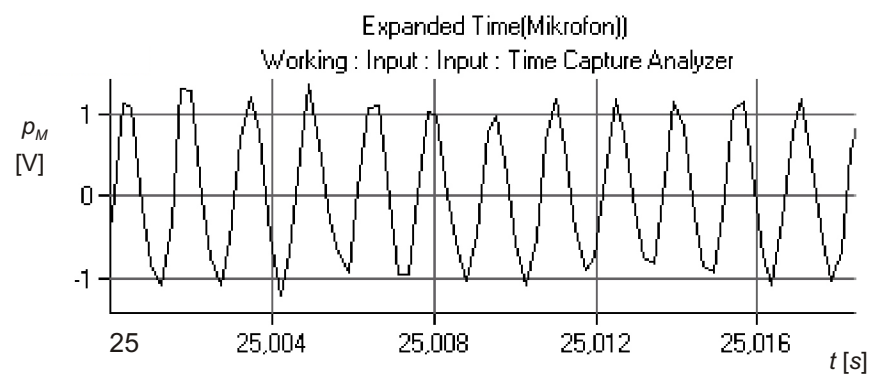
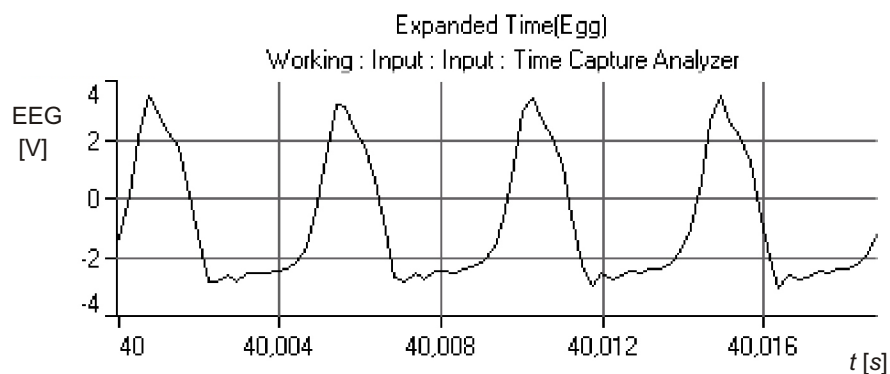
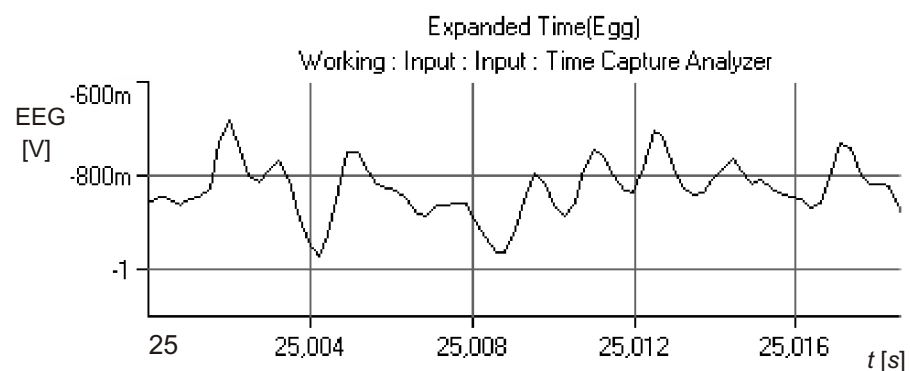
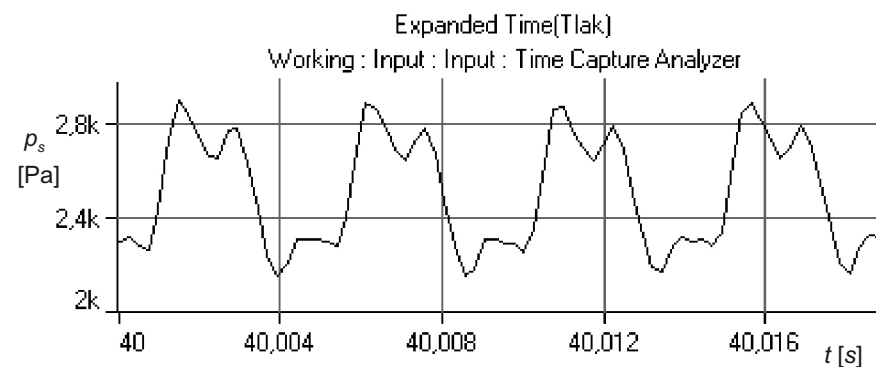
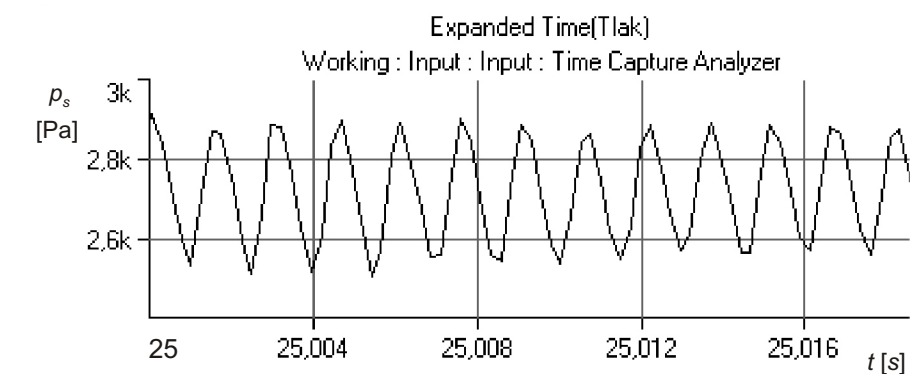
4. VYHODNOCENÍ TVARU HLASIVEK PŘI FONACI

V digitální formě vyjádřený tvar hlasivek při fonačním postavení byl např. vyhodnocen u sádrového odlitku hrtanu zobrazeného na obr. 3a. Tento odlitek byl pořízen pro základní frekvenci kmitání hlasivek $F_0=112$ Hz. K vyhodnocení tvaru povrchu hlasivky byla použita metoda optické



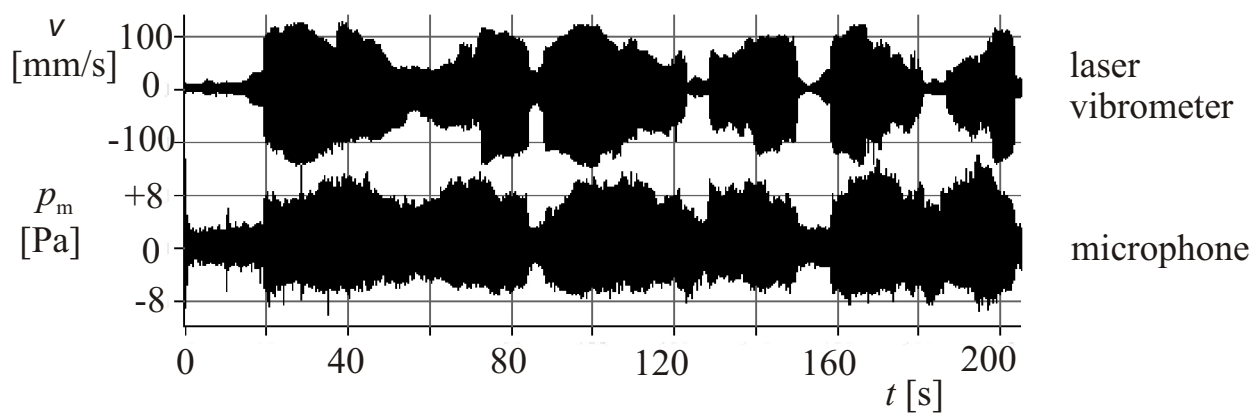
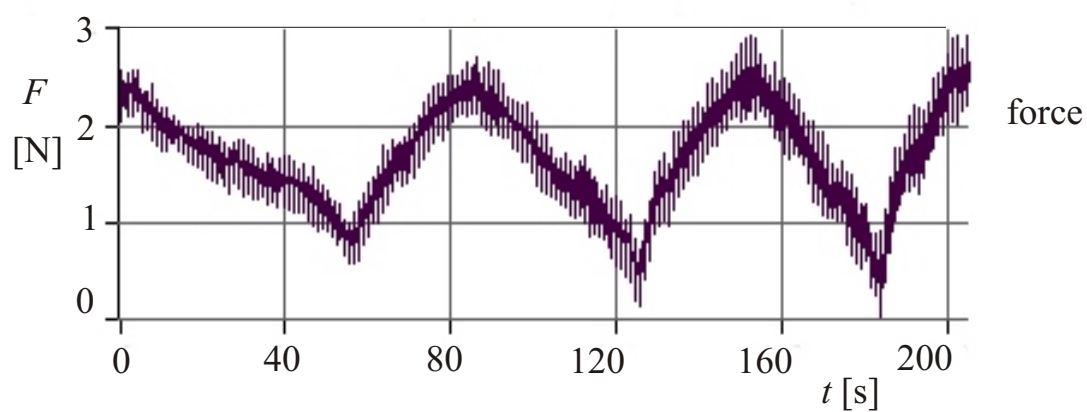
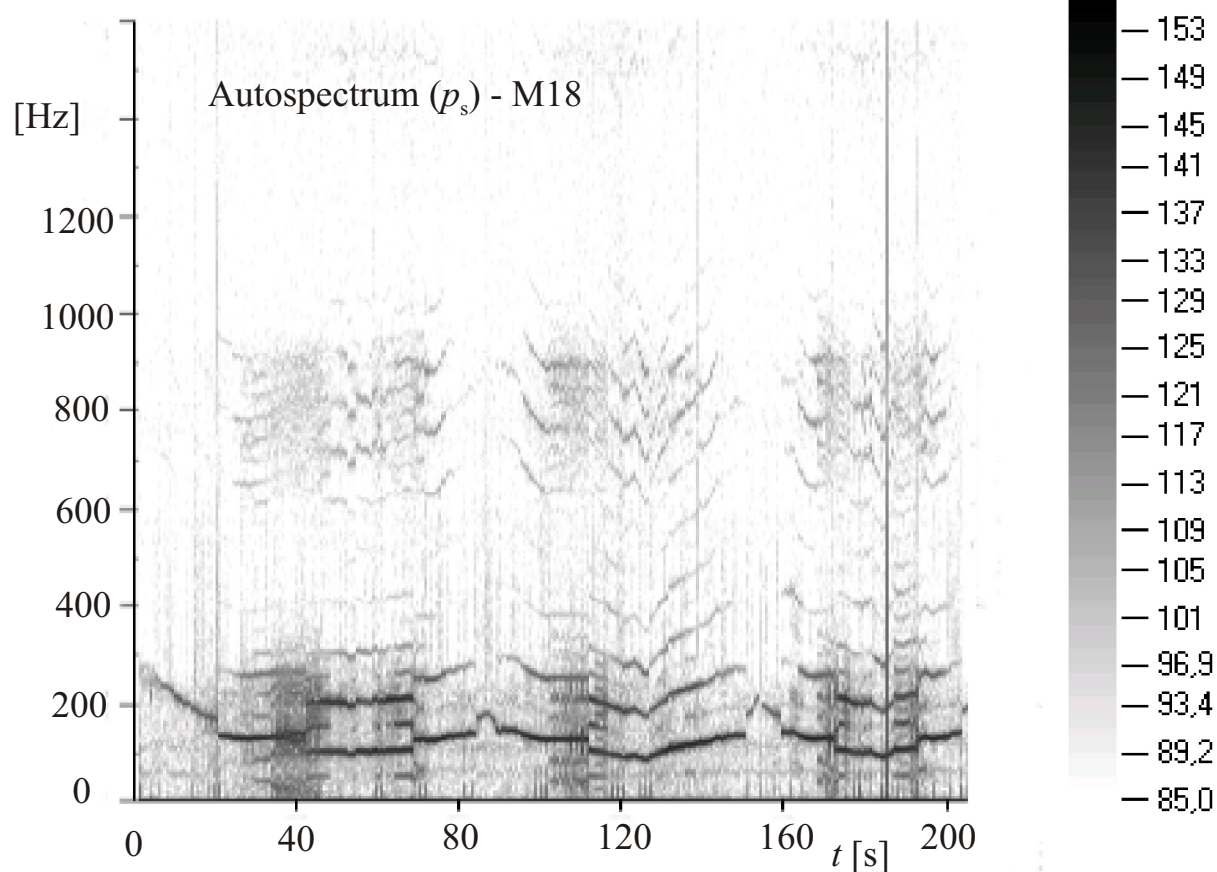
obr. 4 - Ukázka bifurkačních jevů se třemi hlavními reálnými kmitáními hlasivek

Measurement M 42 (Q=0,4 l/s; larynx 3)



obr. 5 -Časové průběhy subglotického tlaku, signálu EGG a akustického signálu z mikrofonu pro 2 různé re imy kmitání hlasivek

[dB/20,0u Pa]



obr. 6 - Slo itější bifurkační jevy

topografie promítaného čárového rastru s využitím FFT (Dambre a kol. 2000). Analyzována byla náběžná část hlasivky ve směru proudu vzduchu, a to v okolí hlasivkové štěrby (viz výřez na obr. 3b s promítnutým rastrem) v několika k ní kolmých řezech. Vyhodnocené výsledné tvary hlasivky se v těchto řezech blížily k lineárním průběhům.

5. ZÁVĚR

V předešlé studii (Švec a kol. 1999) autoři analyzovali výsledky podobných experimentů realizovaných Jw. van den Bergem (1968). Analýza ukázala, že frekvenční přeskoky mezi pěveckými hrudními a falzetovými rejstříky mohou nastat bez rychlé změny předpětí hlasivek. Tyto výsledky, velice důležité pro pochopení mechanismu řízení základní frekvence kmitání hlasivek i pro vysvětlení změny falzetového a hrudního rejstříku, byly našimi experimenty potvrzeny. Tyto experimenty byly vždy několikrát opakovány při měření celkem tří hrtanů. Kromě přeskoků mezi tzv. falzetovým a hrudním režimem kmitání hlasivek byly pozorovány i přeskoky do složitějších vibračních režimů, přičemž každý hrtan vykazoval režimy trochu odlišné. Výsledky potvrzují a blíže specifikují nelineární jevy vyskytující se při kmitání hlasivek.

Kromě toho byla vyvinuta speciální metodika pro zjišťování závislosti tvaru hlasivek na jejich fonačním postavení, což je velice důležité jak pro podrobnější studium struktury proudění vzduchu v okolí hlasivky, tak pro vytváření matematických modelů kmitající hlasivky v interakci se vzdušným proudem.

6. LITERATURA

- [1] Dambre D., Trnka J., Formánek P. (2000): Digitalization of the vocal fold shape using optical topography method. Výzkumná zpráva ÚT AV ČR č.Z 1295/00.
- [2] Fant, G. (1960). Acoustic theory of speech production. The Hague: Mouton.
- [3] Horáček, J., Švec, J. G., Veselý, J., Vilkman, E. (2000): Experimental Study of the Vocal-Fold Vibration in Excised Larynx: Measurement Set-up and Techniques. Seminář Interakce a zpětné vazby 2000, ÚT AV ČR, 28.-29. 11. 2000, pp. 27-34 (ISBN 80-85918-58-7).
- [4] Švec, J.G., Schutte, H.K., Miller, D.G. (1999): On Pitch Jumps Between Chest and Falsetto Registers in Voice: Data from Living and Excised Human Larynges. Journal of the Acoust. Soc. of America, 106(3): 1523-1531.
- [5] Švec, J.G., Horáček, J., Šram, F., Veselý, J. (2000a): Resonance Properties of the Vocal Folds: In Vivo Laryngoscopic Investigation of the Externally Excited Laryngeal Vibrations. Journal of the Acoust. Soc. of America, 108(4): 1397-1407.
- [6] Titze, IR. (1994). Principles of voice production. Englewood –Cliffs: Prentice-Hall.
- [7] Van den Berg, Jw. (1968): Sound productions in isolated human larynges. Annals New York Academy of Sciences, Vol. 155, Art. 1, 18-27.
- [8] Vaněk, F., and Cibulka, J. (1994): Křemíkové tenzometrické čidlo síly. In Proceedings of the Colloquium Dynamics of Machines '94, Prague, April 11–13, 1994, Institute of Thermomechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, pp. 97–100.
- [9] Vilkman, E. (1987): An apparatus for studying the role of the cricothyroid articulation in the voice production of excised human larynges. Folia phoniat. 39: 169-177.

This research has been supported by the project No 106/98/K019 of the Grant Agency of the Czech Republic and partially by the project MSM 1111 0000 5 . The authors are very grateful to our colleagues Ing. František Vaněk, CSc. and Mr. Jan Cibulka from the Institute of Thermomechanics for development of the special pressure and force transducers and for help during the measurement itself.