

## COMPUTATIONAL SIMULATION OF FORCED OSCILLATION OF THE VOCAL FOLDS IN 3D SPACE

K. Příkryl\*, V. Mišun\*

**Summary:** *In the article Mišun & Příkryl (2003) was described a new principle of vocal folds function. Principle has been preliminary called “compressed air bubbles”, in short “bubbles”. This paper focuses on this new functional model of generating loud vowels. In contrast to another authors this model uses only inertial mass and reverse forces of deformed folds. Bernoulli’s effect was not included. The space 3D finite elements model of the vocal folds has been used for verification of the compressed bubble principle. Excitation of the model is performed by subglottal pressure in relation to the glottis. Mathematical description of the loop of the subglottal pressure is state too, because it is for modelling fundamental.*

### 1. Úvod

Larynx je orgán, ve kterém se vytváří hlas. Jsou zde uloženy hlasivky. Vzduch přicházející tracheou způsobuje jejich periodické pohyby. Subglotický tlak je transformován na supraglotický a v důsledku teorie zdroje a filtru (Příkryl 2003) se mohou vybudit formanty jednotlivých samohlásek při mluvení nahlas. V literatuře (Titze 1994) je uvedeno několik modelů funkce hlasivek. Jsou to modely dvojhmotové, víchemotové, a také modely vytvořené pomocí metody konečných prvků. Mnozí autoři využívají k popisu funkce Bernoulliho efekt, který podle nich vytváří podtlak a tím způsobuje uzavírání hlasivek. V literatuře (Mišun 2003) bylo ukázáno na několik nedostatků této teorie. Z toho důvodu bylo přistoupeno k nové definici funkce hlasivek.

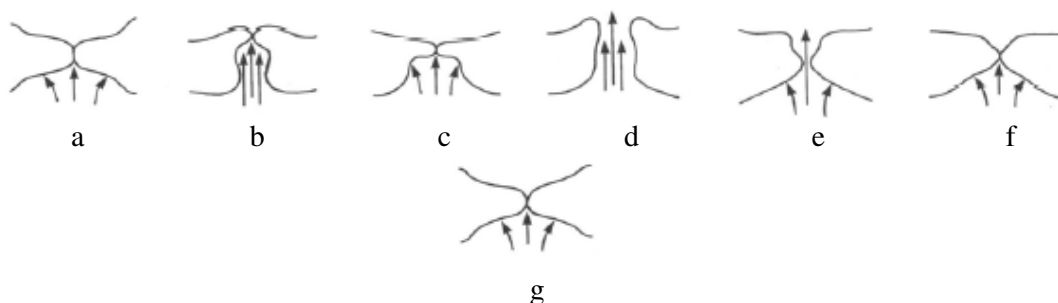
První fáze fonace je pohyb hlasivek směrem k sobě. Hlasivky se sevrou. Vznik jejich periodických pohybů je podmíněn subglotickým tlakem, který začne narůstat. Při jeho určité hodnotě se překoná sevření, hlasivky na spodní části se začnou otevírat a umožní pronikání vzduchu do supraglotické části vokálního traktu až se hlasivky otevřou úplně. Vytváří se bublina (malý objem vzduchu). V důsledku elastických sil se spodní část hlasivek začne zavírat až se hlasivky zavřou. Pohyb spodní a horní části hlasivek je v protifázi. Pohyby se cyklicky opakují. Vznikají periodické pohyby hlasivek. Důležitou podmínkou vzniku bubliny je to, že vzduch neexpanduje průběžně při průchodu přes glottis, ale najednou při největším subglotickém tlaku. Celý proces pohybu hlasivek je na obr. 1.

Pro modelování hrtanu a hlasivek byl zvolen prostorový model vytvořený pomocí metody

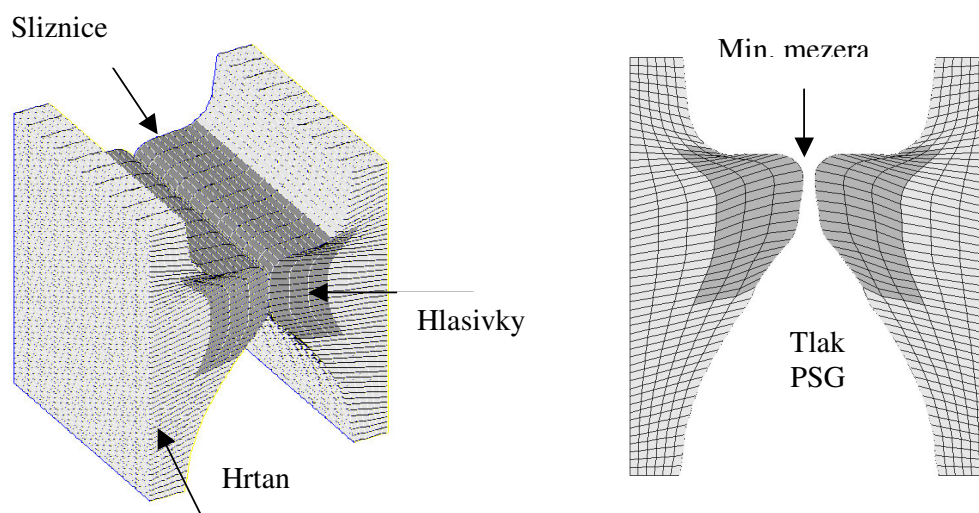
---

\*Doc. Ing. Karel Příkryl, CSc., Doc. Ing. Vojtěch Mišun, CSc.; VUT Brno, FSI, Ústav mechaniky, mechatroniky a biomechaniky, Technická 2, 616 69 Brno, tel.: +420 541142861; e-mail: [prikryl@umt.fme.vutbr.cz](mailto:prikryl@umt.fme.vutbr.cz)

konečných elementů viz obr. 2. Model byl vytvořen na základě rovinného modelu podle literatury (Přikryl 2001). Pohon hlasivek se děje pomocí definované smyčky subglotického tlaku v závislosti na minimální mezeře mezi hlasivkami podle obr. 2.



Obrázek 1. Fáze otevírání a zavírání hlasivek



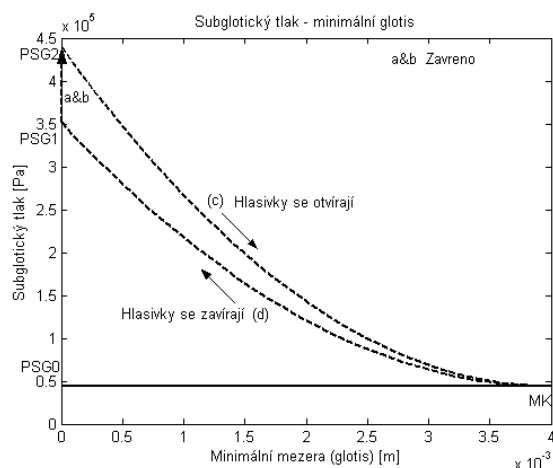
Obrázek 2. Výpočtový model hlasivek a příčný řez s definovanou minimální mezerou

Protože se jedná o ověření teorie vzniku bublin a modelování pohybu hlasivek podle obr. 1, nebyl kladen důraz na reálné materiálové konstanty, které ani nejsou přesně definované, nebo mají velký rozptyl (Přikryl 2003). Použité materiálové konstanty jsou podobně jako v (Přikryl & Mišun 2001) pro hlasivky  $E_1 = \text{Yongův modul} = 1,5 \text{ MPa}$ , pro hrtan  $E_2 = 3,0 \text{ MPa}$ , hustota  $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ . Model má 31 166 uzlů a 8 480 prostorových elementů. Sliznice je modelována kontaktními elementy, což má ten význam, že hlasivky ve styku se nepronikají a opravdu se deformují.

## 2. Definice funkce hlasivek

Pohon hlasivek je modelován na základě předpokladu vzniku „bublin vzduchu“ jak bylo zmíněno v úvodu. Za tím účelem byla definována smyčka subglotického tlaku podle obr. 3, který je funkcí minimální mezery mezi hlasivkami. Na smyčce jsou významné úseky. Úsek

(a) & (b), hlasivky jsou zavřené, úsek (c), hlasivky se otvírají a tlak klesá, úsek (d), hlasivky se zavírají a tlak stoupá. Dále je uvedena rovnice pro větev (c) a rovnice pro větev (d).



větev (c):

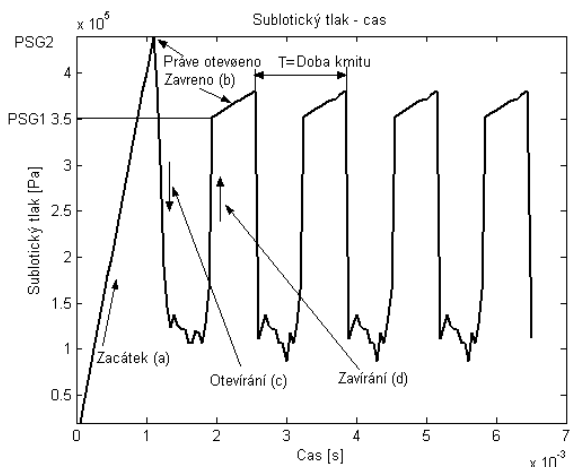
$$p_{sg} = (m - m_k)^2 \frac{p_{sg2} - p_{sg0}}{m_k^2} + p_{sg0}$$

větev (d):

$$p_{sg} = (m - m_k)^2 \frac{p_{sg1} - p_{sg0}}{m_k^2} + p_{sg0}$$

Obrázek 3. Definice pohonu hlasivek pomocí subglotického tlaku a minimální mezery

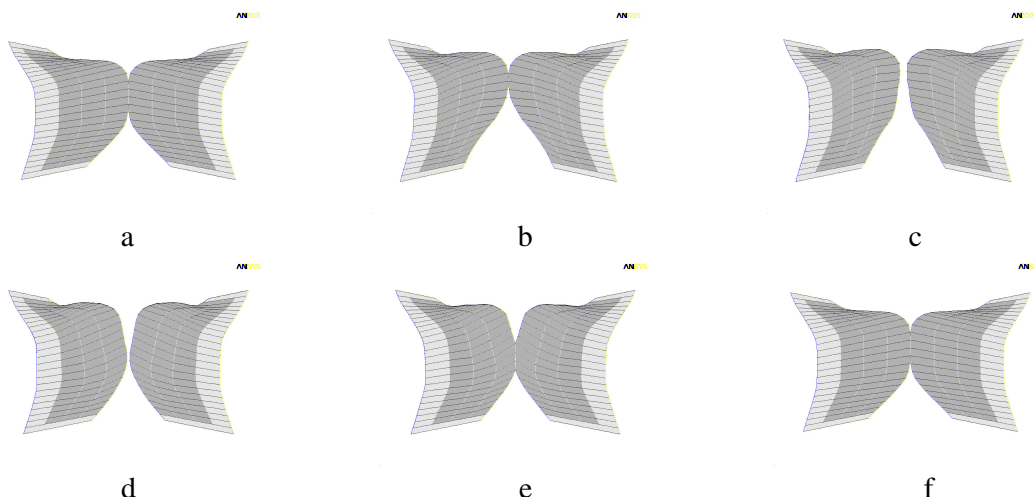
kde znamená  $p_{sg}$  subglotický tlak,  $m$  aktuální mezera  $m_k$   $m_{kmax}$ , předpokládaná mezera,  $p_{sg0}$  počáteční tlak,  $p_{sg2}$  právě otevřeno po startu  $p_{sg1}$  znovu zavřeno po zavření hlasivek. Průběh tlaků v závislosti na čase je na obr. 4. Protože je známá doba integračního kroku, je možné na



základě jejich počtů stanovit dobu kmitu hlasivek. V tomto případě to činí  $T=0.013$  s. Na obr. 5. jsou vypočítané tvary pohybujících se hlasivek, které jsou podobné předpokládaným podle obr. 1. Z obr. 4. je vidět, že k prvnímu otevření hlasivek je nutná větší síla, než k opakovaným otevíráním. Aby byl model dokonalejší, je nutno ho ladit tak, aby  $p_{sg2}$  bylo po celou dobu stejné.

Obrázek 4. Průběh subglotického tlaku v závislosti na čase

Z průběhů grafu na obr. 4 můžeme soudit, že při otvírání hlasivek tlak klesá a při zavírání hlasivek tlak vzrůstá. Prvotní sevření modelu hlasivek simuluje předpětí, které vzniká při první fonační fázi. K výpočtu byla použita přechodová analýza programového souboru ANSYS. Výpočtem vychází  $p_{sg0}=44$  KPa,  $p_{sg1}=352$  KPa,  $p_{sg2}=440$  KPa. Na obr. 5 je uveden soubor výsledků výpočtového modelování pohybu hlasivek na základě uvedeného principu „bubliny“.



Obrázek 5. Vypočítané fáze otevírání a zavírání hlasivek na modelu hrtanu s hlasivkami

### 3. Zhodnocení modelu

Podle obr. 5. je zřejmé, že vymodelované fáze otevírání a zavírání prostorového modelu jsou věrné ve srovnání s předpokladem podle obr. 1. Vysvětlení funkce hlasivek podle teorie „bublíny“ se tak potvrdilo. Řídící smyčka subglotického tlaku podle obr. 3 je předmětem dalšího zkoumání.

### 4. Poděkování

Tato práce vznikla za laskavé podpory výzkumného záměru Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy : MSM 262100001, Výpočtové a fyzikální modelování problémů inženýrské termofluidní mechaniky, mechaniky těles a fázových přeměn.

### 5. Literatura

- Mišun, V.& Příkryl K. (2003) New principle of the vocal folds function. Proc. ,6<sup>th</sup> International Conference Advances in Quantitative Laryngology, Voice and Speech Research April 3 – 5, 2003, Hamburg, Germany
- Příkryl K. (2003) Příspěvek k prostorovému modelu hlasivek, Proc. Interaction and Feedbacks 2003, Inst.of temomechanics AS CR , November 25-26, 2003 Praha.
- Příkryl K. (2003) Modelling of the creation of czech vowels by means of the vocal folds model and the models of vocal tracts. Proc. 3rd International workshop, Models and analysis of vocal emissions for biomedical applications, December 10-12, 2003, Firenze, Italy
- Příkryl, K.& Misun, V. (2001) Phonation simulation of 2D vocal folds model using the FEM. Proc. of 3rd Inter.Conf. Mechanics, Robotics and Biomechanics, Trest, 2001, Czech republic
- Titze, I.R. (1994) *Principles of voice production*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1994
- Thomson S.L., Mongeau L. & Frankei S.H. (2003) Physical and numerical flow-excited vocal fold models. Proc. 3rd International workshop, Models and analysis of vocal emissions for biomedical applications, December 10-12, 2003, Firenze, Ital