

## MODELING OF VOCAL FOLDS FUNCTION IN 2D

V. Hruža\*

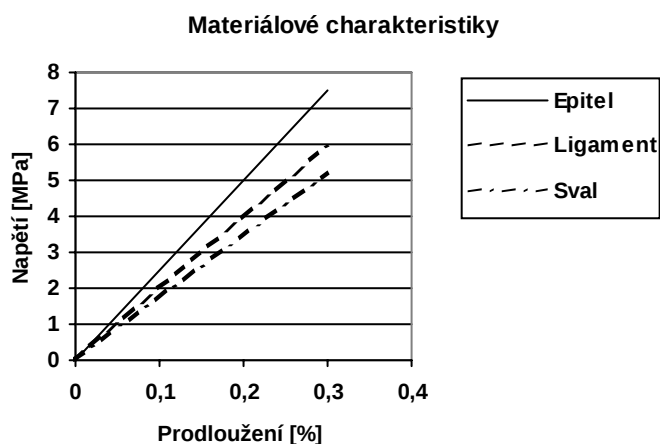
**Summary:** During fonation the vocal folds are excited by air flow. This air is portioned by vocal folds into separated air bubbles. These are the cause of the source voice. It is obvious, that we must model fluid-structure interaction. Actual models comes from air flow hypothesis, and the influence of Bernoulli's effect. Next thing is, that as agitated medium is mostly used incompressible fluid. The idea of this new model is to model function of vocal folds as full fluid-structure interaction. As agitated medium is used compressible air with laminar flow option. Simulacion was computed by FEM program Ansys 8.1.

### 1. Úvod

Článek se zabývá problémem modelování pohybu hlasivek, kde buzení hlasivek je realizováno tlakem vzduchu působícího na hlasivky. Cílem tohoto modelu je vytvořit výpočet, kterým by šlo modelovat pohyb hlasivek spojený s prouděním vzduchu budícího hlasivky. Celý výpočet je realizován v programu ANSYS/Structural a ANSYS/FLOTRAN

### 2. Model

Model sestává ze dvou prostředí, a to prostředí strukturního a prostředí fluidu. Ve strukturním prostředí jsou zahrnuty samotné hlasivky, které se skládají ze tří vrstev: epitelu, ligamentu a svalu.



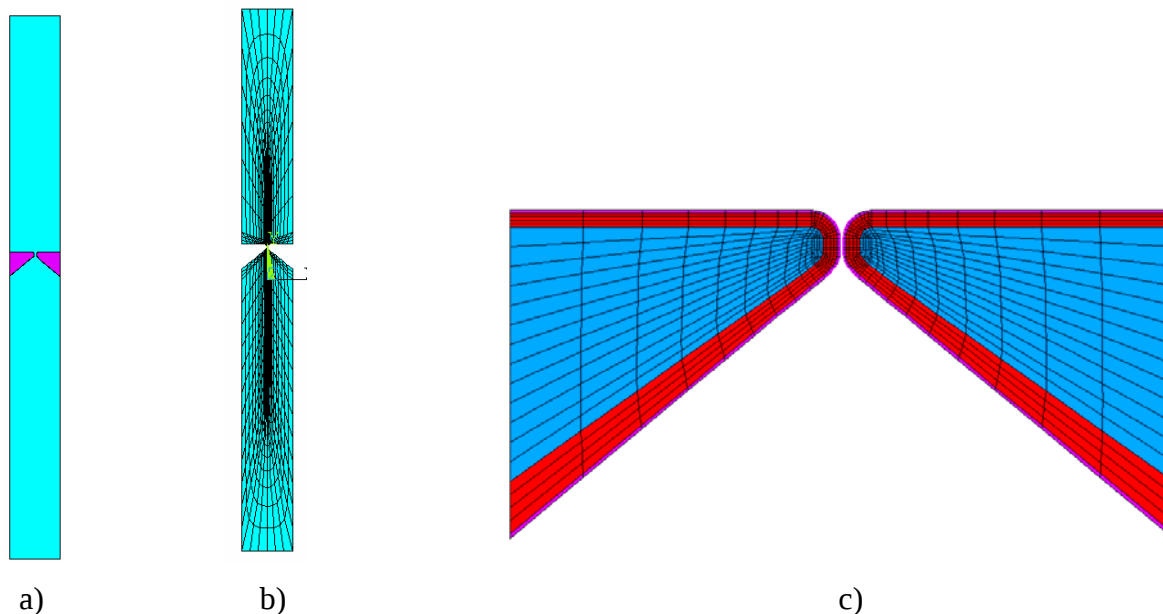
Obr. 1. Materiálové charakteristiky

s svalu. Každá z vrstev je modelována s jiným modulem pružnosti, kde se při určení těchto modulů vychází z knihy Titze (1993), přičemž samotné materiálové charakteristiky se berou jako lineární. Dále bylo potřeba na styku hlasivek použít kontaktní elementy, aby bylo možno modelovat zavírání hlasivek.

Fluidní prostředí modeluje část kavity pod, mezi a nad hlasivkami. Jako materiál je použit stlačitelný vzduch a při výpočtu je uvažováno laminární proudění. Geometrie

\* Ing. Václav Hruža: ÚMTMB FSI VUT Brno, Technická 2, 61669 Brno; yhruza01@stud.fme.vutbr.cz

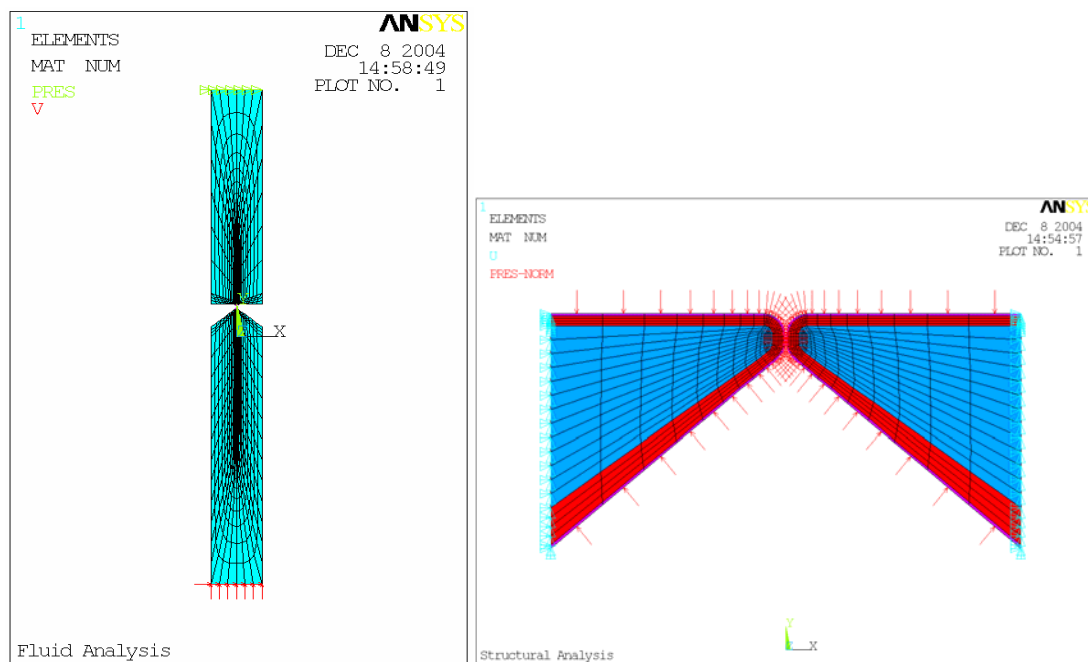
modelu vzduchu se mění v závislosti na pohybech hlasivky, a tudíž je potřeba v průběhu výpočtu měnit tvar elementů fluidu.



Obr. 2. a) Model hlasivky+vzduch, b) model vzduchu, c) model hlasivek s barevně odlišenými vrstvami

### 3. Okrajové podmínky

Struktury: na okrajích hlasivek jsou dány posuvy, kterými jsou hlasivky tlačeny k sobě čímž dostaneme určité předpětí potřebné pro správnou funkci hlasivek. Dále jsou hlasivky zatíženy tlakem z předchozí fluidní analýzy.



a) b)  
Obr. 3. Okrajové podmínky: a) vzduchu; b) hlasivek

Fluidu: Model fluidu je zásobován vzduchem z okrajové podmínky, kdy je do prostoru pod hlasivkami přiváděn vzduch zadanou konstantní rychlostí. Naopak odchod vzduchu je modelován z prostoru nad hlasivkami, kde je uvažován výstup vzduchu do volného prostředí. Boční stěny kavity včetně hranice s hlasivkami jsou uvažovány jako nepropustné.

U strukturního prostředí dochází ke kontaktu jednotlivých částí hlasivky, a tudíž je potřeba zde zavést kontaktní prvky na styku hlasivek. V případě ANSYSu aby bylo možno modelovat symetrii kontaktu je potřeba tento kontakt namodelovat pomocí dvou kontaktních párů.

#### 4. Výpočet

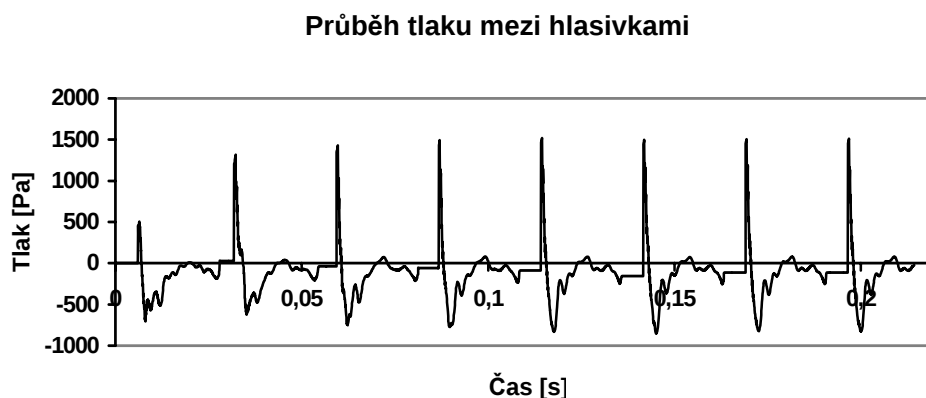
Samotný výpočet sestává ze tří částí:

- Výpočet fluidního prostředí za účelem zjištění tlaků působících na hlasivky
- Strukturní výpočet, kdy se řeší model hlasivek zatížený posuvy okrajů a tlaky v nodech společných s modelem vzduchu
- Přepočet konečnoprvkové sítě fluidního prostředí zachycující geometrické změny hlasivek

Celý výpočet je prováděn pomocí makra v ANSYSu, neboť jednotlivé přechody mezi strukturním a fluidním výpočtem jsou řešeny pomocí proměnného prostředí. Tento výpočet je potřeba provádět s poměrně malým časovým krokem, řádově v  $10^{-4}$ s, aby bylo možno detailně zachytit kmitání hlasivek a proudění vzduchu.

#### 5. Výsledky výpočtu

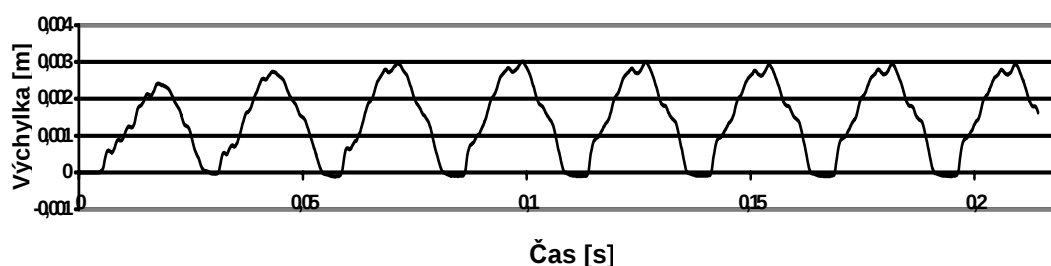
Výpočet bylo nutno provádět v poměrně dlouhém časovém intervalu, neboť na začátku kmitání hlasivek musí být překonána přechodná část kmitání způsobená otevíráním hlasivek z klidu. Přičemž přechodová část se vyskytuje jak u kmitání hlasivek, tak u kmitání vzduchu. Celkový časový úsek počítaný tímto výpočtem je tedy přibližně 0,25s, což je přibližně 2000 kroků výpočtu.



Obr. 4. Průběh tlaku mezi hlasivkami

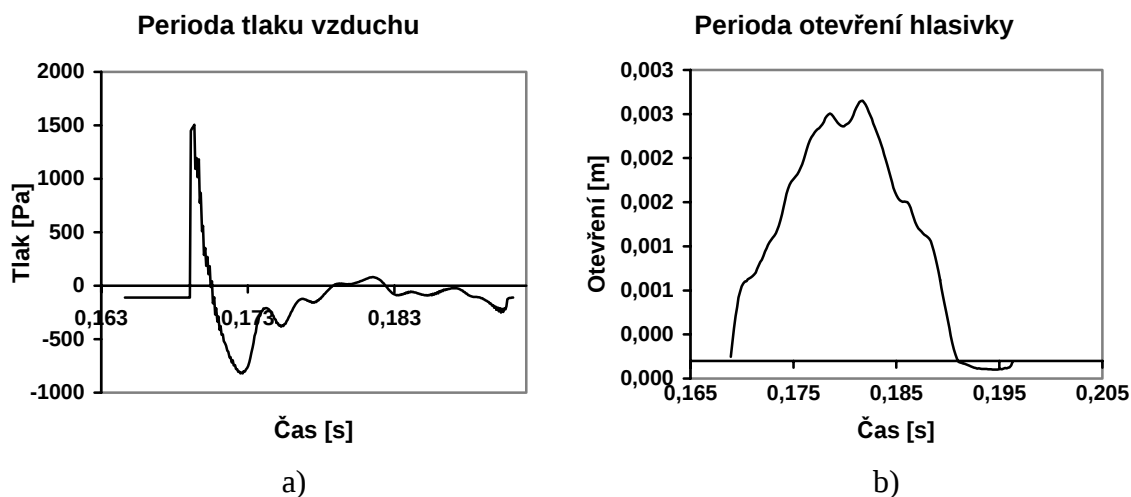
V obou případech, jak tlaku vzduchu mezi hlasivkami, tak v případě rozevírání hlasivkové štěrbinu vidíme, že tyto průběhy jsou periodické, kde maximum tlaku se vyskytuje zhruba při 1500 Pa, což je sice více než jaký je tlak vyvinutý plicemi při běžné mluvě (1kPa z Titze

(1993)), nicméně tato záležitost je otázkou modelu, který je možné libovolně obměňovat a po odladění postupu výpočtu se s ním bude dále pracovat.



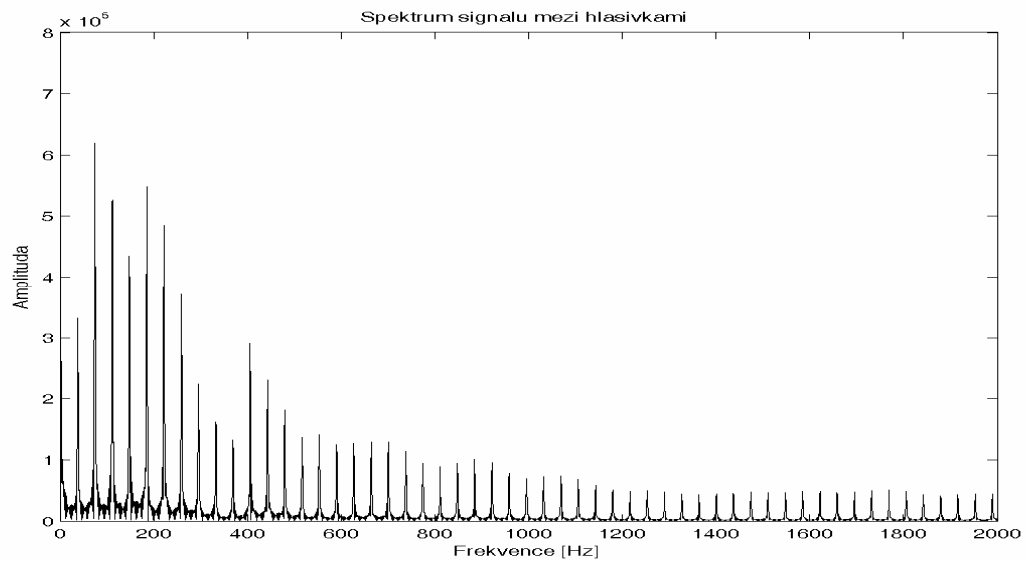
Obr. 5. Časový průběh otevření hlasivkové mezery

Z těchto jednotlivých průběhů si můžeme zobrazit jak detail periody kmitání hlasivek, tak detail periody kmitání vzduchu mezi hlasivkami:



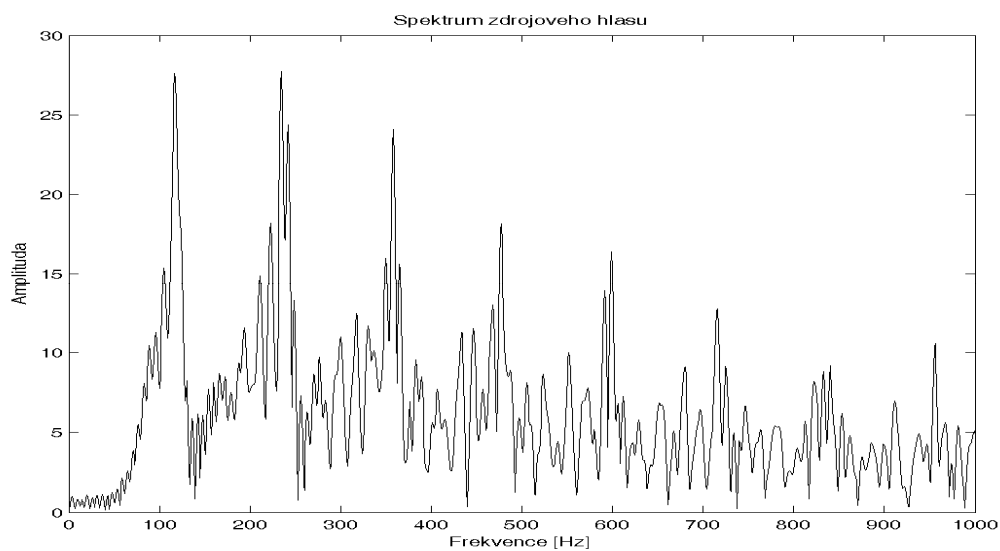
Obr. 6. Graf periody: a) tlaku mezi hlasivkami; b) otevírání hlasivkové mezery

Analýzou frekvenčních spekter časového průběhu tlaku mezi hlasivkami, vytvořených pomocí programu MATLAB, vidíme že základní frekvence počítaného modelu hlasivek je 40Hz, dále pak vidíme, že spektrum obsahuje harmonické složky, stejně jako je obsahuje lidský hlas. Při pohledu na spektra signálu jsou patrné určité frekvenční vrcholy, které jsou způsobeny rezonančními frekvencemi kavit nad a pod hlasivkami. Tato frekvence je poměrně nízká, ale jak už bylo řečeno u hodnot tlaku, je to otázka pouze modelu a nikoliv výpočtu



Obr. 7. Frekvenční spektrum tlaku mezi hlasivkami

Podíváme-li se na frekvenční spektrum signálu tlaku odečteného mezi hlasivkami obr.7, pak vidíme, že se blíží zdrojovému hlasu lidí při mluvení nahlas, obr.8. Jak můžeme vidět, tak obě spektra obsahují vyšší harmonické složky základní frekvence.



Obr. 8. Zdrojový hlas člověka [2]

## 6. Závěr

Ze srovnání spektra naměřeného lidského zdrojového hlasu a spektra vypočítaného signálu vidíme, že počítaný model chování hlasivky a vzduchu jimi procházejícího dává výsledky, které lze srovnávat s vlastnostmi reálných hlasivek. Nízká frekvence kmitání počítaných hlasivek je dána skutečností, že na rozdíl od skutečných hlasivek nejsou namodelované hlasivky předepjaty. Toto bude snaha vyřešit v dalším modelu, ve kterém bude možno zadávat různé předpětí hlasivek, čímž bychom měli dosáhnout zvýšení základní frekvence zdrojového hlasu. Při další analýze bude zajisté možno vyhodnocovat reakční síly při dotyku hlasivek a rozložení napětí při styku hlasivek v jednotlivých vrstvách.

## 7. Literatura

- [1] Ingo R. Titze: Principles of Voice Production, Prentice Hall, 1993
- [2] [http://www.phon.ox.ac.uk/~jcoleman/source\\_filter.htm](http://www.phon.ox.ac.uk/~jcoleman/source_filter.htm)
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [4] <http://www.ncvs.org/ncvs/tutorials/voiceprod/tutorial/model.html>