

MODELING OF VOCAL FOLDS FUNCTION USING FEM II.

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. This paper deals with increasing of fluid velocity and thus pressure of the air under the vocal folds. Simulation was computed by FEM program Ansys 8.1.*

1. Úvod

Práce se zabývá modelováním funkce hlasivek s využitím metody konečných prvků. V modelování je zahrnut jak výpočet samotné struktury hlasivek, tak i výpočet vzduchu, který budí pohyby hlasivek. Modelování funkce hlasivek tímto způsobem lépe popisuje skutečnost, než modely dosud vyvinuté. Simulace je prováděna pomocí programu Ansys 8.1.

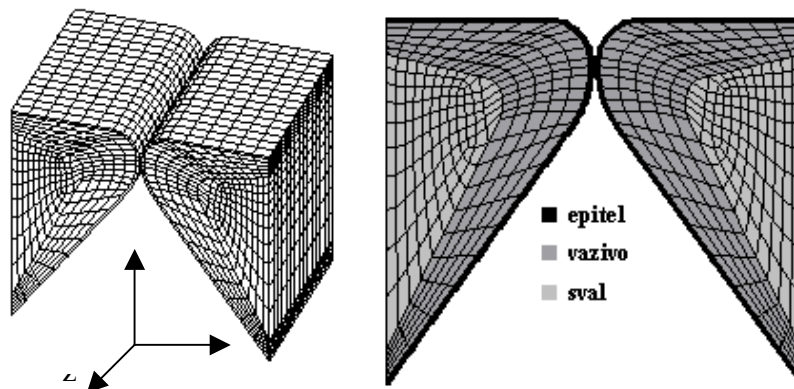
V tomto článku jsou prezentovány výsledky výpočtů, kdy byla zvyšována rychlost vzduchu přicházejícího do prostoru pod hlasivkami, a tudíž se zvyšuje tlak působící na hlasivky.

2. Model

Model hlasivek je vypracován jako symetrický s namodelováním tří vrstev – epitelu, vaziva a svalu obr. 1. Tyto vrstvy se liší použitým modulem pružnosti, který byl uvažován u epitelu 10 kPa, vaziva 7 kPa a u svalu 20 kPa. Modul pružnosti je u svalu záměrně volen větší než u epitelu, aby se při natažení hlasivek projevilo, že při fonaci má TA sval výrazně vyšší tuhost díky aktivnímu napětí tohoto svalu. Pro jednoduchost výpočtu je zatím uvažován lineární izotropní materiál. Materiál hlasivek je uvažován jako takřka nestlačitelný, $\eta=0,49$, hustota všech tří tkání je dána $\rho=1040 \text{ kg/m}^3$ (Titze ,1994)(Golombeck ,1999). Hlasivky jsou modelovány pomocí elementu solid185, který umožňuje modelovat hyperelastický materiál a velké deformace. Kontakt hlasivek je realizován pomocí symetrického kontaktního páru, modelovaného prvky conta174 a target170. Rozměrově je model dimenzován podobně jako skutečné hlasivky, na výšku má model 0,018m, na šířku 0,01m a na délku má počítaný model hlasivek 0,015m.

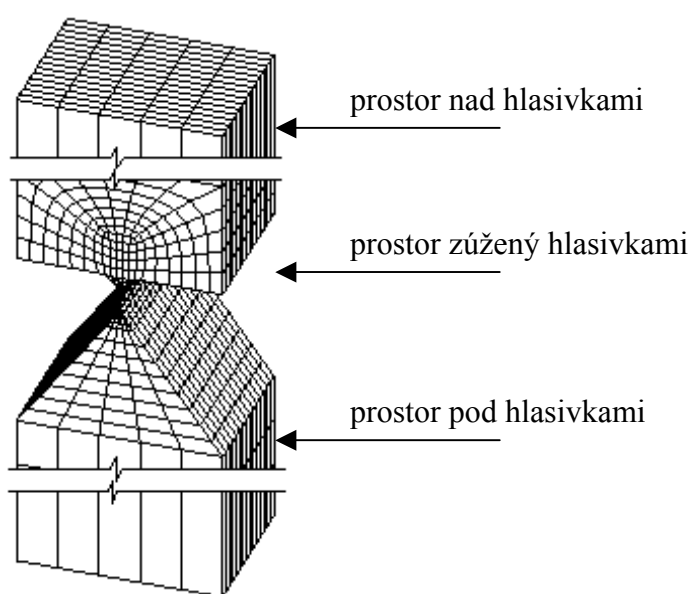
* Ing. Václav Hruža: Ústav mechaniky, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2896/2; 616 69 Brno; tel.: +420541142804; e-mail: yhruza01@stud.fime.vutbr.cz

Model vzduchu sestává ze dvou hlavních částí. Části nad hlasivkami, která nahrazuje supraglotický prostor a části pod hlasivkami, čímž se modeluje subglotický prostor. Další důležitá část, kterou musíme brát v potaz, je část vzduchu mezi hlasivkami, kde dochází k zavírání hlasivek a tudíž k úplnému vytlačení vzduchu. Model vzduchu jak pod hlasivkami, tak nad hlasivkami má délku (osa z) 250mm a půdorysně opisuje model hlasivek. Tento

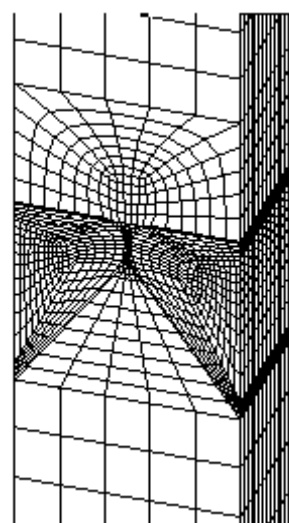


Obr. 1. Třívrstvý model hlasivek

prostor je modelován pomocí prvků Fluid142, což jsou prvky umožňující modelovat proudění a tlaky vzduchu. Jako materiál je uvažován stlačitelný vzduch, a počítá se s přednastaveným materiálem výpočetního systému Ansys Inc./FLOTTRAN. Hustota i viskozita je brána jako proměnná. Pro snadnější přenos zatížení – okrajových podmínek mezi vzduchovým a strukturním prostředím má model hlasivek a model vzduchu společné krajní nody.



Obr. 2. Model vzduchu



Obr. 3. Hlasivky zasazené do vzduchu

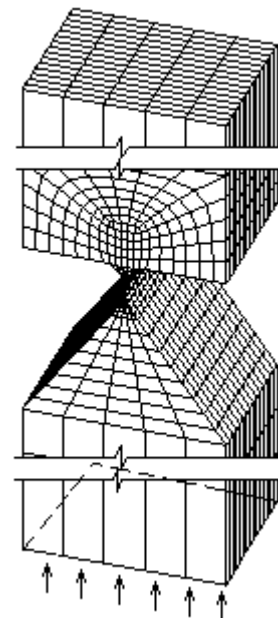
Celkový model obr.3 je uveden jen pro ilustraci, při vlastním výpočtu jsou vždy strukturní a vzduchová složka modelu odděleny.

3. Výpočet

Samotný výpočet je rozdělen do několika kroků. Na začátku jsou realizovány výpočty, které mají statický charakter, což je natažení a jemné přitlačení hlasivek. Po těchto krocích následuje výpočet dynamických dějů, což je otevírání hlasivek a proudění vzduchu. Výpočet je proveden jako interakce struktura-vzduch, kdy výsledky z jednoho prostředí slouží jako zatížení, nebo změna geometrie u druhého prostředí. Algoritmus výpočtu je podrobně popsán v Hruža (2006). Tento příspěvek je zaměřen na vliv rostoucího přísunu vzduchu pod hlasivky, což je řešeno vzrůstající rychlostí vzduchu přiváděného do vzduchové dutiny pod hlasivkami. Změna rychlosti je počítána pro 4 varianty: 0,110m/s, 0,115m/s, 0,120m/s a 0,125m/s.

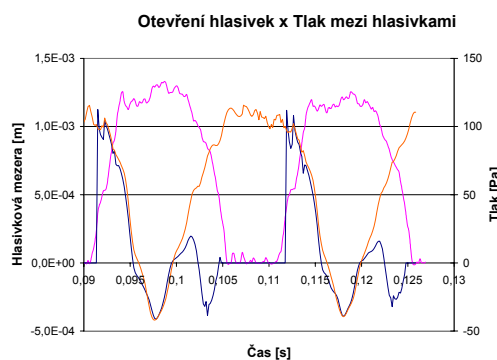
4. Výsledky

Nejprve se podíváme na výsledky při konstantní rychlosti proudění vzduchu. Na obr. 5 vidíme otevírání hlasivek a zároveň je v tomto grafu ukázáno, jak se mění tlak v místě otevírání hlasivek a jak narůstá tlak pod hlasivkami. Zde vidíme, že na začátku rozevírání hlasivek prudce naroste tlak – respektive se mezi hlasivky dostane vzduch o tlaku stejném jako je pod hlasivkami. Prudké otevření hlasivek způsobí prudký pokles tlaku vzduchu, který je způsoben únikem vzduchu do nadhlasivkového prostoru. Po určité době se pokles zastaví díky dodávce dalšího vzduchu z podhlasivkového prostoru. V době, kdy dochází k zavírání hlasivek pružnostními charakteristikami hlasivek, které jsou podporovány záporným tlakem působícím na hlasivky, už dochází k nárůstu tlaku v podhlasivkovém prostoru. Do určité hodnoty zavření hlasivek roste i tlak mezi hlasivkami, ovšem když jsou hlasivky z 1/4 zavřeny, dochází k prudkému poklesu mezihlasivkového tlaku, přestože podhlasivkový tlak stále narůstá. Rozdíl mezi podhlasivkovým tlakem a tlakem mezi hlasivkami je pozorovatelný již v době, kdy se tlak dostane nad nulovou hodnotu. Interval od tohoto času, do času uzavření hlasivek by se dal popsat jako doba, ve které svádí boj podhlasivkový tlak a Bernoulliho efekt o větší vliv na mezihlasivkový tlak.

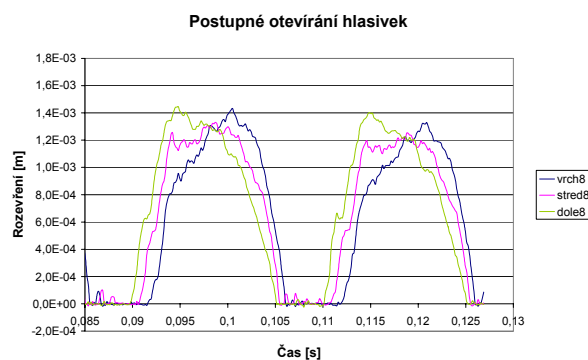


plocha zatížená rychlostí

Obr. 4. Zatížení modelu vzduchu

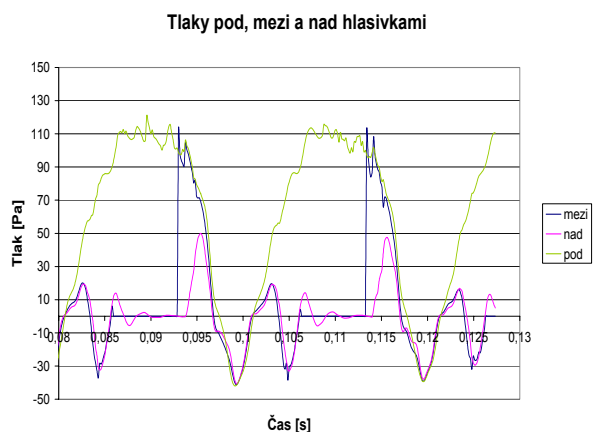


Obr. 5. Otevření hlasivek a tlak mezi hlasivkami



Obr. 6. Rozevírání hlasivek

Na obr. 6 vidíme postupné otevírání hlasivek, kdy nejdřív se začne otevírat spodní část hlasivek, poté střed a naposledy se otevře horní část hlasivek. Ve stejném pořadí je to i při zavírání hlasivek. Zde si můžeme všimnout, že střední část hlasivek je při plném otevření takřka v klidu, zatímco spodní okraj hlasivek se po plném otevření začne pomalu zavírat a horní kraj hlasivek se pozvolna otevírá.

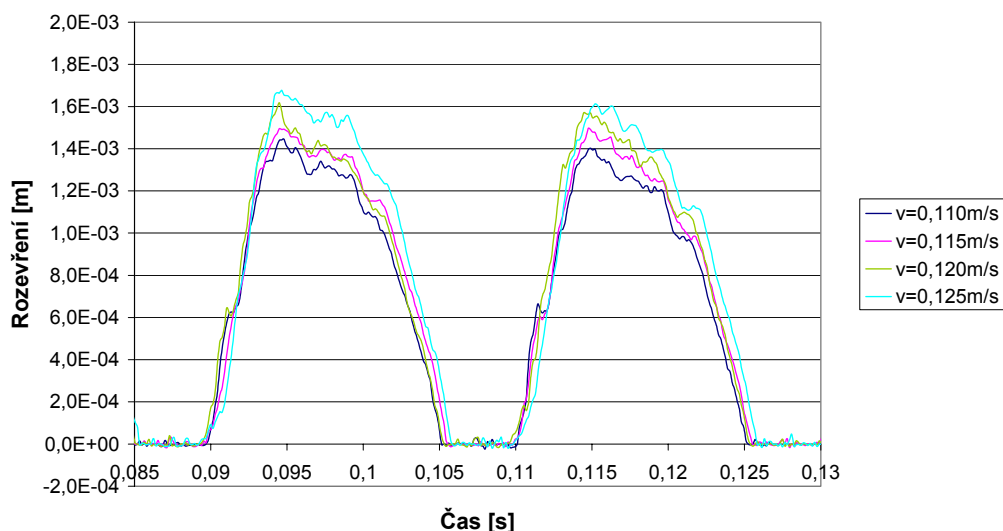


Obr. 7. Tlaky vzduchu

Pro úplnost zde ještě uvádím obr. 7, na kterém vidíme jak přechází tlak přes hlasivky, tedy tlak z pod, mezi a nad hlasivkového prostoru. Zde opět vidíme, jak mezihlasivkový tlak po otevření hlasivek v podstatě kopíruje tlak pod hlasivkami, dále pak vidíme postupný nárůst tlaku nad hlasivkami na hodnotu mezihlasivkového tlaku. Tyto dva tlaky mají stejný průběh do uzavření hlasivek, kdy je z prostoru mezi hlasivkami vytlačen veškerý vzduch. Po zavření hlasivek ještě tlak nad hlasivkami dvakrát zakmitne, než se těsně před dalším otevřením hlasivek úplně uklidní.

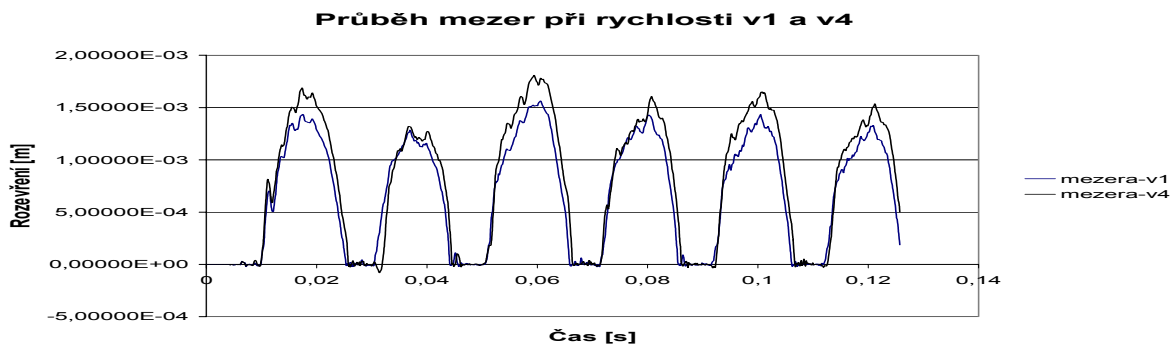
Dále se budeme zabývat vlivem zvyšujícího se přísunu vzduchu pod hlasivky, neboli zvyšováním rychlosti, se kterou je vzduch přiváděn do prostoru pod hlasivkami. Na obr. 8 vidíme výsledky ze strukturálního výpočtu, což je výpočet pohybu hlasivek. Jsou zde znázorněny mezihlasivkové štěrby na spodním okraji kontaktu hlasivek pro zvyšující se rychlost vzduchu. Podle očekávání dochází s růstem rychlosti k nárůstu velikosti mezery.

Rozevření hlasivek na spodním okraji kontaktu

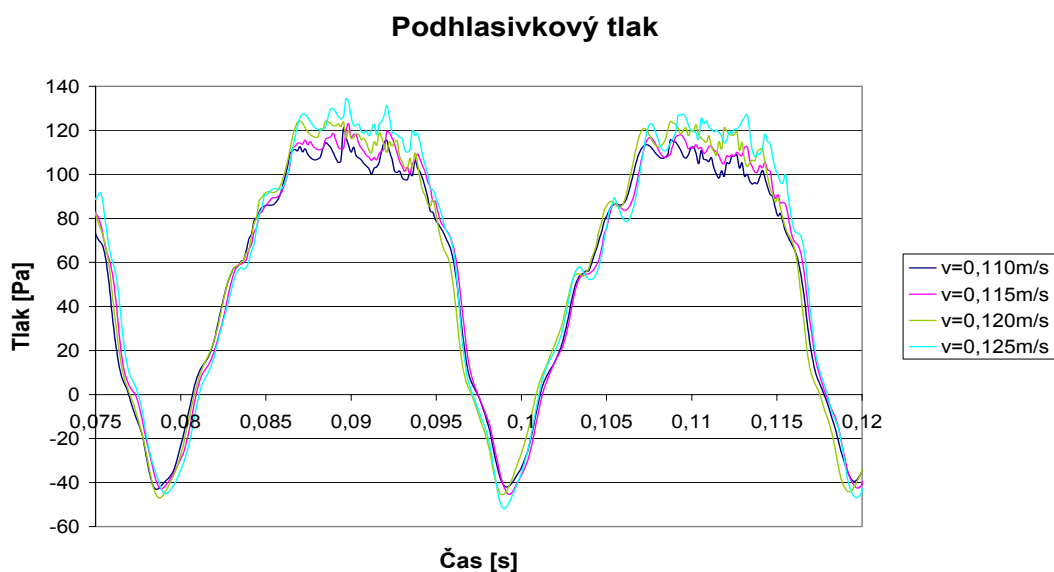


Obr. 8. Otevření hlasivek pro různé rychlosti vzduchu

Tento nárůst je způsoben růstem tlaku v podhlasivkovém prostoru, což je patrné na obr. 10. Na obr. 9 vidíme průběh hlasivkové štěrby pro nejnižší rychlost proudění vzduchu a pro nejvyšší rychlost proudění vzduchu. Vidíme, že v důsledku silnějšího buzení dochází při vyšší rychlosti k většímu rozkmitání amplitudy hlasivkové mezery.



Obr. 9. Otevření hlasivek pro max. a min. rychlost vzduchu



Obr. 10. Tlak pod hlasivkami pro různé rychlosti přicházejícího vzduchu

5. Závěr

Výsledky výpočtu potvrdily použitelnost modelu pro simulaci funkce hlasivek. Na druhou stranu však zvolený nárůst rychlosti vzduchu přicházejícího do prostoru pod hlasivkami byl zvolen poměrně malý, z důvodu testování modelu, takže nebylo možno prokázat výskyt dalších jevů při zvyšování intenzity hlasu, jako je například růst základní frekvence. Vytvořený model na simulaci funkce hlasivek může být dále vyžit například pro zkoumání různých vad hlasivek, dále je taky možno upravit geometrický model pro výpočet a testování hlasivkových protéz.

6. Literatura

Golombeck, M.A. (1999) <http://www-ibt.etec.uni-karlsruhe.de/people/mag/frames/papers/EMC99-MD/node3.html>.

Titze, I.R. (1994) *Principles of Voice Production*. Prentice Hall.

Hrůza, V. (2006) *Modelování funkce hlasivek pomocí MKP*, AM 2006, Srní.