

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 439

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Václav Hruza

**Modelování funkce hlasivek
pomocí MKP**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
stav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Ing. Václav Hrůza

MODELOVÁNÍ FUNKCE HLASIVEK POMOCÍ MKP
SIMULATION OF VOCAL FOLDS FUNCTION USING FEM

Zkrcen verze Ph.D. Thesis

Obor: Inenrsk mechanika
Školitel: Doc. Ing. Vojtěch Mišun, CSc.
Oponenti: Doc. Ing. Karel Přikryl, CSc.
Doc. Ing. Stanislav Źiaran, CSc.
Prof. RNDr. Jan Őklba, CSc.

Datum obhajoby: 22. 11. 2007

KLÍČOVÁ SLOVA

hlasivky, interakce vzduch-struktura, výpočetní algoritmus, vibrace

KEYWORDS

vocal folds, fluid-structure interaction, computational algorithm, vibrations

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69

OBSAH

OBSAH.....	3
1 ÚVOD.....	5
2 FORMULACE PROBLÉMU.....	5
3 VYVÍJENÝ MODEL HLASIVEK.....	6
3.1 Rovinný model.....	7
3.1.1 Model geometrie.....	7
Model hlasivek.....	7
3.1.2 Model výpočtu.....	9
3.2 Analýza výsledků.....	12
3.2.1 Analýza výsledků výpočtu vzduchu.....	12
4 PROSTOROVÝ VÝPOČET.....	15
4.1 Model geometrie.....	16
4.1.1 Model výpočtu.....	17
5 PREZENTACE VÝSLEDKŮ.....	21
6 ZÁVĚR.....	24
7 LITERATURA:.....	27
8 CURRICULUM VITAE.....	29
9 ABSTRACT.....	30

1 ÚVOD

Nejdůležitějším dorozumívacím prostředkem v životě člověka je jeho hlas, kterým nejenže předáváme velké množství informací, ale také naše emoce. Lidský hlas je tvořen samohláskami a souhláskami.

Souhlásky: - znělé – na jejich vzniku se podílí hlasivky
 - neznělé – vznikají bez použití hlasivek, kdy je v artikulačním ústrojí vytvořena nějaká překážka, tato překážka může buď pouze zúžit dutinu, kterou prochází vzduch, nebo na chvíli tuto dutinu plně uzavřít.

Samohlásky: na vzniku samohlásek se plně podílí hlasivky, kdy průchodem vzduchu hlasivkami vzniká tzv. zdrojový hlas, který je dále filtrován nastavením artikulačního ústrojí.

V této práci se zabývám tvorbou zdrojového hlasu a funkcí hlasivek. Tento zdrojový hlas je pro všechny samohlásky stejný. V průběhu života je funkce hlasivek ovlivňována nejen svými změnami v době růstu, ale také různými nemocemi a např. výrůstky na hlasivkách, ochrnutí jedné, či obou hlasivek. V důsledku nemoci se občas přistupuje s tzv. totální laryngektomií, při níž dojde k úplnému odstranění hlasivek.

Na základě skutečnosti, že neexistuje model hlasivek, který by vycházel z reálného funkce hlasivek, tj. struktury, která je rozvířována tlakem vzduchu přiváděného z plic, vznikla myšlenka vypracovat model hlasivek, nebo snad lépe řečeno model funkce hlasivek, který by byl založen na interakci dvou prostředí. Prostředí strukturního, což jsou hlasivky, ve kterém by byly počítány deformace a posuny hlasivek a prostředí fluidního, ve kterém by se modelovalo chování vzduchu pod, mezi a nad hlasivkami. Zde bych chtěl zdůraznit, že v této práci nejde o věrné zachycení geometrie hlasivek a přilehlých struktur, neboť toto by bylo na další samostatnou práci. Hlavní práce spočívá ve vyvinutí funkční interakce mezi dvěma výše zmíněnými prostředími, tzn. model, ve kterém bude vzduch jedinou hnací silou pro vybuzení kmitů hlasivek. Tento model je kompletně řešen v programu ANSYS 8.1, kde je prováděno jak modelování, tak také následné výpočty jak strukturní, tak i fluidní. Použití jednoho programového systému nám umožňuje zjednodušit přenášení dat z fluidního výpočtu do strukturního a naopak. Dále pak umožňuje vytvářet příkazové makra, pomocí nichž je zadáván soubor příkazů vstupujících do ANSYSu.

Pomocí tohoto modelu by se mohly nejen potvrdit, či vyvrátit existující teorie o funkci hlasivek, ale také další důležité informace o funkci hlasivek. Dále pak bude možno použít vytvořený model výpočtu pro modelování hlasivkových protéz.

2 FORMULACE PROBLÉMU

Problematika generování lidského hlasu je v dnešní době stále aktuální, neboť přes všechny snahy výzkumných týmů se stále nepodařilo plně popsat vznik zdrojového hlasu a pohyb hlasivek. Problém spočívá v nedostupnosti hlasivek, kdy není možno neinvazivně sledovat hlasivky při fonaci. Jediné pozorování, které je

možno realizovat, je sledování otevírání hlasivek shora, tedy kdy měřicí přístroje jsou umístěny nad hlasivky přes ústa. Dále je pak při každém měření dbát vysoké opatrnosti, neboť je potřeba se vyvarovat jakéhokoliv poškození hlasivek.

S rostoucím výkonem výpočetních systémů je možné pro modelování hlasivek používat stále složitější a přesnější modely funkce hlasivek. Rozvoj metody konečných prvků při počítání problémů v biomechanice umožnil i vznik následující práce s cílem:

Vytvořit počítačový model funkce hlasivek založený na vzájemné interakci vzduchu se strukturou hlasivek a provést analýzu jeho chování.

3 VYVÍJENÝ MODEL HLASIVEK

Jak už bylo řečeno v úvodu, na základě skutečnosti, že neexistuje model hlasivek, který by vycházel z reálného funkce hlasivek, tj. struktury, která je rozvířována tlakem vzduchu přiváděného z plic, vznikla myšlenka vypracovat model hlasivek, nebo snad lépe řečeno model funkce hlasivek, který by byl založen na interakci dvou prostředí. Prostředí strukturního, což jsou hlasivky, ve kterém by byly počítány deformace a posuny hlasivek a prostředí fluidního, ve kterém by se modelovalo chování vzduchu pod, mezi a nad hlasivkami. Zde bych chtěl ještě zdůraznit, že v této práci nejde o věrné zachycení geometrie hlasivek a přilehlých struktur, neboť toto by bylo na další samostatnou práci. Hlavní práce spočívá ve vyvinutí funkční interakce mezi dvěma výše zmíněnými prostředími, tzn. model, ve kterém bude vzduch jedinou hnací silou pro vybuzení kmitů hlasivek. Tento model je kompletně řešen v programu ANSYS 8.1, kde je prováděno jak modelování, tak také následné výpočty jak strukturní, tak i fluidní. Použití jednoho programového systému nám umožňuje zjednodušit přenášení dat z fluidního výpočtu do strukturního a naopak. Dále pak umožňuje vytvářet příkazová makra, pomocí nichž je zadáván soubor příkazů vstupujících do ANSYSu.

Výpočtový model byl nejdříve zpracován pro interakci pouze rovinných modelů a po vytvoření plně funkčního výpočtového modelu bylo přistoupeno k modelování a výpočtu v prostoru.

Model geometrie, i když je symetrický kolem vertikální osy, je modelován s oběma polovinami, neboť je snaha vytvořit model, na kterém bude možné v budoucnu provádět i výpočty nesymetrie hlasivek (ochrnutí, polypy, atp.)

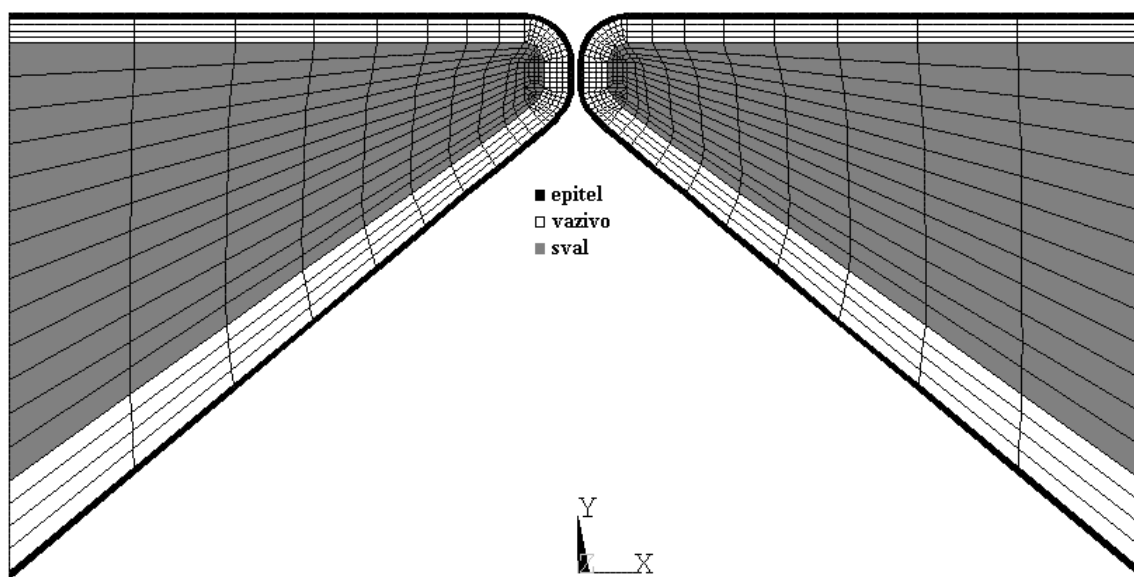
3.1 ROVINNÝ MODEL

3.1.1 Model geometrie

Při modelování hlasivek musíme mít stále na paměti, že se jedná o lidskou tkáň, u které není známa přesná geometrie ani přesné materiálové charakteristiky. Je možné vycházet pouze z existujících anatomických nákresů a již známých modelů. Při tvoření geometrie modelu jsem vycházel z knih [1], [3], [5] a z modelů již vytvořených. Model geometrie se skládá ze dvou částí, z hlasivek a vzduchu

Model hlasivek

Model je vypracován jako symetrický s namodelováním tří vrstev – epitelu, vaziva a svalu. Tyto vrstvy se liší použitým modulem pružnosti. U tohoto modelu byl použit nejvyšší modul pružnosti u epitelu, nižší u vaziva a sval byl modelován s nejmenším modulem pružnosti. Tato sestupná velikost modulu pružnosti směrem do hlubší vrstvy je uvažována vzhledem ke změřeným charakteristikám, [3]. Pro jednoduchost výpočtu je zatím uvažován homogenní lineární izotropní materiál. Materiál hlasivek je uvažován jako takřka nestlačitelný, $\eta = 0,49$, hustota všech tří tkání je dána $\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$ [3], [22]. Po ověření funkčnosti programu výpočtu bude možno materiál změnit, aby přesněji vystihoval charakter materiálu hlasivky – ortotropie, hyperelastická. Síť struktury hlasivek je modelována pomocí rovinného čtyřuzlového prvku umožňujícího velké deformace a je možno pomocí něj modelovat hyperelastické a takřka nestlačitelné materiály (v ANSYSu je to prvek PLANE182). Model je vytvořen postupně přes body, čáry a plochy, na kterých je vytvořena síť prvků s danými vlastnostmi.

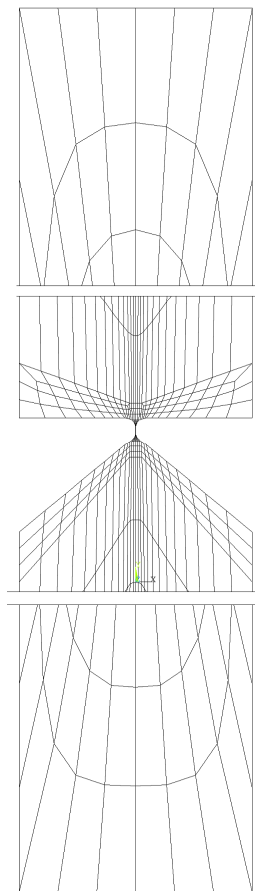


Obr.1. Síť elementů na 2D modelu hlasivek

Kontakt hlasivek je realizován pomocí symetrického kontaktního páru, který je modelován jako kontakt plochy na plochu (prvky target169 a conta172). Rozměrově je model dimenzován podobně jako skutečné hlasivky, na výšku (y) má model 0,018 m, na šířku (x) 0,023 m.

Model vzduchu

Model vzduchu sestává ze tří hlavních částí. Části nad hlasivkami, která nahrazuje supraglottický prostor, části pod hlasivkami, čímž se modeluje subglottický prostor a další důležitá část, kterou musíme brát v potaz, je část vzduchu mezi hlasivkami, kde dochází k zavírání hlasivek a tudíž k úplnému vytlačení vzduchu - v tomto místě dochází k velkým změnám sítě vzduchu, neboť se zde mění hlasivky nejvíce a tudíž zde při modifikaci sítě dochází ke komplikacím. Model vzduchu jak pod hlasivkami, tak nad hlasivkami má délku (osa z) 0,25 m. Tento prostor je modelován pomocí prvků Fluid141, 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./FLOTRAN. 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. Sít' elementů na modelu vzduchu

3.1.2 Model výpočtu

Výpočet pohybu hlasivek je hlavní část této práce, respektive sestavení algoritmu výpočtu. Rovinný model sloužil pro vytvoření funkční interakce hlasivek a vzduchu, neboť není tak náročný na výpočetní čas a algoritmus tohoto výpočtu lze s malými úpravami použít i pro prostorový model. V následující části bude vysvětlen algoritmus výpočtu rovinného modelu a s tím budou rozebrány nejdůležitější příkazy a operace prováděné pomocí naprogramovaného makra.

Nastavení proměnného prostředí

Před samotným výpočtem je potřeba provést několik přípravných kroků. Jedním z nich je nastavení fyziky prostředí. Výpočet využívá tzv. fyzik prostředí, kdy se pro každé prostředí, jak pro vzduch, tak pro strukturu, vytvoří soubor, ve kterém jsou uloženy všechny parametry modelu sítě (použitý prvek, materiály, atd.) a parametry výpočtu (nastavení řešiče, časového kroku výpočtu atd.).

U vzduchu je materiál definován jednoduše, použitím přednastaveného materiálu Ansysu – AIR. Jelikož je však viskozita vzduchu velice malá ($\mu = 1.8135E-05$ kg/m.sec) je možné ji zanedbat.

Materiály jednotlivých vrstev hlasivek jsou nastaveny následovně (jak bylo již popsáno výše, jedná se o homogenní lineární izotropní materiál):

- Epitel (vnější vrstva): - hustota: $\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$
 - poissonův poměr: $\mu = 0,49$
 - modul pružnosti: $E = 25000 \text{ Pa}$
- Vazivo (prostřední vrstva): - hustota: $\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$
 - poissonův poměr: $\mu = 0,49$
 - modul pružnosti: $E = 20000 \text{ Pa}$
- Sval (vnitřní vrstva): - hustota: $\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$
 - poissonův poměr: $\mu = 0,4$
 - modul pružnosti: $E = 17000 \text{ Pa}$

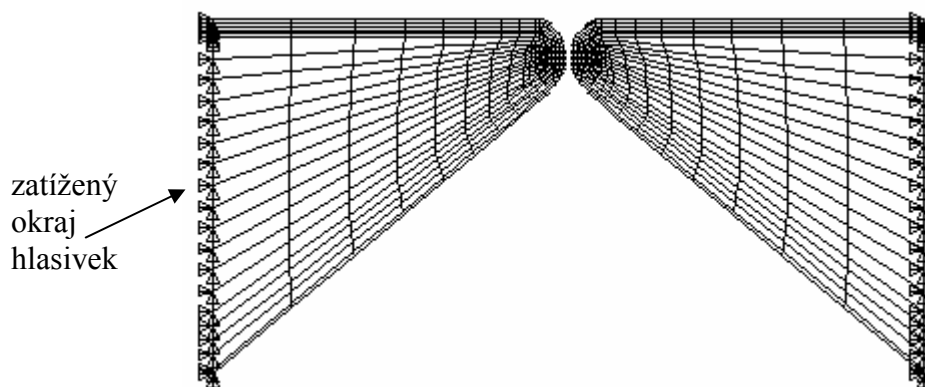
Materiály byly navoleny tak, aby odražely sestupnou velikost modulu pružnosti směrem hlouběji do struktury.

Výpočet přiblížení hlasivek

Tímto máme vše připravené k zahájení výpočtů. Vlastní výpočet se skládá ze dvou fází. První fáze je přípravná, ve které se provádí výpočty, které je potřeba provést před samotnou interakcí struktura - vzduch. Ve druhé fázi dochází k výpočtu samotné interakce struktura - vzduch. Mezi přípravnými výpočty je první výpočet přiblížení hlasivek. Jelikož byly hlasivky modelovány v pozici otevřené, tedy že mezi nimi je mezera. Tato mezera je potřebná z důvodu správného namodelování sítě vzduchu.

Výpočet přiblížení hlasivek je potřeba rozdělit na několik částí a postupně přibližovat, abychom mohli zároveň měnit síť vzduchu. Toto je realizováno pomocí cyklu s tím, že v každé další smyčce cyklu je zvětšena okrajová podmínka přiblížení hlasivek. Prve je však třeba načíst prostředí struktury, abychom počítali pouze s prvky hlasivek. Hlasivky jsou zatěžovány deformačně, kdy je zadán posuv

vnějších okrajů obou hlasivek ve směru x a ve směru y je hlasivkám zabráněno v pohybu, viz.Obr.3.



Obr.3. Zatížení hlasivek při přiblížení

Hlavní výpočet interakce hlasivky-vzduch

Hlavní výpočet obsahuje 3 hlavní kroky – výpočet vzduchu, výpočet posunutí hlasivek a úpravu sítě. Nejjednodušší zobrazení tohoto výpočtu je pomocí vývojového diagramu, viz diag. 1. Výpočet tlaku ve vzduchu a deformace hlasivek je už řešen jako přechodový děj, přičemž délka časového kroku je zvolena $\Delta t = 0,00015$ s. Tento čas odpovídá přibližně 50 krokům na jednu periodu otevření hlasivek.

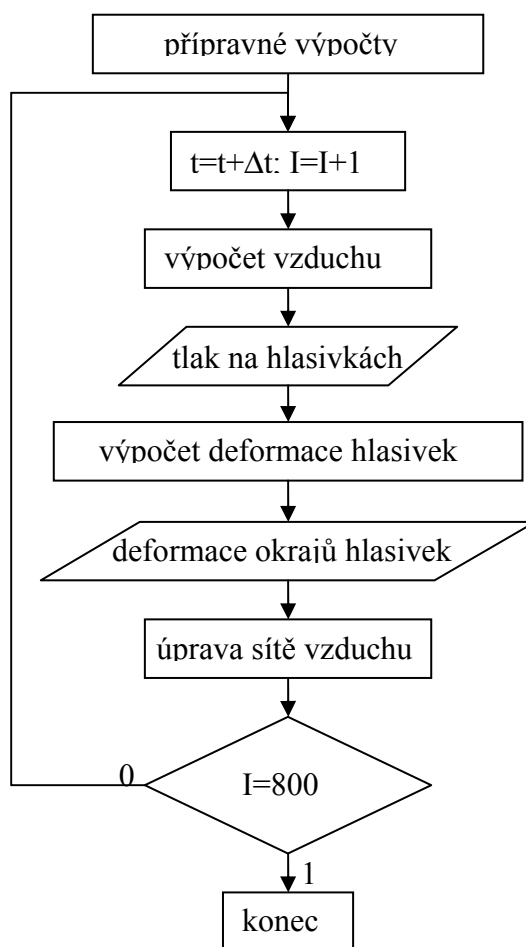
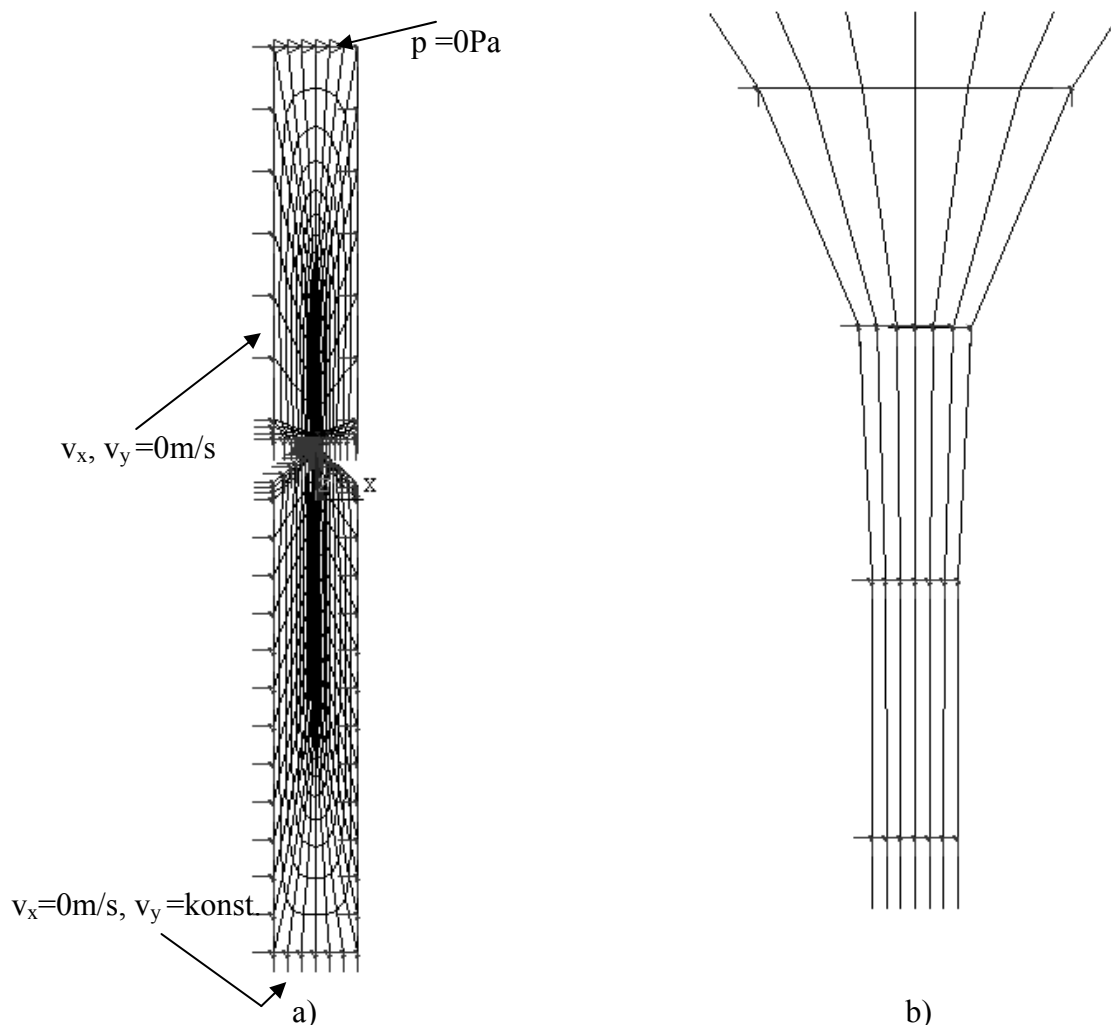


Diagram 1. Vývojový diagram výpočtu interakce vzduch-hlasivky

První výpočet, který se v interakci provádí, je výpočet tlaku ve vzduchu.

Výpočet tlaku ve vzduchu

Výpočet je proveden tak, že pro model z Obr.2 se načte fluidní prostředí a zadají se okrajové podmínky. Fluidní prostředí jsme si definovali při tvorbě modelu, tedy je potřeba ještě popsat okrajové podmínky definované na síti vzduchu. Zatížení je zobrazeno na Obr.4. Na nepropustných stěnách, skupiny v_{xy} , *nahore* a *dole*, je nastavena nulová rychlost jak ve směru x , tak ve směru y . Horní stěnou, uniká vzduch do okolí (podobnost s ústy), a tudíž je zde předepsána podmínka nulového, neboli barometrického tlaku. Další okrajová podmínka je předepsána na dolní stěně, skupina uzlů v_{yx} , kde je předepsána nulová rychlost ve směru x a ve směru y je dána nějaká konstantní rychlost – její velikost záleží na tom, jakou intenzitu „hlasu“ - výsledného signálu chceme docílit.



Obr.4. Zatížení sítě vzduchu. a) celá síť; b) detail na hlasivkovou štěrbinu

Obr.4b ukazuje detail hlasivkové štěrbiny, respektive zatížení uzlů v hlasivkové štěrbině při zavření hlasivek. Jelikož je na síti vzduchu udržována nenulová mezera mezi hlasivkami, i když tyto jsou zavřeny, je potřeba zamezit vzduchu, aby touto mezerou procházel. Toho docílíme předepsáním nulové rychlosti v daných uzlech

jak ve směru x , tak i y . Pomocí tohoto výpočtu dostaneme rozložení tlaku ve vzduchu a tento tlak použijeme pro další výpočet – jako zatížení okrajů hlasivek.

Výpočet deformace a posunutí hlasivek

Na výpočet tlaku ve vzduchu navazuje výpočet deformace hlasivek, kterou tento tlak vyvolá.

- zatížení: k zatížení použitého pro přiblížení a kontakt hlasivek přibude zatížení od vzduchu – ve fázi zavření hlasivek je to tlak hromadícího se vzduchu pod hlasivkami, ve fázi otevření hlasivek je to tlak od unikajícího vzduchu. Takto je zatížena celá hranice vzduch-struktura.

- výpočet: jedná se o přechodovou analýzu, s krokem voleným tak, aby bylo dostatečně popsáno kmitání hlasivek, jedná se o časy v řádu 10^{-4} s.

Přepočet sítě vzduchu

Po výpočtu následuje stejná procedura kontroly otevření hlasivek a následně přepočtu sítě vzduchu jako v přípravných výpočtech.

Přepočtem sítě vzduchu končí jeden časový krok interakce vzduch - struktura. Těchto časových kroků je potřeba provést značné množství, cca 1000, neboť je potřeba přejít úvodní přechodovou část – než dostaneme kmitání s přibližně stejnou amplitudou kmitání.

3.2 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Rozbor výsledků můžeme rozdělit do tří skupin, výsledky z fluidního výpočtu, ze strukturálního výpočtu a jejich kombinace.

3.2.1 Analýza výsledků výpočtu vzduchu

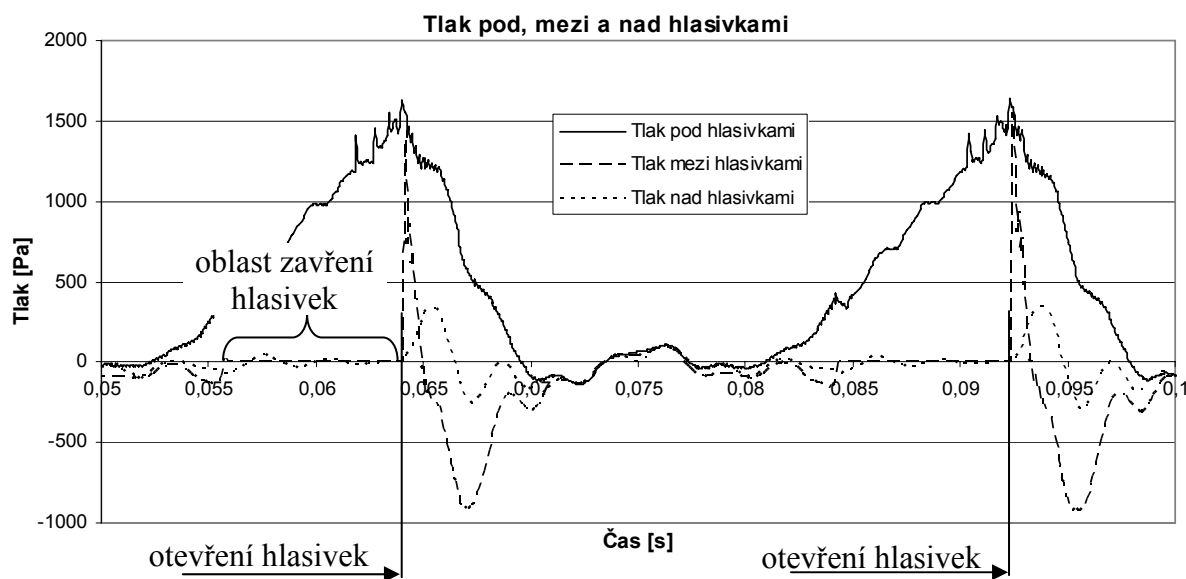
A) v časové oblasti

Vzduch do subglotického prostoru proudí s konstantní rychlostí, čímž se při zavřených hlasivkách v této dutině hromadí vzduch a vzrůstá jeho tlak. Při dosažení určitého kritického tlaku dochází k otevření hlasivek, kdy naopak prudce uniká vzduch hlasivkovou štěrbinou, a tudíž dochází k poklesu tlaku.

Druhá oblast, která je důležitá při funkci hlasivek, je oblast mezi hlasivkami. Tato oblast je specifická tím, že zde dochází k zavírání hlasivek a tím pádem k úplnému vytlačení vzduchu z tohoto prostoru. Na počátku, kdy jsou hlasivky uzavřeny, a při každém zavření hlasivek, se vzduch mezi hlasivkami nevyskytuje, tudíž vyvstává otázka, jestli lze hovořit o mezihlasivkovém tlaku vzduchu při zavření hlasivek. Kde není nějaká látka, tak tam nemůžou být ani charakteristiky této látky. Takto ovšem nelze provádět výpočtovou simulaci, neboť pro každý čas je potřeba uvádět nějakou hodnotu. Proto je při zavření hlasivek uvažováno s mezihlasivkovým tlakem, ovšem o velikosti neovlivňující chování hlasivek, a to je pouze $p = 0 \text{ Pa} = p_b$.

Vzduch se po průchodu hlasivkami dostane do nadhlasivkového (supraglottického) prostoru, kde se supraglottický tlak upravuje na jednotlivé

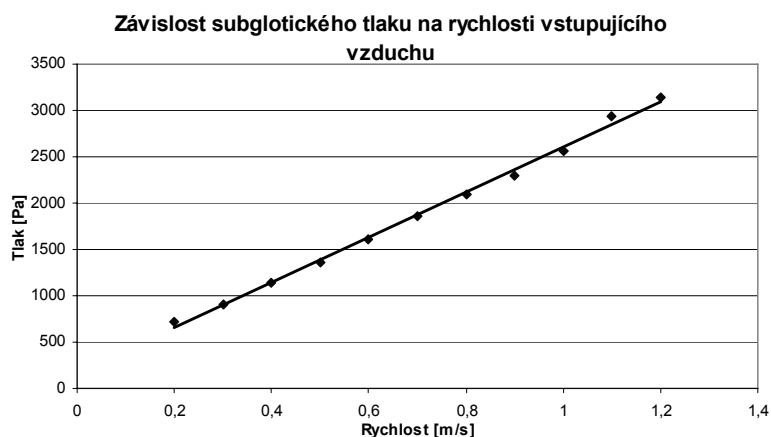
samohlásky. V tomto modelu je tato dutina namodelována obdélníkem, tudíž o samohláskách a hláskách nemůže být řeč, avšak změna mezihlasivkového signálu je zde dobře viditelná.



Obr.5. Jedna perioda průběhu tlaku pod, mezi a nad hlasivkami

Na Obr. 5 vidět, jak dochází k úpravě tohoto signálu. Je zde vidět, jak při určitém podhlasivkovém tlaku, dochází k otevření hlasivek a nárůstu mezihlasivkového tlaku na hodnotu podhlasivkového. Rychlý únik vzduchu hlasivkovou štěrbinou způsobí razantní snížení mezihlasivkového tlaku až do záporných hodnot. Tento jev je známý jako Bernoulliho efekt. Mezitím dochází k poklesu podhlasivkového tlaku vlivem úniku vzduchu z podhlasivkové dutiny. Když tlak pod hlasivkami klesne na určitou hodnotu, dojde k zeslabení Bernoulliho efektu a tlak mezi hlasivkami začne opět narůstat. Těsně před otevřením hlasivek na maximum, se vyrovnají tlaky v prostorách kolem hlasivek a po krátký okamžik zůstávají stejné. Při zavírání hlasivek se opět projeví Bernoulliho efekt, kdy vidíme, jak v určitém okamžiku dochází k tomu, že mezihlasivkový tlak je nižší než tlak pod hlasivkami. Zároveň dochází k pozvolnému nárůstu tlaku pod hlasivkami ještě před zavřením hlasivek. To je způsobeno tím, že vzduch přicházející do prostoru pod hlasivkami nestačí unikat zavírajícími se hlasivkami.

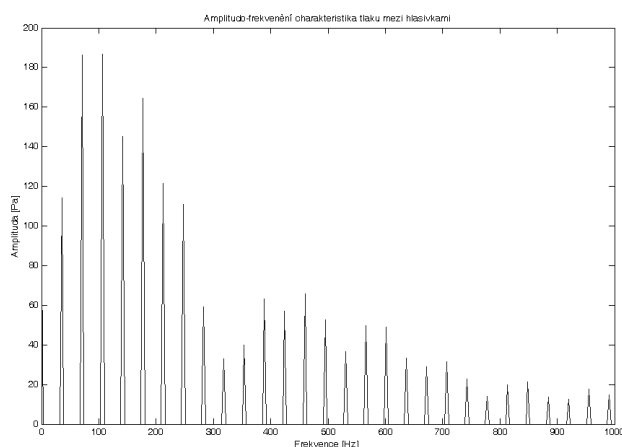
Na Obr.6 je zobrazeno, jak s rostoucí rychlostí vnikajícího vzduchu dochází k zvyšování subglottického tlaku. Z grafu je dobře patrné, že se jedná o lineární závislost, takže narůstající intenzitu hlasu můžeme definovat jako vzrůst tlaku, i jako vzrůst rychlosti s jakou nám přichází vzduch pod hlasivky.



Obr.6. Závislost subglottického tlaku na rychlosti vstupujícího vzduchu

B) ve frekvenční oblasti

Ve frekvenční oblasti se opět zaměříme na tři důležité oblasti – pod, mezi a nad hlasivkami.

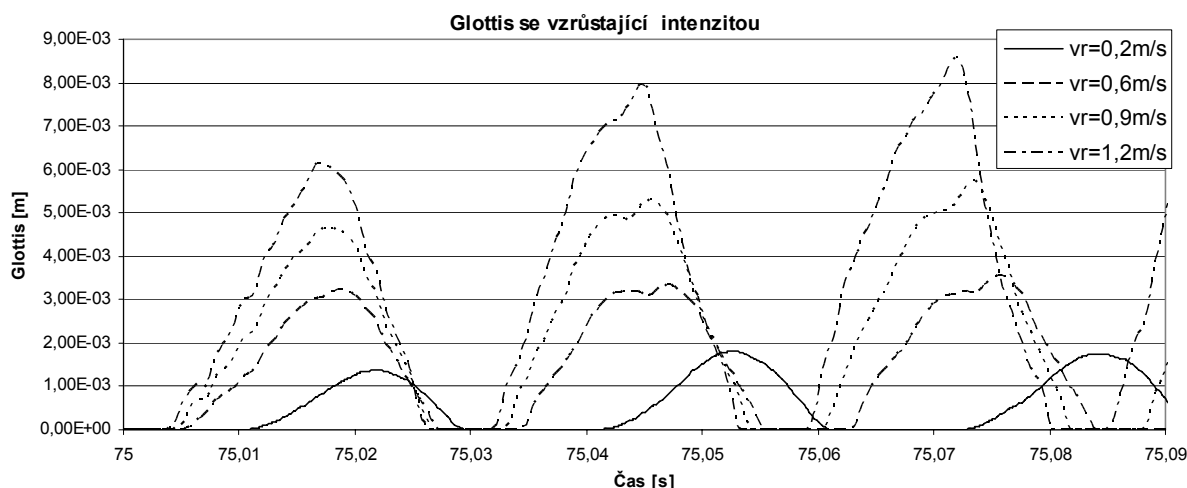


Obr.7. Amplitudo-frekvenční spektrum tlaku mezi hlasivkami

Na Obr.7 vidíme amplitudo-frekvenční spektrum tlaku mezi hlasivkami. Toto spektrum je velice bohaté co se vyšších harmonických týče. Je zde v rozsahu 0 Hz-1000 Hz 29 harmonických. Bohatost tohoto spektra je způsobena skokovou změnou tlaku hlavně při otevírání hlasivek. V tomto časovém okamžiku je tato změna podstatně větší, než při zavření hlasivek.

Analýza výsledků výpočtu struktury

Nyní zde budou prezentovány výsledky pohybu hlasivek. Jako první si ukážeme, jak dochází k nárůstu hlasivkové mezery s růstem intenzity podhlasivkového proudu vzduchu.

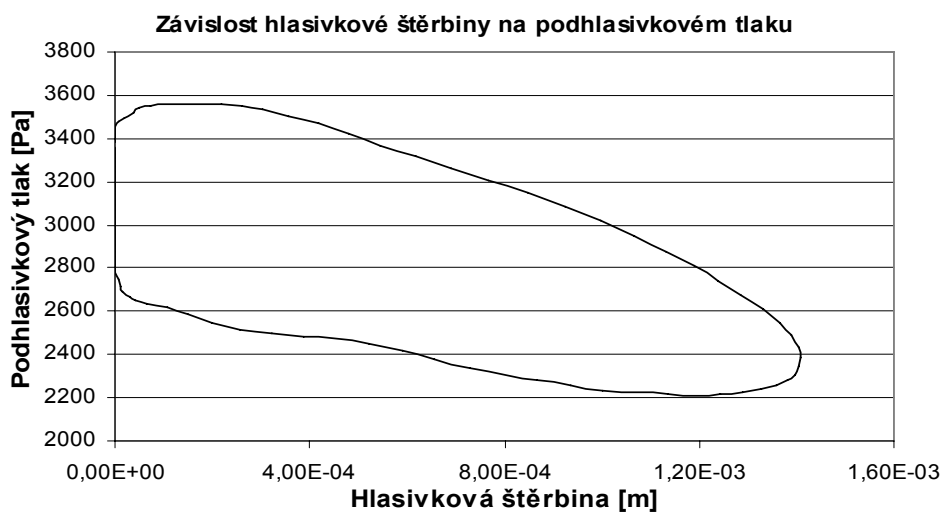


Obr.8. Průběh rozevření mezihlasivkové štěrbiny pro 4 intenzity hlasu

Na Obr.8 je znázorněn průběh rozevření hlasivkové štěrbiny pro 4 intenzity podhlasivkového proudu. Jak vidíme, spolu s nárůstem tlaku došlo také k nárůstu mezihlasivkové štěrbiny. Také vidíme, že hlasivková štěrbina narůstá přímo úměrně vzrůstajícímu tlaku vzduchu, nebo také vzrůstající rychlosti.

Analýza výsledků výpočtu hlasivky-vzduch

Další ze zajímavých výsledků, je sestavení grafu pro závislost rozevření hlasivkové štěrbiny na podhlasivkovém tlaku.



Obr.9. Závislost hlasivkové štěrbiny na podhlasivkovém tlaku

Při vyhodnocení závislosti na Obr.9 můžeme vycházet z podobnosti s měřením, které bylo provedeno pro realizaci modelu založeném na principu vzduchové bubliny [21].

4 PROSTOROVÝ VÝPOČET

Rovinný model nám posloužil pro vytvoření algoritmu výpočtu, který je nyní potřeba rozšířit do prostoru. Jelikož v prostoru se nám vyskytuje přibližně 10-15×

více uzlů, už není možné, resp. efektivní, dělat operace s uzly pouhým výčtem uzlů. Tyto operace byly vyřešeny užitím matic.

4.1 MODEL GEOMETRIE

Model geometrie je vytvořen pouhým vytažením rovinného modelu do prostoru.

Model struktury - hlasivek

Model hlasivek je, stejně jako u rovinného modelu, třívrstvý, kde jednotlivé vrstvy se liší pouze užitým modulem pružnosti.

Materiálové charakteristiky:

- hustota: $\rho = 1040 \text{ kg/m}^3$
- poissonův poměr: $\eta = 0,49$
- modul pružnosti: - epitel (vnější vrstva hlasivek): $E_1 = 20000 \text{ Pa}$
- vazivo (střední vrstva hlasivek): $E_2 = 5000 \text{ Pa}$
- sval (vnitřní vrstva hlasivek): $E_3 = 60000 \text{ Pa}$

Použité moduly pružnosti se liší od modulů použitých u rovinného modelu především v tom, že modul pružnosti u svalu je největší, kdežto u 2D modelu byl nejnižší. Je to z důvodu, že když jsou hlasivky ve fonačním nastavení, tak je tuhost svalů několikanásobně zvýšena aktivním napětím svalů. Velikost modulů pružnosti je zvolena s přihlédnutím k materiálovým vlastnostem.

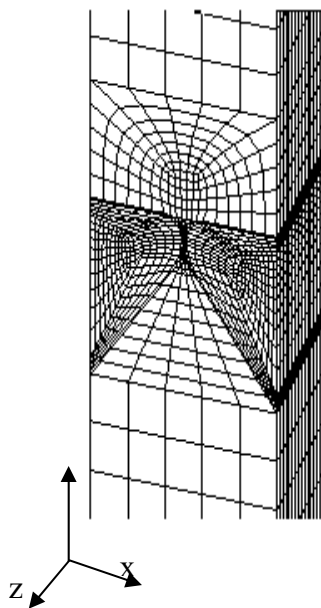
Pro vytvoření prostorové sítě byly použity 8-uzlové strukturní prvky (SOLID185).

Model vzduchu

Model geometrie vzduchového prostoru je, stejně jako model geometrie struktury, vytvořen z rovinného modelu. Postup vytvoření rovinného modelu je uveden výše. Z tohoto modelu je vytvořen prostorový model vytažením rovinného do prostoru. Materiálové charakteristiky jsou stejné jakou rovinného modelu:

- hustota: $\rho = 1,205 \text{ kg/m}^3$
- viskozita: $\mu = 1,8135\text{E-}05 \text{ kg/m.sec}$
- rychlost zvuku ve vzduchu: $c = 343 \text{ m/s}$

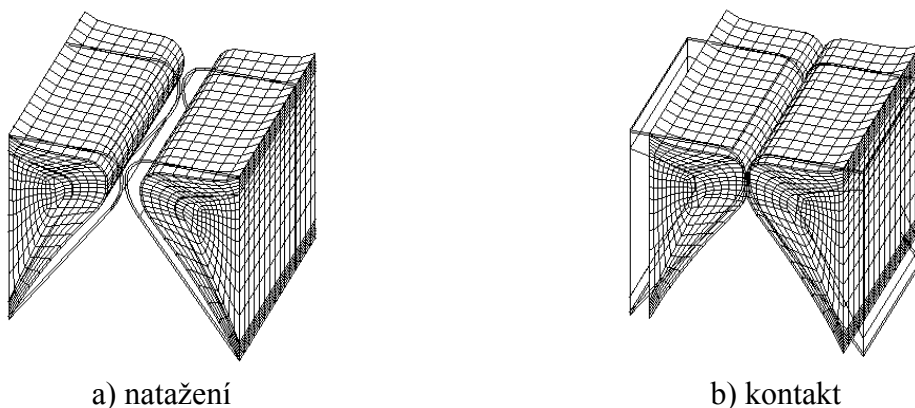
Pro vytvoření sítě vzduchu byly použity 8-uzlové fluidní prvky (FLUID142).



Obr.10. Celkový model – vzduch i hlasivky dohromady

4.1.1 Model výpočtu

Stejně jako u rovinného výpočtu, i zde je potřeba před samotným výpočtem provést výpočty potřebné pro nastavení hlasivek do fonační polohy – hlasivky jsou nataženy a přitisknuty k sobě. K výpočtům provedeným u 2D výpočtu přibývá ještě výpočet natažení hlasivek. Jelikož jsou tyto výpočty podrobně popsány u rovinného výpočtu, a od rovinného výpočtu se příliš neliší, budou zde pouze dané výpočty schematicky naznačeny. Postup přípravných výpočtů je znázorněn na diagramu 2. Na Obr.11 je znázorněno, jak vypadá natažení a následný kontakt hlasivek, pro ilustraci je výsledek srovnán s obrysem hlasivek ve výchozím stavu. Na obrázku vlevo je natažení a můžeme si zde všimnout, jak se nám hlasivky zdeformovali. Na obrázku vpravo jsou hlasivky v kontaktu, tzn. ve fonačním nastavení.



a) natažení

b) kontakt

Obr.11. Natažení a kontakt hlasivek

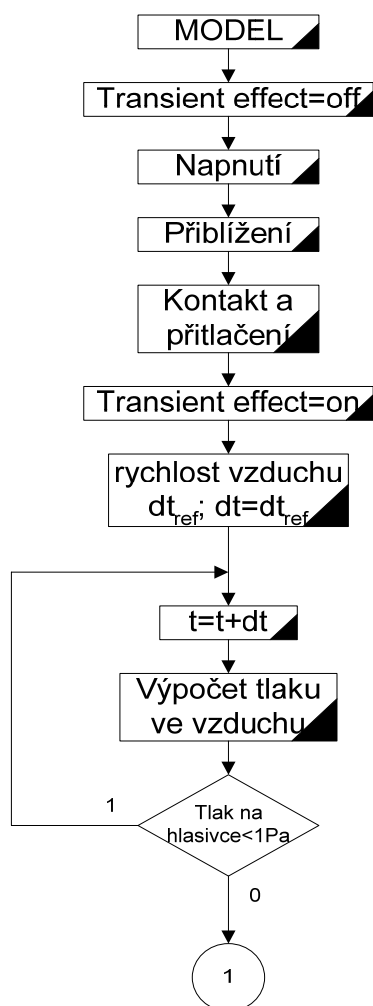


Diagram 2. Vývojový diagram přípravných výpočtů

Hlavní výpočet

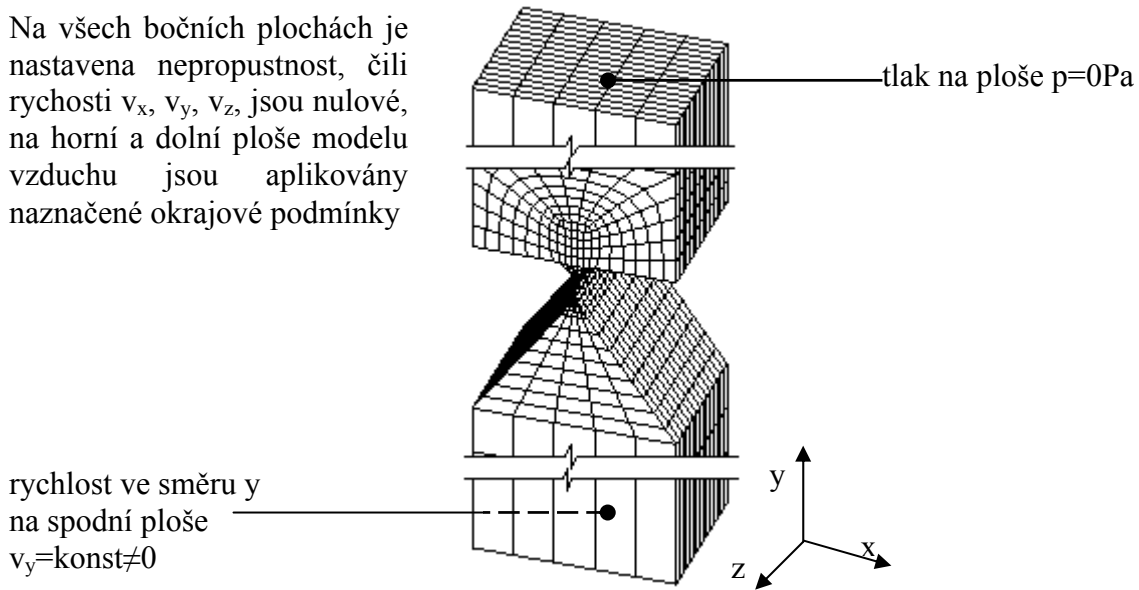
Hlavní výpočet interakce vzduch-hlasivky vychází z algoritmu vytvořeného u rovinného modelu. Tento algoritmus je potřeba trochu upravit. K samozřejmým úpravám patří rozšíření všech výpočtů do prostoru (skupiny uzlů, uzly pro přepočítání sítě apod.). Dále je potřeba upravit okrajové podmínky.

Okrajové podmínky použité při výpočtu:

- *vzduchu*

K okrajovým podmínkám uvedeným na Obr.12 přibývají při zavření hlasivek další okrajové podmínky tak, jak je to definováno u 2D výpočtu, viz Obr.4b, tzn. v místě zavření je předepsána podmínka nulového tlaku a nulových rychlostí ve všech směrech.

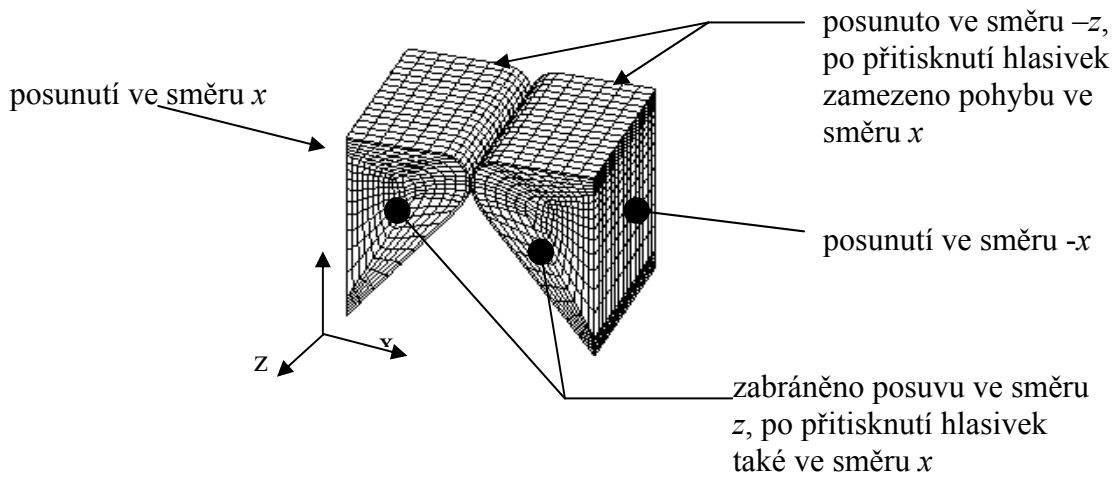
Na všech bočních plochách je nastavena nepropustnost, čili rychlosti v_x , v_y , v_z , jsou nulové, na horní a dolní ploše modelu vzduchu jsou aplikovány naznačené okrajové podmínky



Obr.12. Okrajové podmínky při výpočtu vzduchu

- *hlasivek*

Aplikované okrajové podmínky při hlavním výpočtu interakce jsou znázorněny na Obr.13. Vidíme, že k okrajovým podmínkám použitým u přípravných výpočtů, natažení a přitisknutí hlasivek, přibývají další podmínky. Jedná se o zafixování čel hlasivek v přitisknutém stavu. To znamená, že si musíme na všech uzlech na čelech hlasivky zjistit jaké je posunutí ve směru x a poté toto posunutí aplikujeme jako deformační podmínku do daných uzlů.



Obr.13. Okrajové podmínky při výpočtu struktury

Algoritmus celého hlavního výpočtu interakce vzduch-struktura je zobrazen v diagramu 3.

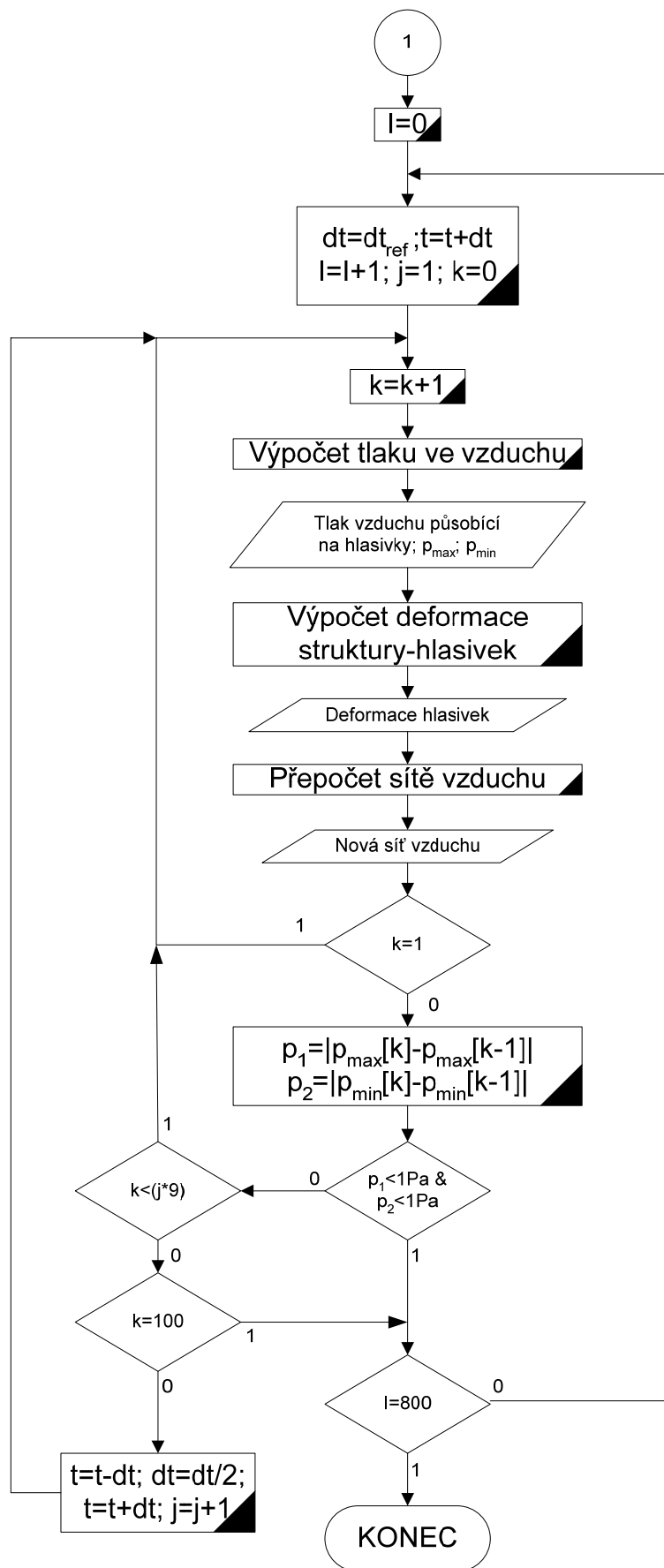


Diagram 3. Vývojový diagram výpočtu interakce vzduch-struktura

Ve spodní části diagramu 3 si můžeme všimnout několika rozhodovacích procesů. Tyto souvisejí s kontrolní částí výpočtu, která je zde nově zavedena. Tato kontrola je zde za účelem iterativního zpřesnění výpočtu. Iterace je naprogramována tak, že se prvně vypočte tlak ve vzduchu v čase $t+dt$, pro tento tlak se vypočte deformace hlasivek v čase $t+dt$ a přepočítá se síť vzduchu, zde se opět vrátíme k výpočtu vzduchu a je proveden výpočet tlaku vzduchu v čase $t+dt$, ovšem na změněné síti. Tento tlak se aplikuje na hlasivky a vypočítá se deformace hlasivek a změna sítě. Po tomto druhém výpočtu následuje výše zmíněná kontrola, kdy se porovnávají maximální a minimální tlaky ve dvou po sobě jdoucích výpočtech. Jestliže je rozdíl maximálních a minimálních tlaků ve stanovené toleranci, je přistoupeno k výpočtu v dalším časovém kroku. Zde může nastat situace, že výpočet začne přeskakovat mezi dvěma stavy, tzn. že rozdíl tlaků bude stále stejný. Z tohoto důvodu je zde podmínka, že v takovém případě dojde k rozdělení časového intervalu na polovinu. Takto se interval bude dělit dokud nedojde ke zkonvergování výpočtu, nebo k překročení povoleného počtu iterací. Poté se časový krok vrátí na původní hodnotu a přistoupí se k výpočtu dalšího časového kroku.

5 PREZENTACE VÝSLEDKŮ

Prezentované výsledky slouží pro ověření správnosti vytvořeného výpočetního modelu. Pomocí dostupných dat je srovnáváno chování vytvořeného modelu a reálných hlasivek, případně srovnávání s předpokládaným charakterem chování.

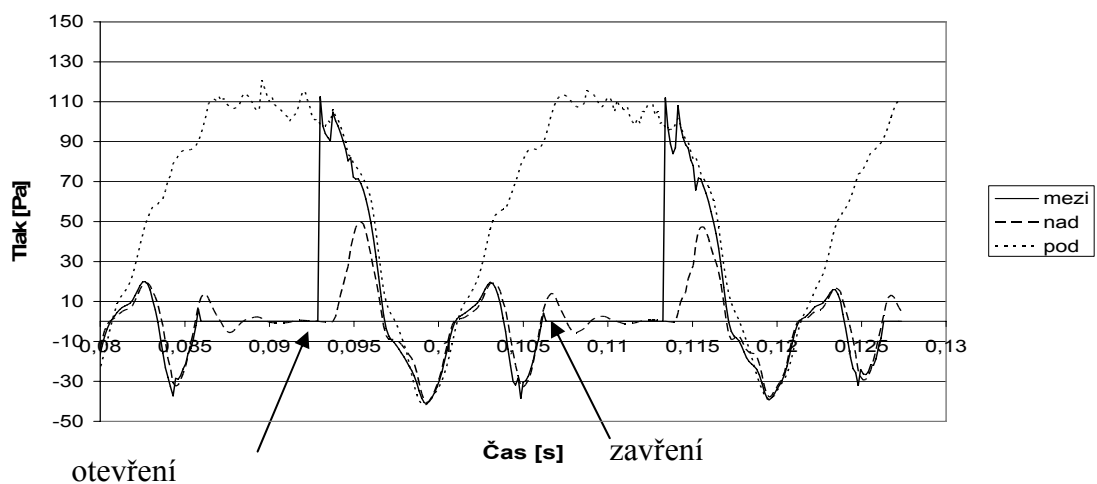
Zde opět jako u rovinného modelu jsou vyhodnocovány tlaky ve vzduchu, dále pak analýza chování hlasivek a rozbor vlivu tlaku vzduchu na pohyb hlasivek.

Analýza výsledků výpočtu vzduchu

Důležité jsou průběhy tlaku pod hlasivkami, čili tlak který řídí pohyb hlasivek, tlaku mezi hlasivkami, který odpovídá zdrojovému hlasu, a dále také tlak nad hlasivkami, který odpovídá vyslovované samohlásce, v našem případě se ale jedná spíše o nějaký výsledný signál, kde by měla být patrná změna signálu od zdrojového. Na Obr.14 jsou znázorněny tlaky pod, mezi a nad hlasivkami. Na tomto grafu je dobře vidět, jak se mění tlaková vlna průchodem hlasivkami. Tlak vzduchu pod hlasivkami narůstá přibližně konstantně do okamžiku, kdy se začnou hlasivky pohybovat směrem vzhůru a díky tomu se začne zvětšovat prostor pod hlasivkami a tlak pod hlasivkami je na tento okamžik přibližně konstantní. Následuje otevření hlasivek, které způsobí že se mezi hlasivky dostává tlak z podhlasivkového prostoru, který ale zároveň začíná klesat vlivem úniku vzduchu hlasivkovou štěrbinou. Na rozdíl od rovinného modelu zde při otevírání není tolik vidět Bernoulliho efekt, který je pak viditelný až při zavírání hlasivek. Zaměříme-li se na vývoj tlaku nad hlasivkami, tak hned po otevření můžeme vidět prodlevu tohoto tlaku na nulové hodnotě. Toto je způsobeno zpožděním tlakového signálu, v podstatě se jedná o čas za jaký se naplní vzduchem část nadhlasivkového prostoru pod uzlem z něhož je vyhodnocován nadhlasivkový tlak. Následuje pozvolný nárůst tlaku nad hlasivkami, než se tlak dostane přibližně na hodnotu tlaku mezi hlasivkami. Tento pak opisuje až

do chvíle zavření hlasivek. Po zavření hlasivek dochází k tlumenému kmitání tlaku vzduchu nad hlasivkami.

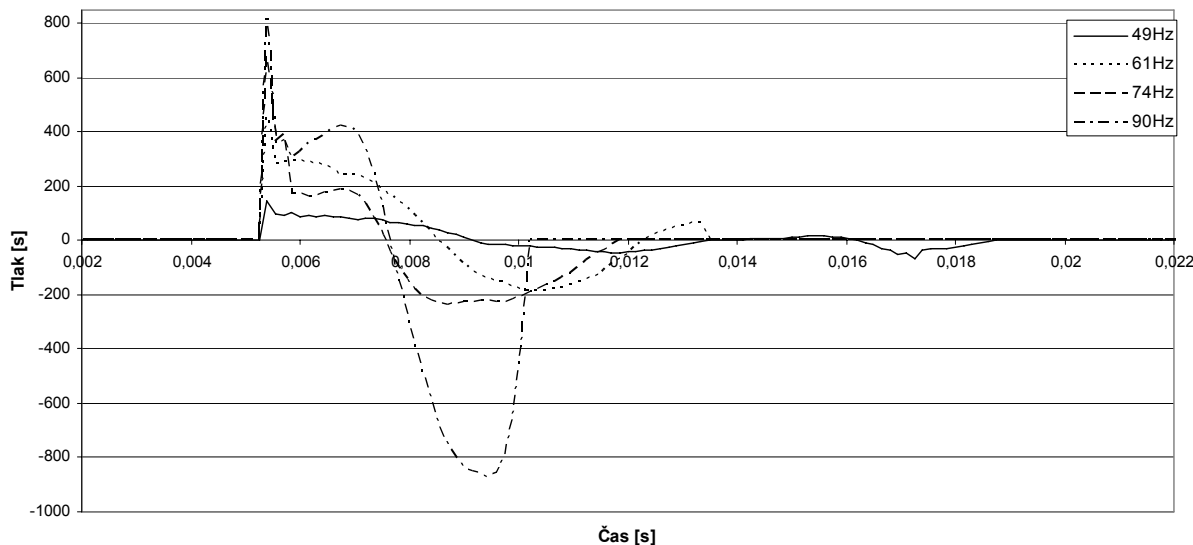
Tlaky pod, mezi a nad hlasivkami



Obr.14. Průběh tlaku pod, mezi a nad hlasivkami

Na dalším grafu, Obr.15, jsou znázorněny průběhy mezihlasivkového tlaku pro čtyři různé frekvence. Zvyšování frekvence bylo realizováno zvyšováním tuhosti hlasivek. U reálných hlasivek je zvýšení frekvence realizováno zvýšením aktivního napětí svalu hlasivek a mírného natažení hlasivek. Aktivní napětí hlasivek zvýší tuhost hlasivkového svalu a natažení zvýší tuhost okolních tkání. Při modelování postačí, když zvedneme tuhost všech vrstev hlasivek a dosáhneme kýženého efektu. Z tohoto obrázku je patrné nejenom že model je schopen modelovat kmitání hlasivek o různých frekvencích, ale také je vidět, co se děje se signálem mezihlasivkového tlaku (zdrojového hlasu) při zvyšování frekvence hlasivek.

Průběh mezihlasivkového tlaku u 4 frekvencí



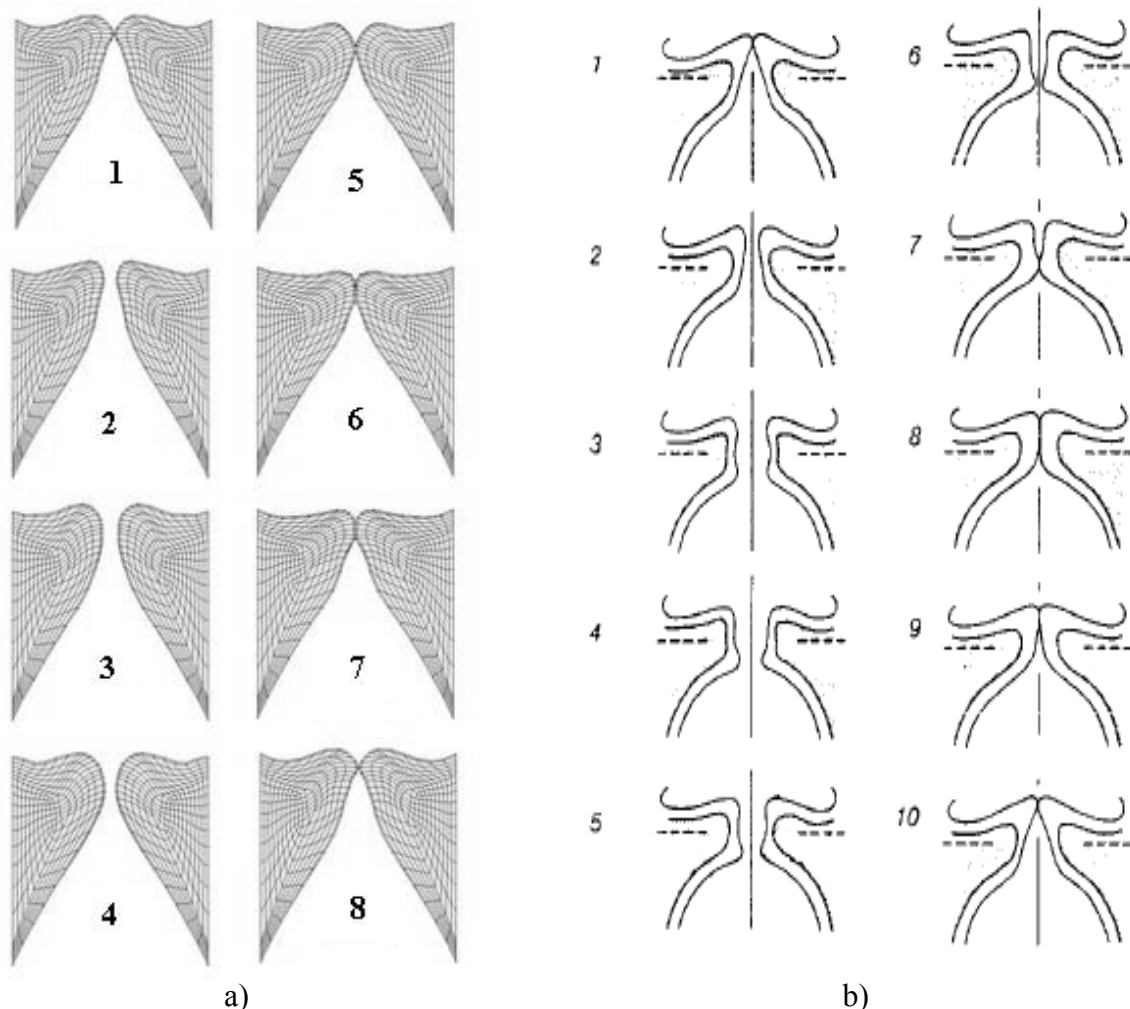
Obr.15. Průběh mezihlasivkového tlaku u 4 různých frekvencí

Zvýšení frekvence kmitání upravuje signál mezihlasivkového tlaku kromě zvýraznění vlivu Bernoulliova efektu ještě dvěma způsoby. První způsob úpravy signálu je, že zvyšováním frekvence dochází ke snižování počtu průchodů signálu nulovou hodnotou. V našem případě vidíme, že zatímco např. signál o frekvenci 49 Hz prochází nulou 3x, tak signál o frekvenci 90 Hz nulou prochází pouze 1x. Jedná se v podstatě o to, že zavírající se hlasivky jakoby ustříhávají signál tlaku (dobře je toto zastřížení vidět na signálu o frekvenci 61 Hz, kde je poslední půlvlna utřata přibližně za její polovinou). Druhý způsob je ten, že se zkracuje perioda kmitání tlaku při otevření hlasivek.

Analýza výsledků výpočtu struktury

- fáze otevírání hlasivek

V následující části jsou znázorněny jednotlivé fáze otevírání hlasivek, které můžeme porovnat s fázemi hlasivek tak jak byly pozorovány u skutečných hlasivek. Zde je důležité zmínit, že se podařilo namodelovat i pohyb slizniční vlny, což se povedlo díky zvýšení tuhosti svalů nad tuhost epitelu. U rovinného modelu byla uvažována klesající tuhost tkáně směrem do středu hlasivek po jednotlivých vrstvách a při otevírání hlasivek není pozorována slizniční vlna. Teprve při nastavení tuhosti tak, aby odpovídala co nejvíce tuhostem při fonaci skutečných hlasivek, tedy že nejvyšší tuhost má hlasivkový sval, epitel má střední tuhost a nejnižší tuhost má vazivo, se povedlo docílit slizniční vlny. Vazivo se svou nejnižší tuhostí je tedy hlavní činitel při vzniku slizniční vlny, kde slizniční vlna vytvořená při otevírání hlasivek postupuje podél hranice vazivo-sval směrem vzhůru.



Obr.16. Srovnání fází pohybu hlasivek. a) vypočtené fáze pohybu; b) fáze pohybu podle literatury [1]

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit funkční model výpočtu interakce vzduch-hlasivky, kde byl zvláštní důraz kladen na vytvoření algoritmu výpočtu této iterace. K vyřešení tohoto problému byl použit výpočetní systém ANSYS verze 8.1 a 10.0.

Vytvoření modelu geometrie bylo poměrně jednoduché, neboť se nejedná o žádnou složitou geometrii. Důležitější bylo přiřazení materiálových charakteristik, kde se ukázalo, že je velice důležité jakou tuhost přiřadíme které vrstvě. Aktivní napětí svalu se ukázalo být důležitým faktorem při vzniku slizniční vlny. Jelikož se ovšem nepodařilo zavést aktivní napětí pomocí žádné funkce Ansysu, bylo nutno toto zvýšení tuhosti zahrnout do počátečních materiálových charakteristik. Tato úprava nijak neovlivňuje funkčnost hlasivek, neboť i u reálných hlasivek nejdříve dojde k aktivaci svalu, čímž se zvýší jeho tuhost, a teprve potom dochází k fonaci. V rámci výpočtu byla vyzkoušena i varianta, kdy byly uvažovány hyperelastické charakteristiky materiálu tkání. Bohužel se ale ukázalo, že výpočetní náročnost této varianty je příliš velká, a kvůli tomu se od této varianty upustilo.

Vytvoření samotného algoritmu výpočtu probíhalo ve dvou krocích. V prvním byl vytvořen algoritmus výpočtu pro rovinný model. Samozřejmě by bylo možno přistoupit hned ke tvorbě algoritmu pro prostorový model, avšak pro značný rozdíl v náročnosti na výpočetní čas se ukázalo efektivnější vyvinout výpočet pro rovinný model a teprve po odladění rovinného výpočtu přistoupit k rozšíření tohoto modelu do prostoru. Při výpočtu bylo potřeba věnovat značnou pozornost prostoru mezi hlasivkami neboť toto místo bylo asi nejproblematictější v celém výpočtu. Zavíráním hlasivek docházelo při úpravě sítě vzduchu ke značné deformaci a borcení prvků sítě vzduchu. Tento problém se podařilo úspěšně vyřešit naprogramovanou úpravou sítě vzduchu v oblasti hlasivek. Kontrola funkce hlasivek spočívala hlavně ve vizuální kontrole fonace, neboť ta je ve své podstatě nejsnáze kontrolovatelný výsledek, dále pak bylo potřeba sledovat jestli je kmitání ustálené. Jak je vidět v kapitole výsledků rovinného modelu, tak už i rovinný model je schopen poměrně dobře popsat interakci vzduchu. Na prostorovém grafu průchodu vzduchu celou dutinou je dobře vidět, jak dochází k modifikaci tlakového signálu vlivem otevírání a zavírání hlasivek a na prostorovém spektru je vidět jak se spektrum podhlasivkového signálu mění při průchodu signálu celou dutinou a především hlasivkami. Zavření a otevření hlasivek způsobí skok v signálu, díky kterému se vytvoří spektrum obsahující velký počet harmonických frekvencí, které jsou důležité pro vybuzení formantů potřebných pro rozeznávání jednotlivých samohlásek.

Při tvorbě prostorového modelu bylo možno vyjít z rovinného modelu, tak jak bylo plánováno. Jediné důležitější změny v modelu geometrie oproti rovinnému modelu byly takové, že došlo k zpřesnění tvaru a hloubce jednotlivých vrstev a byly upraveny materiálové charakteristiky tak, aby se více blížily charakteristikám tkání při fonaci. Ve výpočtu byly změněny oblasti okrajových podmínek, kde díky použití přednastavených skupin uzlů došlo pouze ke změně těchto skupin. Dále pak bylo nutno zajistit konce hlasivek tak, aby se otevíral pouze jejich střed. Také byl přidán výpočet natažení hlasivek, neboť tento nebyl u rovinného modelu realizovatelný.

Správnost vytvořeného algoritmu byla ověřena provedenými výpočty, ze kterých je vidět, že se podařilo splnit vytyčený cíl, a to vytvořit funkční model výpočtu interakce vzduchu a hlasivek. Tento model výpočtu simuluje pohyb hlasivek a tvorbu hlasu na stejném principu, jak je to realizováno u skutečných hlasivek.

Využití tohoto modelu je možné jak pro modelování vlivu různých nemocí na funkci hlasivek, tak také pro zkoumání vlivu velikosti jednotlivých prostorů na kvalitu a charakter hlasu.

Jedna z budoucích úprav modelu by mohla být úprava nadhlasivkového prostoru, při které by se stávající tvar tohoto prostoru nahradil tvarem vzduchové dutiny nad hlasivkami při vyslovování určité samohlásky. Další zpřesnění výpočtu se může docílit použitím tzv. „nekonečných prvků“, kdy je výstup vzduchu z úst realizován nikoliv předepsáním barometrického tlaku na uzly v oblasti úst, ale výstupem do vzduchového prostoru, který má vlastnosti reálného prostoru, tedy jakoby se mohly vzduchové vlny šířit do nekonečna. Dále je možno modelovat a sledovat změny při

změně velikosti podhlasivkového prostoru, tedy v podstatě změnu objemu plic. Tyto změny nevyžadují velké navýšení potřebného výpočetního času.

Další úpravy bych doporučil pouze v případě, že se zvýší výpočetní výkon počítačů. K těmto úpravám patří zejména změna materiálových charakteristik, při které by došlo k vytvoření modelu materiálu popisujícímu hyperelastický charakter materiálu skutečných hlasivek a použití tohoto materiálu při výpočtu. Tímto dojde ke značnému nárůstu nelinearity úlohy a tím samozřejmě k nárůstu složitosti. Další změna pro přiblížení modelu realitě může být vytvoření podhlasivkového prostoru blízcího se plicím, ve kterém by se tlakový vzduch vytvářel stlačováním tohoto prostoru konstantní, či jinou silou, která by popisovala co nejdřívejší vytlačování vzduchu z plic. Tímto by byl vytvořen model, který by bylo možno použít pro relativně přesné simulace funkce celého vokálního traktu.

7 LITERATURA:

- [1] Švec, J.: Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu, (Disertační práce). Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky, 1996.
- [2] Flanagan, J.L.: Speech analysis, synthesis and perception, New York: Academic Press, 1965.
- [3] Titze, I., R.: Principles of Voice Production, Prentice Hall, 1994
- [4] Hirano, M., Kurita, S., Nakashima, T.: The structure of the vocal folds, In K.N. Stevens & M. Hirano (Eds.), Vocal Fold Physiology (pp. 33-43). Tokyo: University of Tokyo Press, 1981.
- [5] Sovák, M., Kmitání hlasivek ve světle laryngostroboskopie, Praha, 1945.
- [6] Hirano, M.: Clinical examination of voice, Wien: Springer-Verlag, 1981.
- [7] Ishizaka, K., Flanagan, J.L.: Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords, The Bell System Technical Journal, 51, 1233-1268, 1972.
- [8] Titze, I.R.: The physics of small-amplitude oscillation of the vocal folds, Journal the Acoustical Society of America, 83, 1536-1552, 1988.
- [9] Story, B., H., Titze, I., R.: Body cover model of the vocal folds, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 97, 1995.
- [10] Xin, J., Hyman, J., M., Y-YQi: Modeling Vocal Fold Motion with a Continuum Fluid Dynamic Model: I. Derivation and Analysis, <http://arxiv.org/abs/nlin.PS/0108039>.
- [11] Rosa, M. O., Pereira, J. C.: A contribution to simulating a three-dimensional larynx model using the finite element method, Journal of Acoustical Society of America (2003) 114 (5), 2003.
- [12] Lobo, A., O'Malley, M.: Towards a biomechanical model of the larynx, www.asel.udel.edu/icslp/cdrom/vol1/095/a095.pdf.
- [13] Guter, H.E.: A mechanical model of vocal-fold collision with high spatial and temporal resolution, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 113, 2003.
- [14] Renotte, Ch., Bououx, V., Wilquem, F.: Numerical 3D analysis of oscillatory flow in the time-varying laryngeal channel, Journal of Biomechanics 33, 1637-1644, 2000.
- [15] Berry, D.A., Herzel, H., Titze, I., Story, B.: Bifurcations in excised larynx experiments, Journal of Voice, 10, 15-24, 1996.
- [16] Alipour, F., et al.: A numerical simulation of laryngeal flow in a forced-oscillation glottal model, Computer Speech and Language 10, 75-93, 1996.
- [17] Horáček, J., Švec, J. G.: Aeroelastic model of vocal-fold-shaped vibrating element for studying the phonation threshold, Journal of Fluids and Structures 16(7), 931-955, 2002.
- [18] Šidlof, P.: Numerické simulace kmitání pružného tělesa v proudící kapalině a analýza jeho stability, České vysoké učení technické v Praze, 2003.
- [19] <http://www-ibt.etec.uni-karlsruhe.de/people/mag/frames/papers/EMC99-MD/node3.html>.
- [20] Mišun, V., Prikryl, K., Hrůza, V.: Simulace pohybu hlasivek ve 2D, Kočovce, 2005.
- [21] Mišun, V., Prikryl, K.: The source voice generation on the basis of the „compressed air bubble“ principle, International conference on voice physiology and biomechanics, Marseille, 2004.
- [22] Golombek, M.A.: <http://www-ibt.etec.uni-karlsruhe.de/people/mag/frames/papers/EMC99-MD/node3.html>, 1999.
- [23] Tigges, M., et al: Imaging of vocal fold vibration by digital multi-plane kymography, Computerized Medical Imaging and Graphics 23, p. 323-330, 1999.
- [24] Titze, I.R.: Measurement of Vocal Fold Intraglottal Pressure and Impact Stress, Journal of Voice Vol. 8, pp. 132-144, 1994.

- [25] Mišun, V., a kol.: Charakteristiky umělých hlasivek, Interakce a zpětné vazby, Praha, 2004.
- [26] Fant, G., Liljencrants, J., Lin, Q.: A four-parameter model of glottal flow, French-Swedish Symposium, Grenoble, 1985.

8 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

Jméno a Příjmení: Václav Hrůza
Datum narození: 7.11.1979
Rodinný stav: svobodný
Adresa: Novosedly 360, 69182
Telefon: 723912290

Pracovní zkušenosti

1.11.2006 - dosud **SIEMENS Industrial Turbomachinery s.r.o.**, Olomoucká 7/9,
618 00, Brno
Dosažená pozice: Zkušební technik
Pracovní nápln: Servis parních turbín

2006 **Tranza, Chrudim**
Tvorba výkresové dokumentace v programu Autocad

7/1999 - 10/1999 **Unex, Uničov**
Tvorba prostorových modelů strojních celků v programu I-Deas

Vzdělání

2003- **Vysoké učení technické v Brně**, Fakulta Strojního Inženýrství
Ústav Mechaniky Těles, Mechatroniky a Biomechaniky.
PhD studium
Téma práce: Modelování funkce hlasivek pomocí MKP

1998 - 2003 **Vysoké učení technické v Brně**, Fakulta Strojního Inženýrství
Ústav Mechaniky Těles, Mechatroniky a Biomechaniky.
Obor: Aplikovaná mechanika,
Téma práce: Analýza formantů českých samohlásek

1994-1998 **Střední průmyslová škola strojní, Sokolská 1, Brno**
obor: strojírenství

Dovednosti

Jazyky: **Angličtina:** - pokročilý
Němčina: - začátečník

Řidičský průkaz: **B**

Počítačové dovednosti: **MS Windows, MS Office, internet, Ansys, Matlab, Catia, Pro-engineer, I-deas, Solidworks, Autocad, LMS Sysnoise**

Datum: 14.3.2007

9 ABSTRACT

This dissertation deals with the problem of vocal folds function simulation, whereas the main focus is on the simulation of the principle of generating of vocal folds vibrations and vibrations of compressed air. There is plenty of research done dealing with this issue but most of the research has limited usage and needs various hypotheses for its function.

The aim of this dissertation is to create a simulation of the vocal folds based on fluid – structure interaction and to make this interaction as close to reality as possible, so that this simulation can be used to prove or deny commonly used hypotheses.

The introductory chapter summarizes anatomy and present-day knowledge about human voice creation. The next part gives an overview of vocal folds models used in the past and nowadays.

The main part of this work is dedicated to creation of an algorithm of fluid – structure interaction computation and to creation of simulation of the vocal folds function using the computational software Ansys.