



Posudek oponenta diplomové práce

Název práce: Numerická simulace kmitání syntetického modelu hlasivek
Autor práce: Bc. Martina Němcová
Studijní program: N0914P360003 Biomedicínské inženýrství
Akademický rok: 2023/2024
Typ práce: diplomová
Oponent práce: Ing. Jaromír Horáček, DrSc.

Kritéria hodnocení práce	Hodnocení 1-2-3-4
1. Všeobecná charakteristika práce	
Kvalita a aktuálnost teoretických poznatků	1
Vyjádření vlastních myšlenek a vyvození závěrů	1
Odborný přínos	2
Stupeň obtížnosti práce	1
2. Posouzení praktické části práce	
Formulace cíle práce a vytýčení cílů práce	1
Formulace hypotéz	1
Vhodnost zvolených technik a metodických postupů	1
Kvalita výsledků praktické části	2
Splnění cílů práce	1
3. Práce s odbornou literaturou	
Kvalita, aktuálnost a relevantnost zdrojů	1
Správnost bibliografických citací a odkazů	2
4. Formální stránka práce	
Dodržení doporučených pravidel a norem formální úpravy (Metodika zpracování kvalifikačních prací)	1
Jazyková úroveň práce	1
Kvalita, opodstatněnost a srozumitelnost příloh, tabulek a obrázků	1



Slovní vyjádření k hodnocení diplomové práce:

Cílem diplomové práce bylo vytvoření výpočetního modelu třívrstvého silikonového modelu lidských hlasivek, jenž byl vyvinut v ÚT AV ČR k experimentálnímu výzkumu fonace člověka. K vytvoření výpočetního modelu diplomantka použila software COMSOL s cílem namodelovat frekvenčně modální vlastnosti umělé hlasivky, kde mezi dvěma silikonovými vrstvami je tekutina. Navíc se pokusit namodelovat samobuzené kmitání dvou hlasivek protékáných proudem vzduchu.

Diplomová práce je poměrně rozsáhlá, má celkem 92 stran textu včetně příloh. Prvých 34 stran je věnováno důkladnému přehledu literatury o tvorbě hlasu člověka z obecných hledisek v rámci anatomie a fyziologie celého hlasového ústrojí člověka od plic, přes hrtan až po vokální trakt. Následuje detailní odborný popis tvorby lidského hlasu na základě studia řady odborných publikací o výzkumu hlasu ve světové odborné literatuře, a to nejen o fyzikálním principu vzniku fonace, ale i stručného přehledu základních znalostí o proudění a fyzikálních vlastnostech tekutin, akustice a dynamice a kmitání těles. Obecný přehled literatury k danému tématu končí na str. 34 stručnou informací o hlasových poruchách, chorobách a hlasových náhradách po laryngektomii.

Hlavní přínos diplomantky je ve třetí, tzv. Experimentální části práce, která vlastně spočívá v numerickém modelování vlastního a samobuzeného kmitání umělých silikonových hlasivek. Tomu předchází základní popis použitého softwaru a přehled dosud ve světě vyvinutých fyzikálních modelů lidských hlasivek jak tuhých a nepohyblivých tak i silově poháněných určených pro aerodynamický výzkum a poddajných hlasivek buzených proudem vzduchu.

Následuje pak popis tvorby 2D a 3D matematických modelů třívrstevných silikonových hlasivek s mezivrstvou tekutiny vyvinutých v rámci softwaru COMSOL Multiphysics nejprve pro **modální analýzu**. Prvním krokem ve vytváření matematického modelu hlasivky bylo zhotovení její geometrie, definice materiálových vlastností a definování okrajových podmínek. Následoval výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitání repliky jedné silikonové hlasivky metodou konečných prvků s použitím čtyřtětňů. Vodní mezivrstva byla modelována nestlačitelným kontinuem. Úspěchem je zjištění, že vypočtená druhá (122 Hz) a pátá (142 Hz) vlastní frekvence, kde není levo-pravá nesymetrie tvarů kmitání (viz obr. 37 a 40), jsou skutečně reálné tvary kmitu zastoupené v kmitání hlasivek vybuzených prouděním při fonaci. Ostatní vypočtené, v podélném směru nesymetrické tvary kmitu se ve skutečnosti vyskytují jen zřídka (viz mody 2-0 a 1-1 zobrazené na obr. 8 v přehledu literatury).

Mnohem náročnější bylo vytvoření a naprogramování výpočtu **samobuzeného kmitání dvou hlasivek** tvořících model glottis a buzených proudem vzduchu přiváděného ze zjednodušeného modelu tracheji a volně vytékajícího do částečně omezeného prostoru za hlasivkami. Proudění bylo modelováno ALE metodou. Kladně hodnotím zavedení spojitého a ne skokového náběhu proudu vzduchu do glottis v časové oblasti. To se většinou neuvažuje, i když to reálně existuje. Výpočetní sítě pro 2D i 3D modely hlasivek i aerodynamiku se zdají dostatečně husté. Výsledky 2D simulací pro rychlost proudu vzduchu a tlaky v časové oblasti ukazují, že zvolená vstupní rychlost vzduchu, popř. i počáteční tlak $p_0=100$ Pa byly ve všech případech pod kritickou rychlostí aeroelastické nestability systému typu flutter. Vibrace hlasivek se velice rychle utlumily. Podobně tomu mohlo být i v 3D simulacích a to i bez statického předepnutí hlasivek.



Domnívám se, že **cíle diplomové práce byly úspěšně splněny**, zejména dvojrozměrná konfigurace modelu vedla k počítačové simulaci kmitů vytvořených modelů silikonových hlasivek způsobených prouděním vzduchu. Užitečné by bylo dále ve vývoji matematického 3D modelu lidských hlasivek pokračovat formou doktorského studia.

Diplomovou práci doporučuji klasifikovat jako výbornou a diplomantce Bc. Martině Němcové doporučuji udělit vysokoškolský titul..

Doplňující otázky pro obhajobu diplomové práce:

Dotazy a připomínky k diskusi při obhajobě.

- str. 21 Čím se liší primární a zdrojový hlas?
- str. 14 atd. Chybějící odkazy v seznamu literatury: např. Vydrová et al 2017, Krčmová 2006, Rokyta 2016, Guyton a Hall 2006, Silbernagl etc. 2016.
- Naopak ocenit lze názorné vlastní ilustrace (zjednodušená schemata apod.) diplomantky na základě obrázků z odborných publikací.
- str. 24 nepřesnost v názvu podkapitoly 2.3.1 Vlastní tvar a frekvence. Správně by to mělo být: Vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání.
- str. 35 Formulace: „Cílem této diplomové práce je sestrojení numerického modelu...“ je nevhodná, lépe např. vytvoření....
- str. 35 název kapitoly: „3 Experimentální část“ je zavádějící. Kapitola nejprve cituje cíle práce a pak popisuje tvorbu výpočetních modelů hlasivek a numerické výpočty.
- str. 55 a obr. 23 „...dvě silikonové hlasivky v protistojném postavení a prostor za nimi, který má v našem numerickém modelu tvar kvádra. Tento prostor v realitě není nijak ohraničený, v našem numerickém modelu však slouží jako pole, ve kterém jsou zobrazeny výsledky simulace....“ Není z textu jasné v jaké realitě? Navíc dále se mluví konkrétně, že okrajové podmínky pro proudění na výstupu z modelu na stěnách kvádra jsou nazvané v programu COMSOL jako typ WALL (viz obr.27). Konkrétně jaká je to podmínka?
- Obr. 24 a 27 Pro 2D model by ve vstupní části proudu vzduchu neměla být skoková změna v průřezu kanálu.
- Obr. 45 Záznam průběhu výchylky hlasivky není stabilní kmitání. Mimo jiné by stálo za to udělat frekvenční analýzu signálu rychlostí a tlaků i z obr. 46-48 a výsledky porovnat s frekvenčně modální analýzou. Podobně v závěrečné Diskusi na str. 74 (dole) nešlo o stabilní kmity.
- Obr. 49-50 Nebyl v proudovém poli za 3D modelem nekmitajících hlasivek pozorován tzv. Coanda efekt podobný tomu jako je vidět na Obr. 63 a 67 v příloze vybraných snímků z 2D simulací?
- str. 74 Diskuse poslední odstavec: „Tato práce byla limitována dostupným hardware...“. Co je tím konkrétně míněno?



Výsledná klasifikace (možnosti klasifikace: výborně, velmi dobře, dobře, nevyhověl)	výborně
--	----------------

Doporučuji diplomovou práci k obhajobě.

Dne: 9.1. 2024

.....

Podpis oponenta práce