

## Oponentský posudek dizertační práce

**Autor dizertační práce:** Ing. Jan Valášek

**Studijní program:** Mathematical and physical engineering, FS ČVUT

**Název dizertační práce:** Numerical Simulation of Fluid-Structure-Acoustic Interaction in Human Phonation

**Oponent:** doc. Ing. Petr Šidlof, Ph.D.

Dizertace Ing. Jana Valáška se zabývá matematickým modelováním a numerickým řešením problému třicestné interakce mezi pružnou strukturou tkání lidských hlasivek, nestlačitelným prouděním vzduchu v hrtanu a akustikou hrtanu a vokálního traktu. Jedná se o velmi aktuální problém, pro jehož řešení během posledních deseti let došlo celosvětově k prudkému rozmachu výpočetních metod na bázi metody konečných prvků či konečných objemů. Podobně jako v řadě jiných prací autor využívá základní a rozumný předpoklad, že zpětný vliv akustických vln na proudění a kmitání pružné tkáně je slabý a lze zanedbat, čímž dojde k výraznému zjednodušení problému. Prakticky je tak problém aerodynamicky generovaného zvuku a vibroakustiky řešen jako postprocessingový krok po řešení plně sdruženého problému interakce struktura-proudění (FSI). Celá práce se z praktických důvodů (zřejmě vzhledem k využití přímého lineárního řešiče) omezuje na řešení problému ve 2D.

Po úvodní kapitole a krátkém souhrnu matematického aparátu jsou tři kapitoly věnovány matematickému modelování, diskretizaci a numerickému řešení FSI úlohy v několika konfiguracích (hemilarynx / celá 2D geometrie, vynucený pohyb hlasivky / plná interakce). Proudění je diskretizováno metodou konečných prvků, což přináší v případech s dominantní konvekcí nutnost stabilizovat numerická schémata. Tři následující kapitoly popisují modelování a numerické simulace aeroakustického a vibroakustického problému, přičemž velmi pěkně je sepsán a vysvětlen zejména obecný úvod do aeroakustiky v odst. 6.1, který přiměřeně a citlivě sleduje logiku výkladu dle monografie [90]. Dizertační práce je mimořádně rozsáhlá, včetně příloh čítá přes 170 stran. Přílohy kromě doplňujících číselných hodnot a výsledků obsahují i neobvykle dlouhé textové pasáže, které byly zjevně vyčleněny z hlavního textu. Mezi textem kapitol a přílohami se přitom autor velmi často vzájemně odkazuje, což dle mého názoru dosti škodí přehlednosti práce. Dizertace je psána v anglickém jazyce. Ke gramatice a jazykové stránce mám sice jisté výhrady, ale celkově je práce dobře srozumitelná. Formální stránka práce je výborná, pouze v seznamu literatury u několika položek chybí autoři práce. V celé dizertaci pracuje pan Valášek velmi dobře s literaturou a je patrné, že má neobvykle velký přehled o stavu problematiky a pracích jiných autorů z celého světa. Jedinou výtku bych zde měl ke kapitole 1.2 State of the art, která je příliš zaměřena na práce pocházející z ČR (zejména vlastního výzkumného týmu), přestože aktuální stav poznání zde určují zejména týmy v USA, Německu a Skandinávii.

Na dizertační práci je dle mého názoru důležité ocenit, jakým způsobem autor zvládnul do hloubky pochopit velmi širokou problematiku, kde se setkávají tři fyzikální problémy, komplexní matematické modely, jejich numerické řešení a navíc přesahy do biomechaniky a medicíny. Za velký přínos práce považuji matematický a numerický model FSI problému implementovaný ve vlastním výpočetním kódu, podrobnou analýzu několika typů okrajových podmínek a funkční propojení s volně dostupnými, ale velmi špatně dokumentovanými knihovnami CFS++ pro aeroakustiku vyvinutými na TU Vídeň.

V následujícím uvádím seznam drobnějších připomínek, kterým není nutné se při obhajobě podrobně věnovat. Množství těchto připomínek přitom z mého pohledu neznamená, že by byla dizertace špatná, vyšší počet je způsoben spíše neobvykle velkým rozsahem práce:





- odst. 1.2: Immersed Boundary Method nelze považovat za „alternativu“ k metodě konečných objemů, spíše za alternativu k využívání dynamických (pohyblivých) výpočetních sítí. IBM lze používat s konečnoprvkovou diskretizací zároveň
- v celém odstavci 1.2 není vůbec zmíněna metoda konečných objemů, přestože jde o nejpoužívanější metodu v CFD, a nejspíše i v FSI problémech
- odst. 1.3: cíle práce by měly být formulovány výrazně stručněji a jasněji. Nepatří sem například odkazy na Short summary či popisování technických detailů (výhody HDF5 formátu)
- str. 14: Lebesgue spaces, nikoliv Lebesque spaces
- kapitola 2 (Mathematical background) je poněkud nekonzistentní: odstavce 2.1 a 2.2 jsou zde logicky správně, ale odst. 2.3 a 2.4 spíše vysvětlují fyzikální podstatu než čistě matematické základy. Jinak je ale zejména odst. 2.4 sepsán velmi správně – v oblasti modelování lidského hlasu se termíny monopól, dipól a kvadrupól používají běžně, ale většina autorů tyto pojmy nevysvětluje ani neodkazuje na základní literaturu
- str. 27: „planar deformation“ je špatný termín, správně „plane strain“
- rovnice (3.13): nekonzistentní a trochu nevhodné značení pro Poissonovo číslo – v textu  $\sigma_s$ , v rovnici  $\sigma$ , přitom symbol  $\sigma$  se standardně používá pro napětí (a níže toto značení využívá i autor)
- str. 31: „Rositta instability“ – zřejmě má být „Rositter instability“
- str. 52: termín „axially symmetric“ pro 2D případ je zavádějící – evokuje 3D axisymetrické proudění v potrubí o kruhovém průřezu
- výsledky na obr. 5.5: peak na průběhu transglotálního tlaku je i pro případ s penalizační podmínkou stále dosti vysoký. To by ale pravděpodobně bylo možné naladit velikostí penalizačního parametru
- obr. 5.7: průběhy  $\Delta p$  vypadají v pořádku, v případě  $Q_{avg}$  ale není zřejmé, proč křivky pro vyšší hodnoty  $\epsilon$  nekonvergují k případu „pressure“
- rovnice (5.5): Jak v dizertaci, tak v článku [74] mi chybí solidní vysvětlení, proč by měla být takto definovaná veličina  $E_{transf}$  rozumným odhadem energie předané prouděním hlasivce. Ta by se měla počítat jako integrál tlaku (přesněji tenzoru napětí) přes plochu hlasivky, nikoliv transglotického tlaku přes plochu glotálního otvoru. Rozumím, že z měření tyto veličiny vyhodnotit nelze, ale ze simulace to možné je docela dobře, jak je nakonec správně popsáno v rovnicích (5.7) a dalších. Autor by měl prokázat, že přesný výpočet předané energie s tímto odhadem koreluje. Z fyzikálního hlediska se ztráta energie proudění, která se projeví jako transglotický tlak, z části předává do struktury (hlasivek), z části vlivem vazkosti disipuje na teplo a ze (zanedbatelné) části přeměňuje na akustickou energii. Pokud lze zanedbat i druhou zmíněnou část, může opravdu být uvedený odhad rozumný, to by ale měl autor vysvětlit nebo ještě lépe prokázat.
- str. 62: celkově se zde v argumentaci ztrácím, není mi jasné, proč je vůbec důležité sledovat závislost  $p_{trans}$  na  $gap$  a co ze všeho porovnávání pro různé OP a šířky glottis plyne. Celkově mi připadá, že autor zbytečně komplikovaným způsobem analyzuje poměrně jednoduchou věc: 1) podmínka konstantní rychlosti na vstupu je zjevně naprosto nereálná a dle mého názoru se jí ani nemá smysl příliš věnovat, 2) rozumným řešením je buď předepsat konstantní tlakový spád, nebo smíšenou podmínku (penalizační přístup) s vhodnou velikostí parametru  $\epsilon$
- odst 5.3: nepovažuji za vhodný přístup využívat v tomto případě konfiguraci hemilarynx. Z hlediska kmitání struktury (hlasivek) jde o rozumnou úsporu výpočetních nákladů, ale z hlediska proudění je to zcela nerealistická aproximace. Proudění v supraglotické oblasti je zcela nesymetrické
- str. 68 – doporučení pro velikost penalizačního parametru  $\epsilon$ : je určitě správné analyzovat vliv  $\epsilon$  na kritickou rychlost, ale toto podle mě není správná úvaha. Penalizační parametr by měl být nastaven tak, aby okrajová podmínka co nejlépe odpovídala fyzikální realitě. Nikoliv tak, aby parametr měl malý vliv na kritickou rychlost.
- obr. 5.22, str. 72: toto jsou velmi zajímavé informace a závěry. Na obr. 5.22 pouze chybí jednotky, není zřejmé, zda se jedná o  $N/m$ , nebo  $N/m^2$





- str. 79: „hranice oblasti je rozdělena na dvě části, z nichž jedna je prázdná množina“ – matoucí a zbytečné
- str. 82: v aeroakustice se používají různě definované střední, fluktuální a perturbační veličiny. Bylo by dobré přesně definovat, co je zde myšleno středními hodnotami  $p_0$ ,  $v_0$  a  $\rho_0$
- str. 88 - Remark: není zřejmé, proč se zanedbává konvektivní část levé strany (6.26) a jaký to může mít vliv na výsledky
- obr. 8.6: tlak a průtok vykazují podivné vysokofrekvenční oscilace se značnou amplitudou a spíše chaotickým průběhem, ve výrazném kontrastu oproti výsledkům na geometrii MALE-SYM z kapitoly 5. Není zřejmé, zda je to způsobeno vícevrstvou strukturou, geometrií nebo z jiného důvodu
- str. 123: Na obr. 8.22 uprostřed je z mého hlediska patrná významná ztráta informace, konkrétně výrazné akustické zdroje uvnitř glottis pro případ jemné sítě na hrubé síti zmizí. Rozložení zdrojů by dle mého názoru nemělo záviset na výpočetní síti, respektive nechápu zcela důvod normalizace na velikost elementu
- str. 124-125: obr. 8.23 má svislou osu v lineárním měřítku, obr. 8.24 v logaritmickém (dB)
- Fig. D.2: chybí popisky os
- z chyb v angličtině si dovoluji upozornit na tři, které se v práci mnohokrát opakují a působí velmi nepatřičně: 1) which = který; jehož = whose, 2) chybějící či přebývající „s“ rozlišující jednotné/množné číslo podstatných jmen a třetí osobu jednotného čísla u sloves, 3) chybné používání zejména určitých členů
- tiskárně, kde byla práce svázaná, doporučuji (i v zájmu dalších studentů) vyčinit za zkomolení názvu ČVUT na deskách
- Autor se pokusil délku dizertace pocitově zkrátit přesunutím části textu a obrázků do přílohy. To dává smysl v případě delší série výsledků pro několik různých konfigurací nebo samostatné oddělitelné části, bez níž dizertace zůstává srozumitelná (např. příloha A, B). V případě přílohy C (a částečně i D a E) to ale považuji za vyloženě nevhodné a na úkor srozumitelnosti a přehlednosti. Například v textu na straně 75 autor píše, aby si čtenář porovnal Fig. 5.23 a C.1; pro porovnání fázových trajektorií pro symetrický a nesymetrický případ musí čtenář vyhledávat některé informace v odst 5.3, jiné v 5.4 a další text a obrázky v příloze; text 5.3 a 5.4 se v mnoha místech odkazuje na přílohu C, příloha C zase opakovaně na odst 5.3 a 5.4, takže ani jednu z částí nelze číst souvisle. Troufám si tvrdit, že tato struktura informací donutí 95% čtenářů přílohu C nakonec ignorovat a vzdát snahu o pochopení souvislosti.

## Otázky k obhajobě

- Pro diskretizaci Navier-Stokesových rovnic je použit prostor P1-bubble/P1. Další běžnou volbou splňující B-B podmínku jsou P2/P1 elementy. Vysvětlete prosím důvod využití a výhody P1-bubble/P1 elementů oproti P2/P1
- Pro některé výpočty byla využita, dle mého názoru ne zcela vhodně, geometrická konfigurace hemilarynx. Symetrická konfigurace měla vést na lineární systém s 2x více (nikoliv „mnohokrát více“, jak je uvedeno na str. 75) stupni volnosti. Porovnejte výpočetní náročnost pro hemilarynx a symetrickou konfiguraci. Počítat simulace v délce 15 dní na notebooku je velmi nepraktické. Paralelizace je zjevně slabou stránkou aktuálně používaného kódu, ale proč nebyl alespoň využit výkonný stolní počítač nebo pracovní stanice?
- 2D aproximace strukturálního problému (elastických tkání hlasivek) je velmi rozumná. V případě proudění přes hlasivkovou štěrbinu se 2D proudové pole zásadně liší od 3D reality zejména v oblasti turbulentního proudění v supraglottické oblasti. Jaké jsou možné důsledky 2D aproximace v akustické oblasti? Jedná se pouze o příčné akustické rezonance, které leží ve vyšším frekvenčním pásmu, nebo může mít 2D přiblížení i jiný vliv na simulovaný zvuk?





- V pracích autorů Kaltenbacher, Zoerner a Hueppe se používá pro potlačení akustických odrazů PML vrstva i na subglotické hranici oblasti. Pozoroval zde autor práce problémy s odraženými akustickými vlnami? Byl tento efekt patrný na levé části hranice  $\Omega_{free}^a$ , kde také PML vrstva není?

## Závěr

Autor dizertaci realizoval obrovské množství velmi náročných prací a prokázal hluboké znalosti v několika vědních oblastech – fyzice (strukturální mechanika, mechanika tekutin, akustika), matematice (matematické modelování, numerické řešení PDR) a částečně i biomechanice. Přes drobné formální a věcné nedostatky považuji práci za mimořádně kvalitní, přínosnou a zajímavou. Všechny cíle dizertace byly splněny, schopnost samostatné vědecké práce je kromě dizertace nade vše pochybnost doložena i patnáctipoložkovým seznamem publikací, z nichž dvě jsou v časopisech s impakt faktorem a ve všech případech je J. Valášek hlavním autorem. Dizertační práci rozhodně doporučuji k obhajobě.

V Liberci dne 14. 7. 2021

Petr Šidlof

