

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 862

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Vratislav Šálený

**Numerická simulace hluku
generovaného nestabilitami
ve smykové vrstvě**



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ENERGETICKÝ ÚSTAV

NUMERICKÁ SIMULACE HLUKU GENEROVANÉHO NESTABILITAMI VE SMYKOVÉ VRSTVĚ

**NUMERICAL SIMULATION OF NOISE GENERATED
BY SHEAR LAYER INSTABILITIES**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

OBOR	Konstrukční a procesní inženýrství
AUTOR PRÁCE	Ing. Vratislav Šálený
ŠKOLITEL	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
OPONENTI	prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc. Ing. František Paur, Ph.D. Ing. Jan Tippner, Ph.D.
DATUM OBHAJOBY	27. června 2018

Brno 2018

Klíčová slova:

Aeroakustika, CAA, CFD, LES, smyková vrstva, turbulentní proudění.

Keywords:

Aeroacoustics, LES, CAA, CFD, shear layer, turbulent flow.

Místo uložení práce:

Knihovna FSI VUT v Brně
Technická 2896/2
616 69 Brno

Obsah

1 ÚVOD	5
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	7
3 METODY, GEOMETRIE A MODELÝ.....	9
3.1 Metoda vyhodnocení akustického signálu	9
3.2 Aeroakustický objekt	11
3.3 validační měření	13
4 DISKUSE NAD VÝSLEDKY	14
4.1 Vypočtená pole rychlostí.....	15
4.2 Vypočtený akustický signál.....	17
4.3 Vliv tlumení na generovaný akustický signál	21
4.3.1 Měření hodnoty tlumení materiálu varhanní píšťaly	21
4.3.2 Analýza metodou konečných prvků.....	23
4.3.3 Vyhodnocení vlivu tlumení na generovaný akustický signál	24
4.4 Nároky na výpočetní výkon CFD simulací	27
5 ZÁVĚR	29
6 LITERATURA	31
7 PUBLIKACE AUTORA.....	33
8 VĚDECKOVÝZKUMNÁ ČINNOST AUTORA.....	34
9 ŽIVOTOPIS.....	35

1 ÚVOD

Predikce a eliminace aeroakustických hluků nabývá na významu zejména u rychle se pohybujících dopravních prostředků, především u automobilové, letecké a drážní techniky. V kontextu automobilové techniky se jedná o detaily na vnějších površích karoserií, vystavené proudě vzduchu, jako jsou spáry kolem dveří, zpětná zrcátka, stěrače a antény. Tyto hluky jsou generované buď vzájemnými interakcemi mezi víry v turbulentním proudění nebo interakcemi mezi víry a povrchem tělesa. Tyto jevy mohou být dále doprovázeny vznikem akustických zpětných vazeb, což se děje při proudění vzduchu nad otvory kavit, které jsou dále propojeny s uzavřenou dutinou zesilující tónový hluk a společně tvoří tzv. Helmholtzův rezonátor.

Právě hluky generované nestabilitami ve smykové vrstvě vzduchu proudícího kolem otvoru nad kavitou, která je propojena s dutinou - Helmholtzovým rezonátorem, jsou jedním z nejvýznamnějších a nejintenzivnějších zdrojů aeroakustických hluků.

U silničních vozidel se tyto zdroje hluků vyskytují v širokém spektru geometrických měřítek, tedy i v širokém spektru frekvencí Helmholtzova rezonátoru. Otevřené okno automobilu s vnitřním objemem vzduchu v kabině představují Helmholtzův rezonátor velkých rozměrů, jehož vlastní frekvence jsou velmi nízké v hodnotách desítek Hz. Spára nad dutinou mezi dveřmi a karoserií má násobně menší rozměry, a tudíž frekvence tohoto Helmholtzova rezonátoru jsou výrazně vyšší, a to v hodnotách stovek až tisíců Hz. Pokud nastane jistá konstelace mezi geometrií kavity a parametry proudění kolem otvoru nad kavitou, může být generován velmi silný tónový hluk s hladinou intenzity zvuku o hodnotách kolem 100 dB i více.

V cyklu návrhu dopravních prostředků je již rutinně využíváno numerických počítačových simulací, například pro strukturální analýzy, výpočty přenosu tepla, látky a proudění. Obor výpočtová aeroakustika, CAA (computational aeroacoustics) však ještě nedozrál do stádia produktivních inženýrských výpočtů a je stále pouze objektem intenzivního výzkumu a vývoje. Hlavním důvodem je nedostatečný výpočetní výkon počítačů, které zatím nedovolují řešit reálné inženýrské úlohy CAA na komplexních geometriích, v přijatelných časech, se spolehlivými výsledky. Tyto limitace plynou z nutnosti věrně simulovat rozpad vírových struktur v turbulentním proudě až do velmi malých měřítek, což vyžaduje používat velmi jemnou prostorovou i časovou diskretizaci

v numerickém CFD modelu, jehož výsledky jsou hlavním vstupem do CAA analýz. Komerční CFD řešiče jako jsou ANSYS, CCM+, Power Flow, aj. jsou již vybavovány širokou paletou nástrojů pro podporu CAA analýz, přesto existuje jen velmi málo zkušeností, jak tyto nástroje efektivně využívat pro řešení reálných inženýrských úloh.

Tato dizertační práce se zaměřuje na výzkum „state-of-the-art“ numerických modelů, jejich prostorových a časových diskretizací, kdy výsledky tohoto výzkumu pomohou rozšířit znalostní bázi, která v blízké budoucnosti přispěje k rutinnímu řešení úkolů reálné inženýrské praxe. Proto se tato práce úzce zaměřuje pouze na výpočty tónových hluků o nízkých frekvencích, generovaných v kavitách, které představují velmi důležitou skupinou aerohluků. Tento typ úloh totiž slibuje nižší nároky na výpočetní výkon při numerickém řešení CFD simulací, a tudíž existuje reálná šance, že poznatky z této práce bude možno v blízké budoucnosti reálně využít také při inženýrských výpočtech.

Disertační práce se také zaměřuje na výzkum specifických prostředků matematického zpracování a vyhodnocení výsledků tohoto typu CFD simulací, které mohou zkrátit nároky na délku časového záznamu akustického signálu získaného ze CFD simulací, a tím významně redukovat celkový potřebný čas pro provedení počítačové simulace.

Širším cílem této disertační práce je seskupit poznatky pro efektivní provádění CFD numerických výpočtů pro jistou třídu inženýrských úloh CAA, u kterých lze očekávat, že je bude možno v blízké budoucnosti využít pro inženýrské výpočty na virtuálních modelech dopravních prostředků. U těchto CFD numerických výpočtů by mělo být v budoucnu dosahováno výsledků zcela srovnatelných s výsledky aeroakustických měření. Výsledky této práce, aplikované do inženýrské praxe, tak mohou v blízké budoucnosti přispět k identifikaci a kvantifikaci zdrojů tónových hluků na virtuálních prototypch vyvíjených dopravních prostředků. To umožní prověřovat konstrukční úpravy pro snižování těchto hluků již v raném stadiu vývoje. Výsledky tohoto výzkumu mohou tedy významně napomoci ke včasnému získávání inženýrských řešení pro plnění neustále přísnějších požadavků norem pro hlukové limity u dopravních prostředků a zároveň přispět k vyššímu komfortu posádky.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je výzkum numerických modelů, vhodných pro popis dvou velmi odlišných fenoménů - aerodynamického pole a akustického pole, které se vzájemně ovlivňují v silné interakci. Práce se zaměřuje na přímou simulaci hluku v bezprostřední blízkosti zdroje. Důraz klade především na porovnání dvou rozdílných přístupů k modelování turbulence, a to Large Eddy Simulation (LES) a Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations (URANS).

Má být dosaženo následujících dílčích cílů, které byly zvoleny na základě současného stavu poznání:

- Vyvinout takové specifické nástroje pro analýzu výsledků CAA modelů a experimentálních měření pro validaci, aby výsledky modelování a experimentů byly porovnatelné. Nástroje budou zohledňovat především specifické vlastnosti výsledků CAA, zejména dostupnost pouze velmi krátkého časového záznamu akustického signálu v řádu desetin sekundy až jednotek sekund, které dovolí získat jen velmi široké frekvenční pásmo v řádu jednotek až desítek Hz.

- Porovnat dva rozdílné přístupy modelování turbulence LES a URANS s ohledem na jejich schopnost věrně popsat chování tónových zdrojů hluku, u nichž je zvuk generován nestabilitou ve smykové vrstvě. Porovnat jejich přesnost, nároky na výpočetní výkon, spolehlivost konvergence a identifikovat vhodná diskretizační a iterační schémata.

- Navrhnout a vyrobit reálný objekt pro validaci numerických modelů. Připravit, provést a vyhodnotit experimenty, které poskytnou data pro validaci. Objekt bude snadno dostupný, bez specifických nároků na energie, prostory a vybavení. Bude na něm možno provádět měření opakovatelně, s požadovanou přesností.

- Validovat numerické modely na získaných experimentálních datech.

Vzhledem k výše definovaným cílům, autor definoval následující vědeckou otázku, kterou svou prací zodpoví:

„Lze numerickou simulací věrně popsat chování tónových zdrojů hluku, u nichž je zvuk generován nestabilitami ve smykové vrstvě turbulentního proudění?“

Na základě definované vědecké otázky autor předkládá následující pracovní hypotézy:

„Chování tónových zdrojů hluku, u nichž je zvuk generován nestabilitami ve smykové vrstvě, lze věrně popsat numerickou simulací turbulentního proudění, která přímo počítá velké vírové struktury (LES).”

„Chování tónových zdrojů hluku, u nichž je zvuk generován nestabilitami ve smykové vrstvě, nelze věrně popsat numerickou simulací turbulentního proudění, která turbulentní proudění pouze modeluje (URANS).”

3 METODY, GEOMETRIE A MODELÝ

3.1 METODA VYHODNOCENÍ AKUSTICKÉHO SIGNÁLU

Jedním z cílů této práce bylo vyvinout specifické nástroje CAA pro analýzu výsledků, aby výsledky simulací a experimentů byly porovnatelné. Při vývoji tohoto nástroje bylo nutné zohlednit vysokou výpočetní náročnost CFD simulací a dostupnost velmi krátkého časového záznamu akustického signálu o délce T_N pouhých několik desetin sekundy. Po provedení DFT na takto krátkém signálu lze získat jen velmi hrubé frekvenční rozlišení $\Delta f = 1/T_N$. Například pro signál o délce $T_N = 0.125$ s vychází krok frekvenčního rozlišení $\Delta f = 1/0.125 = 8$ Hz. Pokud je analyzován tónový hluk, jako je buffeting, s první rezonanční frekvencí typicky kolem 20 Hz, je frekvenční rozlišení 8 Hz opravdu nedostatečné.

Oproti CAA předepisují normy a postupy pro experimentální akustická měření hodnocení kontinuálního, ustáleného záznamu o délce alespoň 1 minuty, často i více. Takto významná odlišnost v délkách časových záznamů musí zákonitě vést k odlišným metodám pro zpracování signálu.

Metody akustických měření se ustálily na dvou standardních přístupech [14]:

- Konstantní procentuální šířka pásma CPB (the constant percentage bandwidth), přístup realizovaný pomocí pásmových filtrů (propustí);
- Konstantní šířka pásma, přístup realizovaný pomocí analýzy FFT.

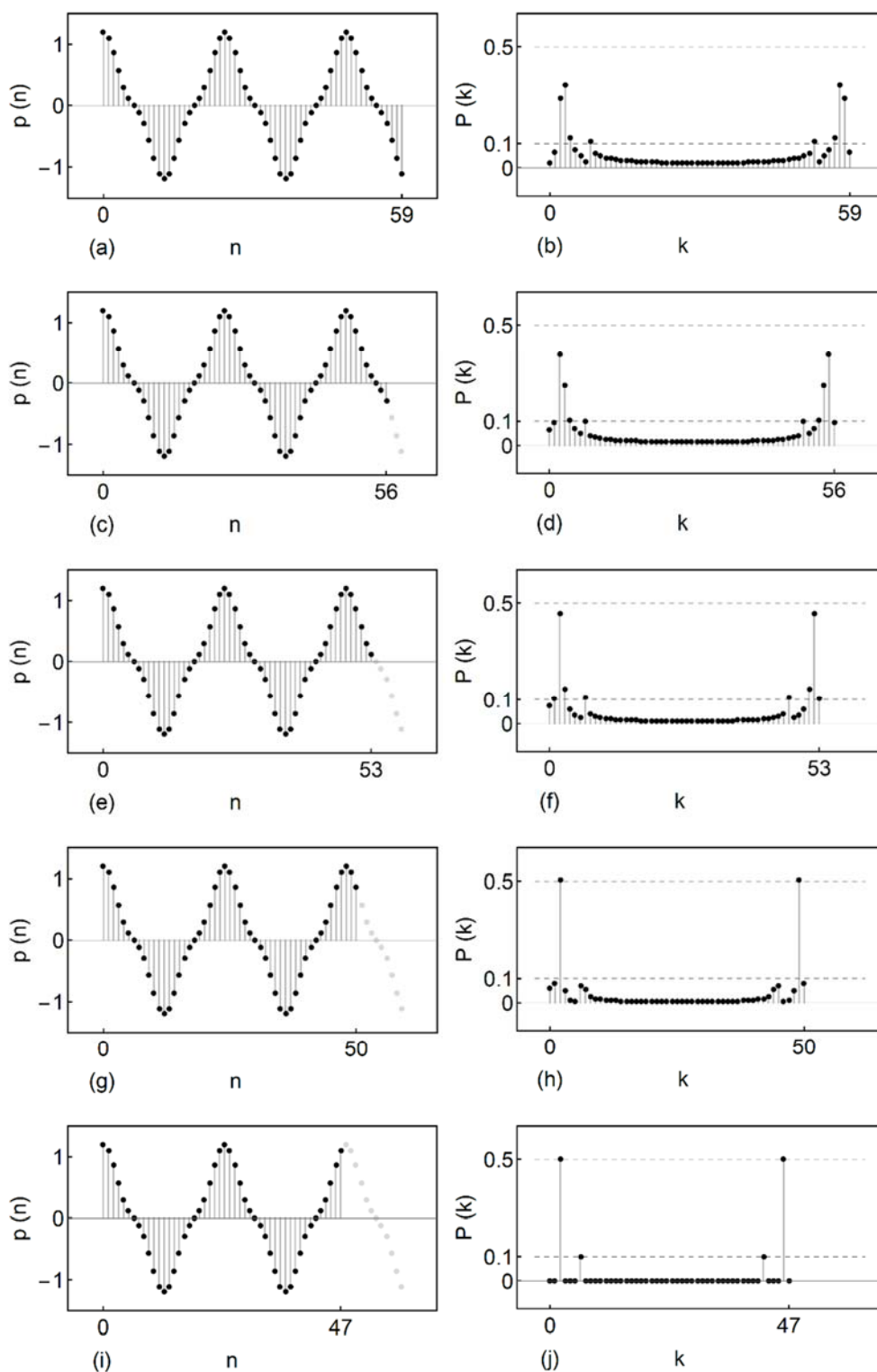
Oba výše uvedené přístupy vyžadují dostatečně dlouhou dobu časového záznamu pro získání výsledků s potřebnou přesností [4].

Autoři článků CAA [1,13,16,17] uvádí, že vyhodnocují tónový hluk pomocí FFT, která vyžaduje signál o délce 2^n vzorků. Tato disertační práce upozorňuje na skutečnost, že to nemusí být výhodné a specifické nástroje CAA pro analýzu, vyvinuté v rámci této práce, používají s výhodou pomalejší DFT.

Vyvinutý nástroj je vhodný především pro analýzu tónových hluků typu buffeting, které mají v ustáleném režimu velmi charakteristické vlastnosti:

- velmi stabilní hodnoty rezonančních frekvencí a jejich amplitud;
- vzdálenosti rezonančních frekvencí jsou významné [11].

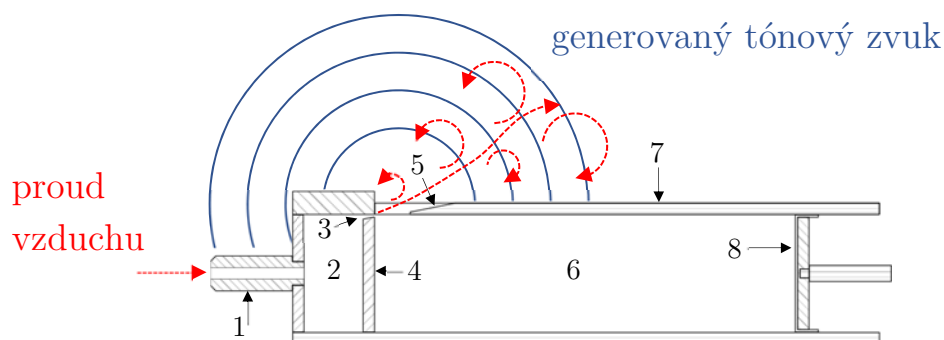
Princip metody postupného přiblížení k hodnotám frekvencí a amplitud tónového signálu, použitý ve vyvinutém specifickém nástroji CAA pro analýzu, je demonstrován na příkladu jednoduchého signálu Obr. 3.1 v analogii s publikací od autorů Oppenheim a Schaffer [10].



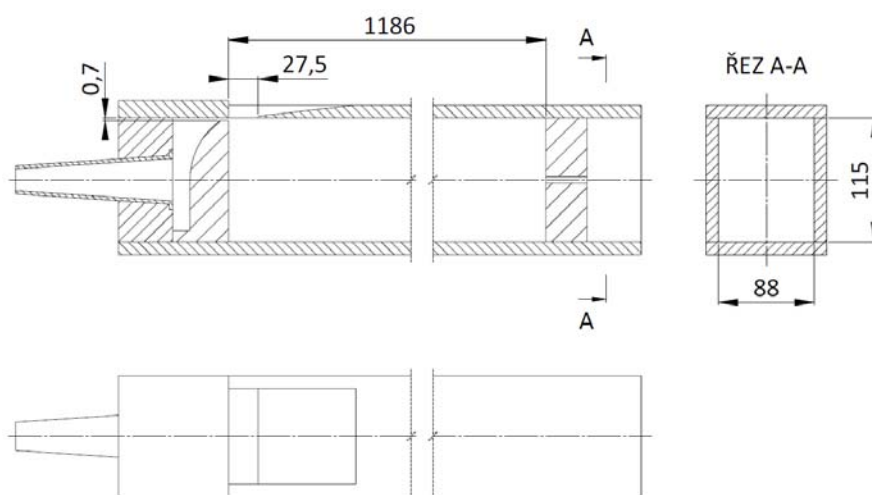
Obr. 3.1 Grafické zobrazení postupu analýzy signálu specifickým nástrojem, který využívá charakteristických vlastností DFT. Graf (a) zobrazuje signál plné délky. Na grafu (b) je zobrazen výsledek DFT analýzy signálu (a). Grafy (c), (e), (g) a (i) zobrazují postupné odebrání vzorků od konce signálu. Na grafech (d), (f), (h) a (j) jsou pak zobrazeny výsledky DFT analýzy signálů (c), (e), (g) a (i) v uvedeném pořadí.

3.2 AEROAKUSTICKÝ OBJEKT

Jako aeroakustický objekt byla vybrána varhanní píšťala. První zmínky o nich lze nalézt již v řecké antické literatuře [2]. Je vhodným zdrojem aeroakusticky generovaných, tónových zvuků a slučují se v ní ty aeroakustické mechanismy, na které je zaměřená tato práce. Je to objekt dostupný, který nemá specifické nároky na energii, prostory ani vybavení. Lze ji vyrobit pro libovolný hudební tón. Generuje vysoké hodnoty akustického tlaku, což je výhodné pro provedení přesných měření mimo akustickou místnost. Bylo vybráno konstrukční řešení píšťaly označované jako „Gedackt“, u kterého jsou fyzikální principy uplatňovány velmi přímočaře viz Obr. 3.2. Výkres s označením důležitých rozměrů zvolené varhanní píšťaly je na Obr. 3.3.

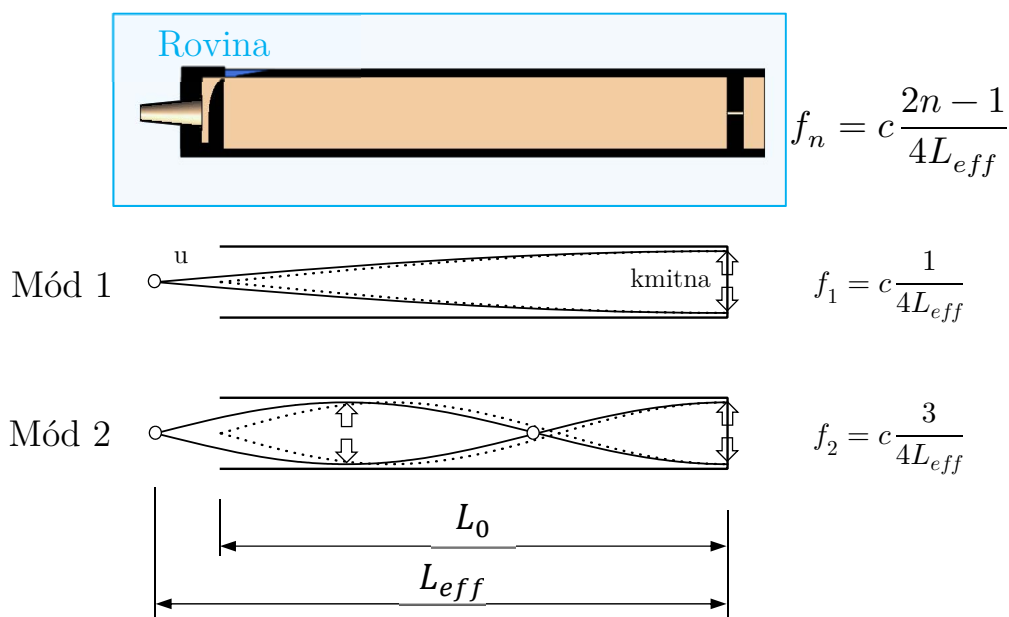


Obr. 3.2 Schematické naznačení mechanismu buzení aeroakustického jevu v píšťale typu Gedackt. Pojmenování jednotlivých částí varhanní píšťaly: 1. noha, 2. komora, 3. spára, 4. jádro, 5. labium, 6. rezonátor, 7. tělo píšťaly, 8. ladítko.



Obr. 3.3 Výkres varhanní píšťaly generující základní tón velké C včetně uvedení hlavních rozměrů.

Rezonátorem varhanní píšťaly je vzduchový sloupec v trubici charakterizovaný řadou podélných vlastních módů viz. Obr. 3.4 Mechanismus vzniku těchto módů je popsán například v publikaci od autora Rossing [12].



Obr. 3.4 Průběh maximálních amplitud podélného, stojatého vlnění po délce varhanní píšťaly pro první dva vlastní módy rezonátoru. K danému módu je na pravé straně uvedena rovnice pro výpočet frekvence daného módu, kde c je rychlost zvuku ve vzduchu.

Oscilace vzduchového sloupce nekončí v místě otevřeného konce trubice rezonátoru, ale až v jisté vzdálenosti za ukončením trubice. Reálná délka rezonátoru je tedy menší než efektivní, neboli akustická délka rezonátoru [7]. Díky tomuto efektu je vůbec možné, aby rezonátor vyzařoval otvorem akustickou energii do okolí. Efektivní délku rezonátoru lze určit například dle literatury [3]. Provedení varhanní píšťaly pro validaci je vidět na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 Vyrobená varhanní píšťala, generující základní tón velké C, specificky navržena pro účely validačních měření. Je vybavena demontovatelným víkem, polohovatelnou zátkou a kovovou, stavitelnou spárou, vyfukující vzduch.

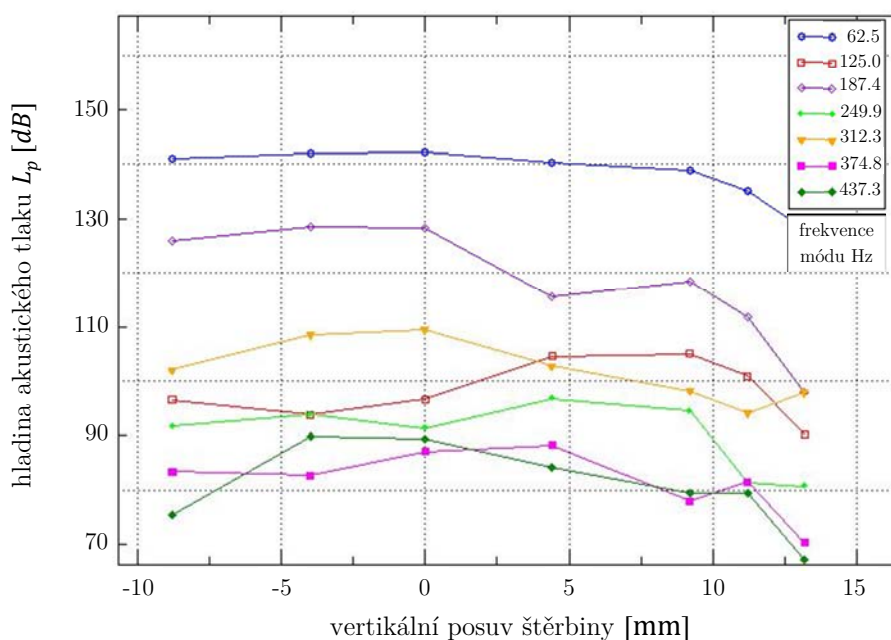
3.3 VALIDAČNÍ MĚŘENÍ

Na specificky navržené konstrukci varhanní píšťaly byla provedena validační měření a výzkum vlivu nastavení geometrie konstrukce viz Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Fotodokumentace z průběhu validačního měření a výzkum vlivu nastavení geometrie konstrukce, které byly prováděny ve venkovním volném prostoru.

Výsledky studie vlivu změny výšky štěrbin vyfukující vzduch jsou na Obr. 3.7. Nejvyšší hladiny akustických tlaků vykazují módy na frekvencích 62.5 Hz a 187 Hz. Proto byly výsledky CDF simulací hodnoceny pro tyto dva módy.



Obr. 3.7 Naměřená závislost hladiny akustického tlaku v monitorovacím bodě $x_{12} = 1.18 m$ na nastavení vertikálního posuvu kovové, výškově stavitelné štěrbin vyfukující vzduch.

Měření probíhala ve venkovním prostoru v podmínkách volného zvukového pole. Čas experimentů byl volen tak, aby byl minimalizován hluk pozadí.

4 DISKUSE NAD VÝSLEDKY

Byly vypočteny a vzájemně porovnány výsledky čtyř různých CFD simulací. Tři modifikací metody simulace velkých vírů LES (Large Eddy Simulation) a jednoho modelu turbulentního proudění, založeného na nestacionárních Reynoldsových, časově průměrovaných, Navierových-Stokesových rovnicích URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes equations).

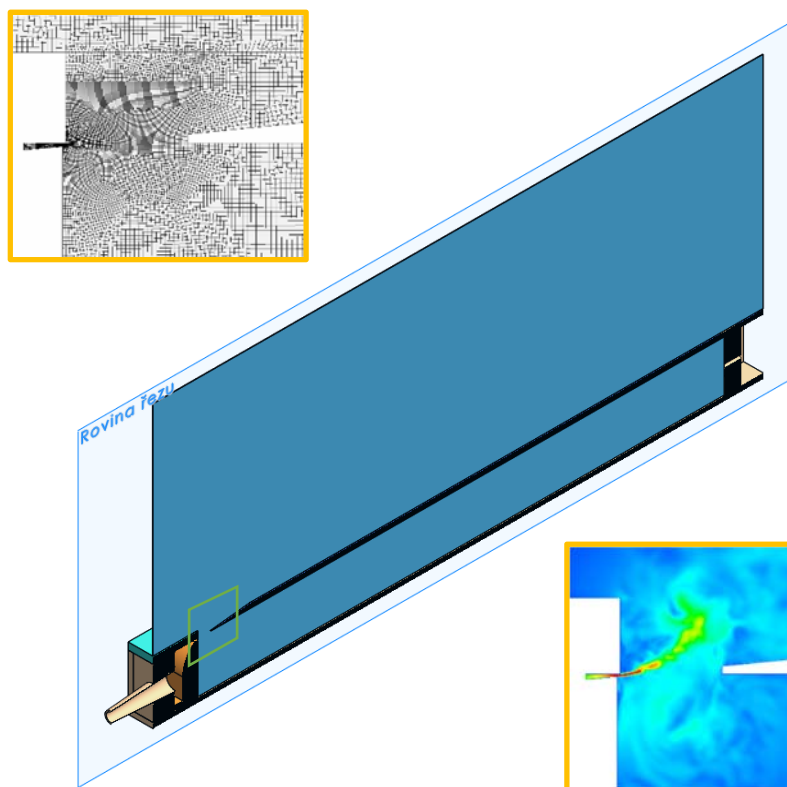
První ze tří testovaných LES metod je v rámci práce označena LES-SMAG. Jedná se de-facto o široce akceptovaný standard, ve kterém LES metoda řeší energii vírů malých měřítek pomocí tzv. subgrid-scale (SGS) modelu turbulence, ve kterém je turbulentní viskozita μ_t určována pomocí Smagorinského modelu. Další varianta LES metody, v této práci označovaná LES-IMPL, je tzv. implicitní LES metoda [9], ve které je řešena eliminace energie vírů malých měřítek volbou vhodného, přiměřeně disipativního, numerického schématu. Dle prostudované literatury bylo pro variantu LES-IMPL vybráno jako vhodné diskretizační schéma van Leer [8]. Třetí v pořadí byla testována varianta označená LES-NONE, která používá málo disipativní schéma z varianty LES-SMAG, ale s vypnutým SGS modelem turbulence. Dá se tedy říci, že se jednalo o variantu implicitní LES metody, ve které prakticky nedocházelo k disipaci energie vírů malých měřítek, respektive o variantu DNS metody na velmi hrubé síti.

CFD simulace URANS, která je v rámci textu označována zkratkou URAS-RNG, používá RNG k-epsilon model turbulence, který publikoval Yakhot a kolektiv [18]. Tento model je založen na metodě tzv. renormalizační skupiny RNG (Re-Normalisation Group) pro renormalizaci Navierových-Stokesových rovnic, což má za cíl zohlednit při modelování turbulence efekt pohybu vírů menších měřítek. Pro variantu URAS-RNG zkoumající vhodnost použití URANS přístupu pro CAA simulace byl zvolen RNG k-epsilon model turbulence na základě jeho používání ze strany respektovaných autorů v CFD simulacích aerodynamicky indukovaných hluků v kavitách [5,6,15].

Diskutované dílčí výsledky výzkumu se postupně skládají do celkového obrazu, který v rámci diskuse výsledků postupně sestavuje závěrečnou odpověď na definovanou vědeckou otázku a předložené pracovní hypotézy.

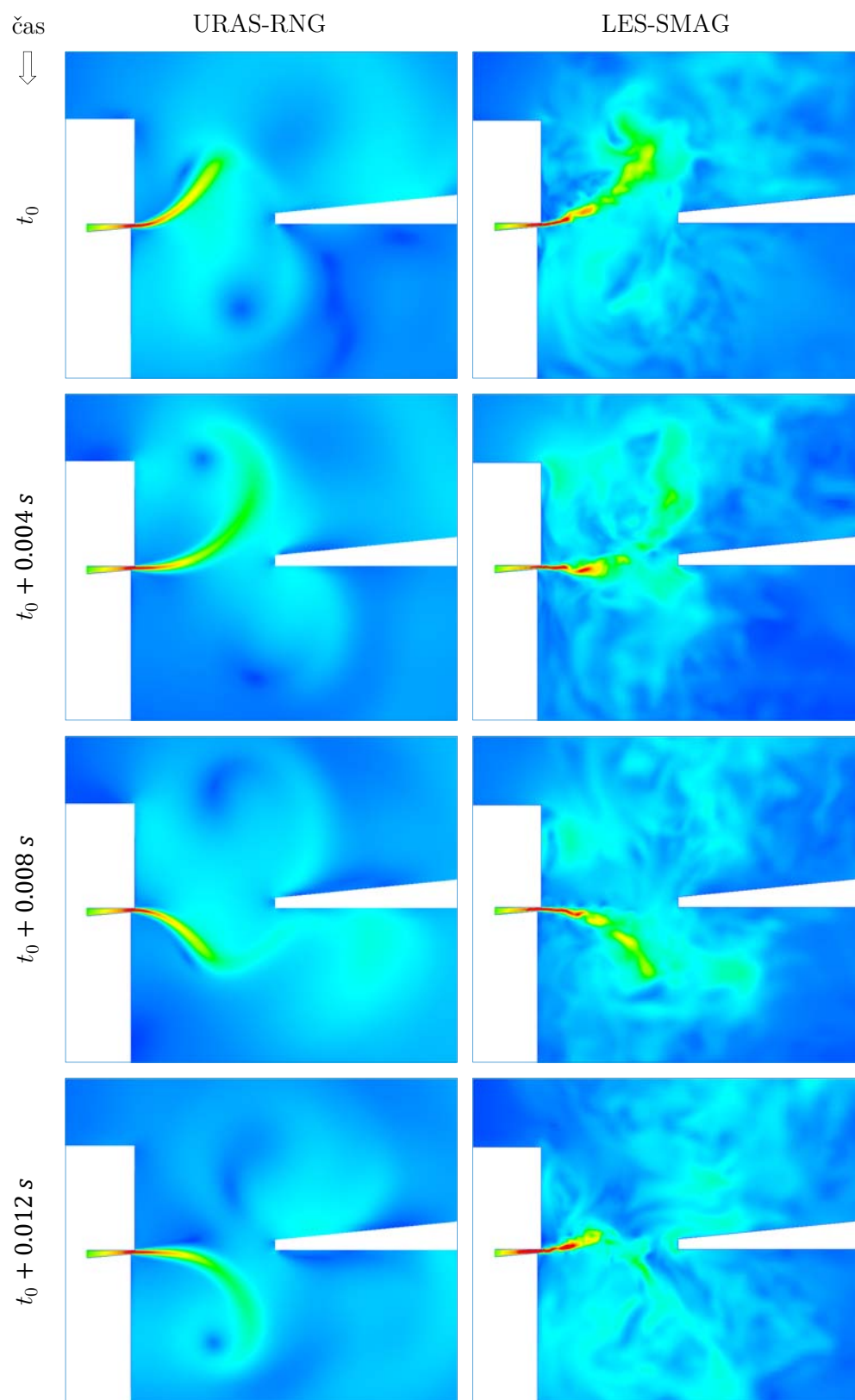
4.1 VYPOČTENÁ POLE RYCHLOSTÍ

Model turbulence vždy významně ovlivňuje charakter rychlostního pole, které je výstupem ze CFD simulace. Vypočtené obrazy rychlostních polí se proto významně liší nejen mezi URANS a LES metodou, ale také mezi modifikacemi LES metod navzájem. Vypočtené hodnoty rychlostních polí jsou zobrazeny ve formě kontur absolutních hodnot rychlostí na rovinném řezu výpočtové sítě, umístěném v rovině symetrie modelu varhanní píšťaly, který pokrývá oblast zdroje, ve které je aeroakustický jev generován, viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Řez výpočtovou sítí, na které jsou zobrazeny pole rychlostí. Je umístěn v rovině symetrie modelu varhanní píšťaly. Zobrazený výřez pokrývá nejbližší okolí úseku mezi spárou vyfukující proud vzduchu a labiálou.

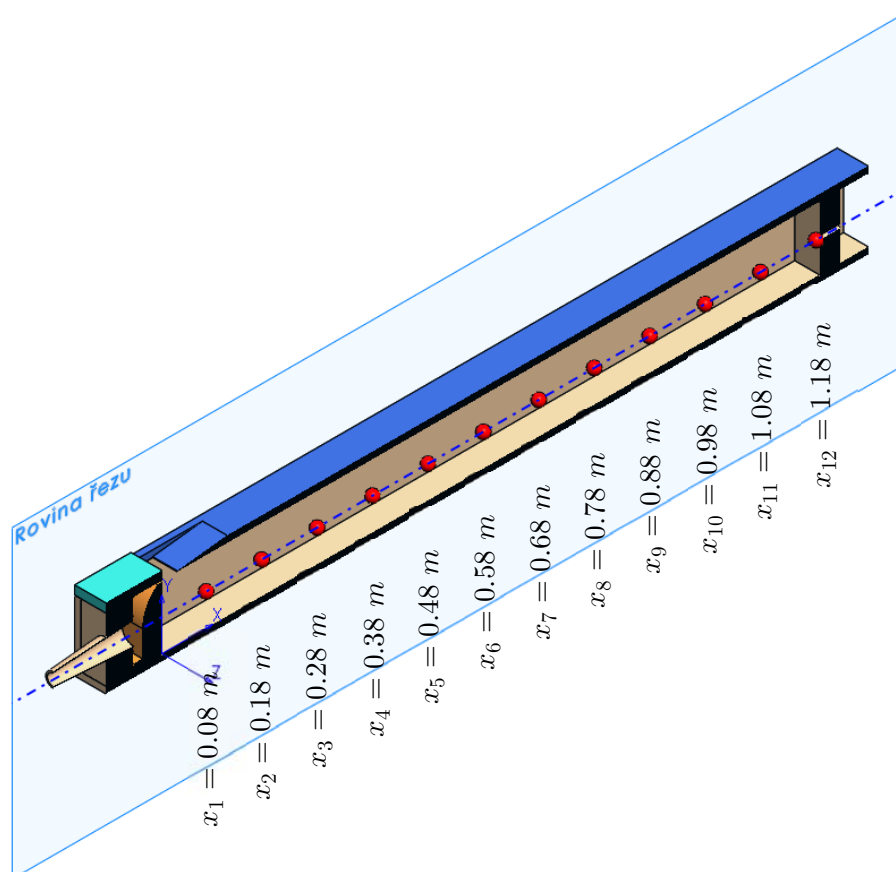
Z vizuálního porovnání rychlostních polí URAS-RNG a LES-SMAG viz Obr. 4.2 je vidět, že zatímco rychlostní pole URAS-RNG, vypočtené časově průměrovanými, Navierovými-Stokesovými rovnicemi, působí nepřírozně uhlazeně a uměle, LES SMAG vykazuje očekávaný charakter chaotického rozpadu vírových struktur, který lze pozorovat v realitě. Toto porovnání naznačuje, že LES-SMAG bude zřejmě věrněji simulovat přirozené chování turbulentního proudění než URAS-RNG. Oba přístupy však dokáží simulovat aeroakustický jev s frekvencemi a amplitudami blízkými reálné varhanní píšťale.



Obr. 4.2 Kontury absolutních hodnot rychlostí variant URAS-RNG a LES-SMAG zobrazené ve čtyřech po sobě jdoucích časových okamžicích.

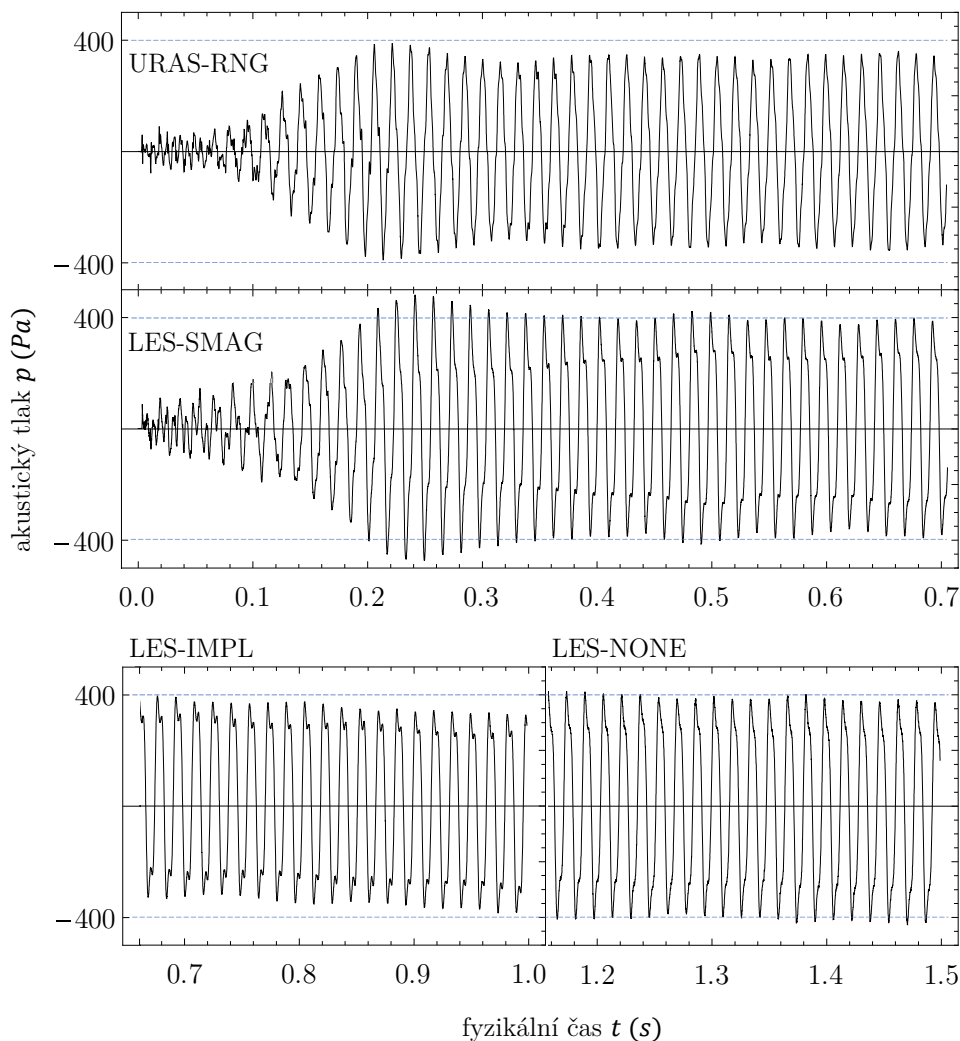
4.2 VYPOČTENÝ AKUSTICKÝ SIGNÁL

V průběhu CFD simulací byly monitorovány a zaznamenávány fluktuace tlaku ve 12 vybraných bodech výpočtové sítě. Rozmístění monitorovacích bodů po délce varhanní píšťaly je znázorněno na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Znázornění polohy monitorovacích bodů, na řezu varhanní píšťalou. V těchto bodech byly při CFD simulaci zaznamenávány fluktuace tlaku. Body leží na přímce rovnoběžné s osou x souřadného systému modelu, která prochází souřadnicemi $y = 0.0575$ m a $z = 0$. Jsou umístěny v konstantním rozestupu od sebe 0.1 m.

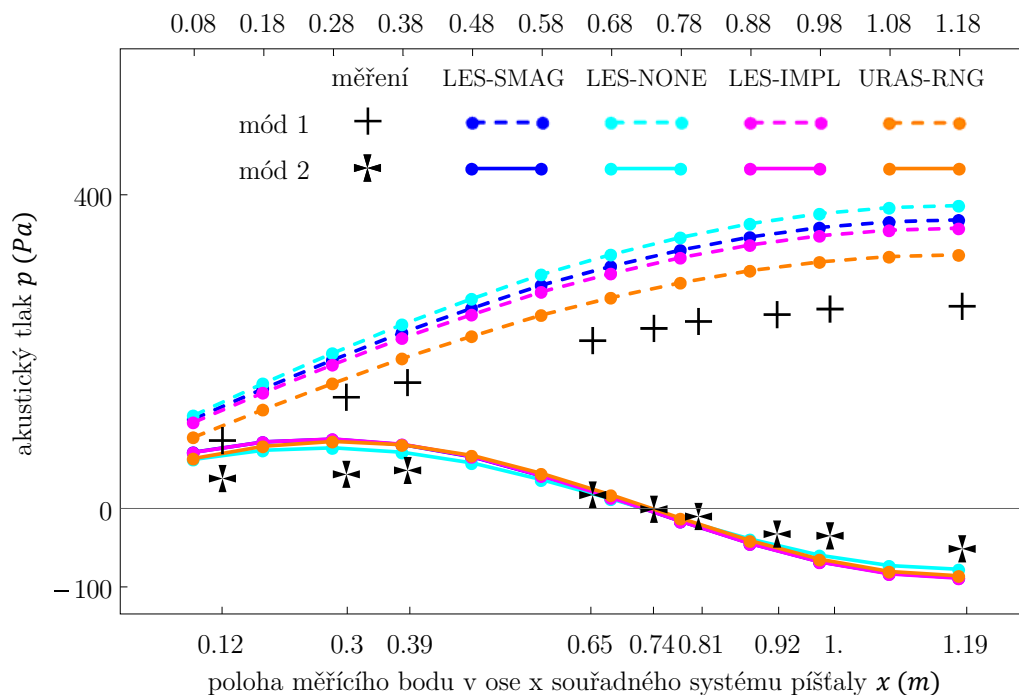
V průběhu nestacionárních CFD simulací byl časový vývoj amplitud fluktuací tlaku u všech variant velmi podobný. V úvodu simulace se hodnota amplitudy fluktuací tlaku postupně zvyšovala, až dosáhla svého maxima při cca 0.25 s fyzikálního času. Z maximální hodnoty se amplituda následně ustalovala. Signál se jeví jako ustálený od cca 0.50 s fyzikálního času. Porovnání časového vývoje amplitud fluktuací tlaku, respektive akustického signálu v monitorovacím bodě $x_{12} = 1.18$ m je zobrazeno na Obr. 4.4. U variant URAS-RNG a LES-SMAG je časový vývoj akustického signálu zobrazen od počátku CFD simulace, aby bylo možné demonstrovat celý vývoj aeroakustického jevu v průběhu nestacionární simulace. U variant LES-IMPL a LES-NONE je zobrazena ustálená část signálu.



Obr. 4.4 Časový vývoj amplitud akustického signálu zaznamenaný v monitorovacím bodě $x_{12} = 1.18$ m. U variant URAS-RNG a LES SMAG je zobrazen časový vývoj od začátku CFD simulace. U variant LES-IMPL a LES-NONE jen ustálená část signálu.

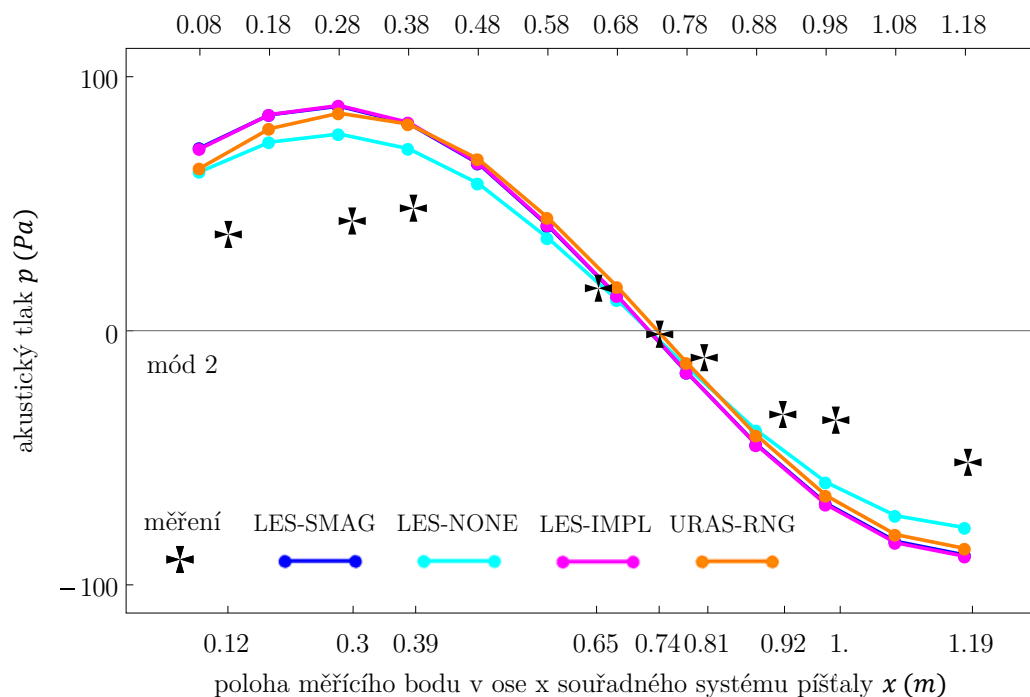
Z vizuálního porovnání vypočtených fluktuací tlaku na Obr. 4.4 je možno konstatovat, že se podařilo úspěšně vybudit stabilní, akustický, tónový signál ve všech simulovaných variantách. Jak je vidět na obrázcích, tvar i amplitudy signálů jsou si velmi podobné, přestože se v každé variantě mírně liší. Toto je způsobeno různým posuvem fáze mezi signály módu 1 a módu 2. U varianty LES-IMPL je patrné, že signál sice má ustálenou hodnotu amplitudy i frekvence, ale že střední hodnota signálu se během výpočtu mírně posouvá. Může to souviset s výskytem drobných nefyzikálních jevů, které se vyskytovaly během simulace ve variantě LES-IMPL.

Pro kvantitativní porovnání výsledků bylo nutné signál ze CFD simulací rozložit na jednotlivé harmonické složky a zjistit frekvence a amplitudy těchto složek. To bylo provedeno pomocí specifického nástroje pro analýzu výsledků CAA modelů, který byl vyvinut a naprogramován v rámci této dizertační práce. Analýza vypočteného signálu byla provedena ve všech dvanácti monitorovacích bodech umístěných po délce varhanní píšťaly viz Obr. 4.3. V každém bodě byla vypočtena hodnota maximální amplitudy tlaku pro první a druhý mód rezonátoru. Průběh hodnot pro mód 1 je vyneseny v grafu Obr. 4.5.



Obr. 4.5 Graf průběhu maximálních hodnot akustického tlaku (amplitud) po délce varhanní píšťaly pro první a druhý mód rezonátoru. V grafu jsou vyneseny hodnoty získané pro všechny varianty CFD simulací společně s hodnotami získanými z validačního měření.

Průběh hodnot pro mód 2 je vyneseny v grafu Obr. 4.6. Vypočtené hodnoty velmi dobře odpovídají očekávanému průběhu stojatého vlnění po délce varhanní píšťaly dle Obr. 3.4. Z obdržných výsledků CFD simulací je zřejmé, že se ve všech variantách podařilo získat kvalitativně správné výsledky modelovaného aeroakustického jevu, zejména očekávaný průběh maximálních amplitud tlaku po délce varhanní píšťaly, a to v případě obou módů. Hodnoty akustických tlaků ze CFD simulací jsou však ve všech případech zřetelně vyšší než hodnoty získané z validačního měření.



Obr. 4.6 Graf průběhu maximálních hodnot akustického tlaku (amplitud) po délce varhanní píšťaly pouze pro druhý mód rezonátoru. V grafu jsou vyneseny hodnoty získané pro všechny varianty CFD simulací společně s hodnotami získanými z validačního měření.

Dle definovaných pracovních hypotéz, by měly LES metody věrněji simulovat aeroakustický jev generovaný v turbulentním proudění než URANS metody. Tento nesoulad výsledků simulací s předpokládaným chováním použitých přístupů k modelování turbulence zavedl výzkum na nějaký čas do slepé uličky. Tento nesoulad mezi obdržnými výsledky a pracovními hypotézami byl také hlavní důvod přenesení CFD simulací z komerčního CFD kódu FLUENT na otevřenou platformu OpenFOAM. V rámci hledání příčin tohoto nesouladu bylo provedeno velké množství práce při výzkumu nastavení numerických modelů, které posunuly získané poznatky na významně vyšší úroveň. Oproti CFD modelům v kódu FLUENT, předloženým při pojednání ke státní doktorské zkoušce, jsou tedy aktuální CFD modely v otevřeném kódu OpenFOAM propracované na podstatně detailnější úrovni.

Příčina nesouladu ve výsledcích byla však mnohem prozaičtější než nedokonalosti numerického modelu a numerických schémat a je diskutována v následující kapitole.

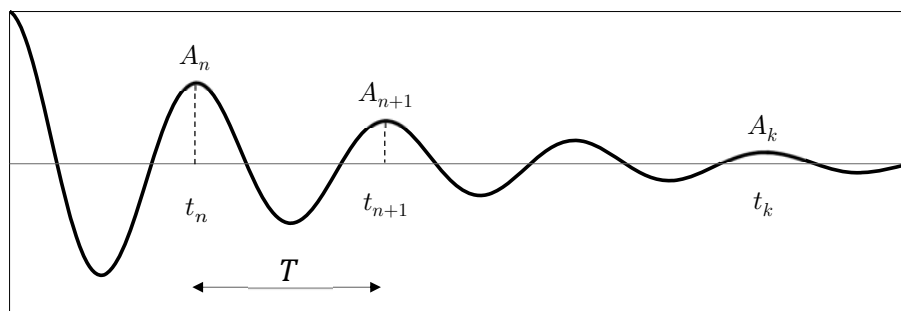
4.3 VLIV TLUMENÍ NA GENEROVANÝ AKUSTICKÝ SIGNÁL

Experimentální model varhanní píšťaly byl vyroben ze smrkového dřeva. Při hledání příčin rozporu mezi výsledky CFD simulací a validačního měření logicky vyvstala otázka: „Jaký vliv na výsledky má strukturální tlumení píšťaly?“

Na stěny modelu pro CFD simulace nelze standardně strukturální tlumení aplikovat. Již existují CFD kódy umožňující postihnout interakci proudící tekutiny s poddajnou strukturou tzv. FSI (Fluid–structure interaction). Tyto kódy však mají pro řešení fluidní části stále velmi omezenou knihovnu turbulentních modelů. Buď řeší pouze nestacionární Eulerovy rovnice, nebo nestacionární Reynoldsovy, časově průměrované, Navierovy-Stokesovy rovnice pomocí URANS, nikoli pomocí LES metod.

4.3.1 Měření hodnoty tlumení materiálu varhanní píšťaly

U tlumeného harmonického signálu amplituda s časem klesá viz Obr. 4.7.



Obr. 4.7 Průběh tlumeného harmonického signálu s amplitudami a jim příslušejícími časy.

Útlum λ je definovaný jako podíl hodnot dvou po sobě jdoucích amplitud se stejným znaménkem, vzdálených od sebe o jednu periodu T . Popisuje jej rovnice (4.1).

$$\lambda = \frac{A(t)}{A(t + T)} = e^{bT} \quad (4.1)$$

Kde b je koeficient útlumu tlumených harmonických kmitů. Logaritmický dekrement útlumu je pak roven přirozenému logaritmu útlumu viz rovnice (4.2).

$$\delta = \ln \lambda = bT \quad (4.2)$$

Specificky navržená varianta varhanní píšťaly pro validační měření má odnímatelné víko. Logaritmický dekrement útlumu byl stanovený měřením kmitání tohoto víka, respektive spektrální analýzou časového záznamu akustické odezvy na krátkodobý impulz od úderu paličkou na plochu víka viz Obr. 4.8.



Měřicí řetězec:

Mikrofon:

BehringerECM 8000

zvuková karta: EDIROL

AudioCaptur FA-101

notebook:

Lenovo Thinkpad R61

software:

Audacity verze 1.2.6

Matlab verze 7.0 R14

skript Matlab LDDamp [2]

Obr. 4.8 Fotodokumentace z měření logaritmického dekrement útlumu víka varhanní píšťaly pořízená v laboratořích Mendelovy univerzity v Brně.

Statisticky zpracované výsledky měření logaritmického dekrementu útlumu pro konstrukci víka varhanní píšťaly jsou uvedené v Tab. 4.1.

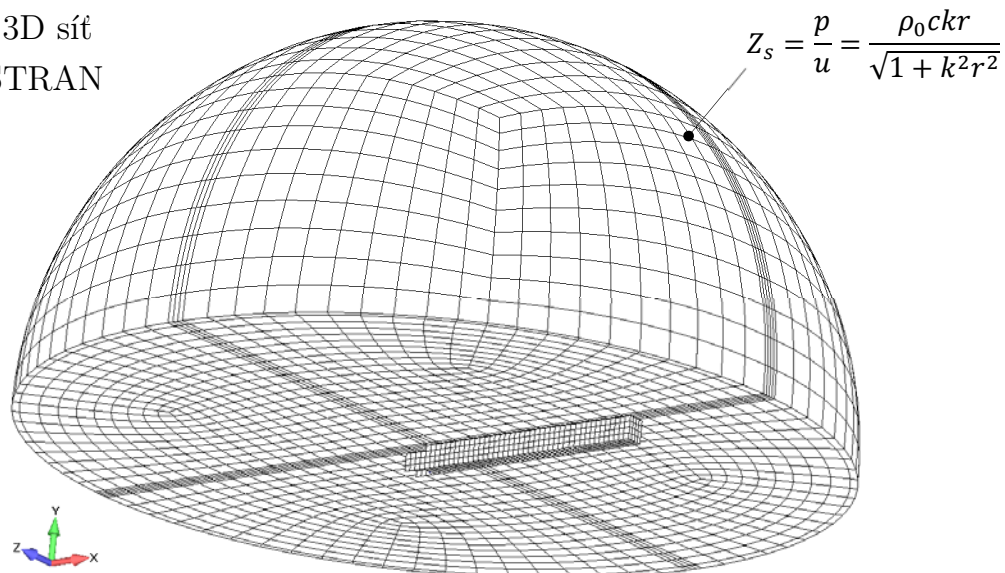
	83 Hz	393 Hz	595 Hz	802 Hz	83 Hz	393 Hz
n	δ_n	δ_n	δ_n	δ_n	$(X_n - \bar{X})^2$	$(X_n - \bar{X})^2$
pořadí	-	-	-	-	-	-
1	0.0160	0.0390	0.0220	0.0380	4.41E-06	2.50E-07
2	0.0190	0.0380	0.0240	0.0380	8.10E-07	2.25E-06
3	0.0230	0.0390	0.0220	0.0360	2.40E-05	2.50E-07
4	0.0130	0.0430	0.0200	0.0360	2.60E-05	1.23E-05
5	0.0140	0.0410	0.0250	0.0370	1.68E-05	2.25E-06
6	0.0250	0.0410	0.0200	0.0360	4.76E-05	2.25E-06
7	0.0160	0.0380	0.0260	0.0370	4.41E-06	2.25E-06
8	0.0200	0.0340	0.0220	0.0370	3.61E-06	3.02E-05
9	0.0240	0.0410	0.0270	0.0360	3.48E-05	2.25E-06
10	0.0110	0.0410	0.0230	0.0360	5.04E-05	2.25E-06
$E(X)$	0.0181	0.0395	bodový odhad střední hodnoty $E(X) = \bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$			
$D(X)$	2.37E-05	6.28E-06	bodový odhad rozptylu $D(X) = \frac{\sum (X_n - \bar{X})^2}{n-1}$			
$\sigma(X)$	4.86E-03	2.51E-03	bodový odhad směrodatné odchylky $\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$			

Tab. 4.1 Úplný soubor dat z měření logaritmického dekrementu tlumení. Pro vlastní módy víka na frekvencích 83 Hz a 393 Hz byly provedené bodové odhady statistických parametrů střední hodnoty, rozptylu a směrodatné odchylky. Statistické vyhodnocení bylo provedeno za předpokladu, že jsou data řízena symetrickým normálním rozdělením.

4.3.2 Analýza metodou konečných prvků

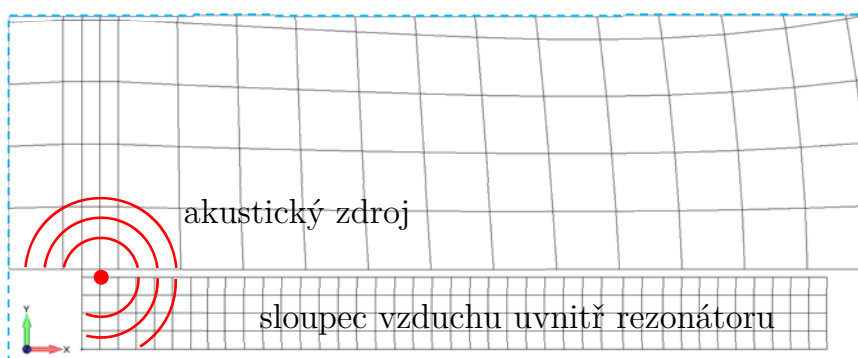
Kvalitativní ohodnocení vlivu strukturálního tlumení na amplitudy akustického tlaku bylo provedeno na zjednodušeném FSI modelu viz Obr. 4.9. Aeroakustický zdroj hluku byl nahrazen ekvivalentním akustickým zdrojem. Tato analýza nezohledňuje silné interakce mezi aerodynamickým a akustickým polem, ale umožnila ohodnotit vliv tlumení dřevěné konstrukce.

objemová 3D síť
MSC.NASTRAN



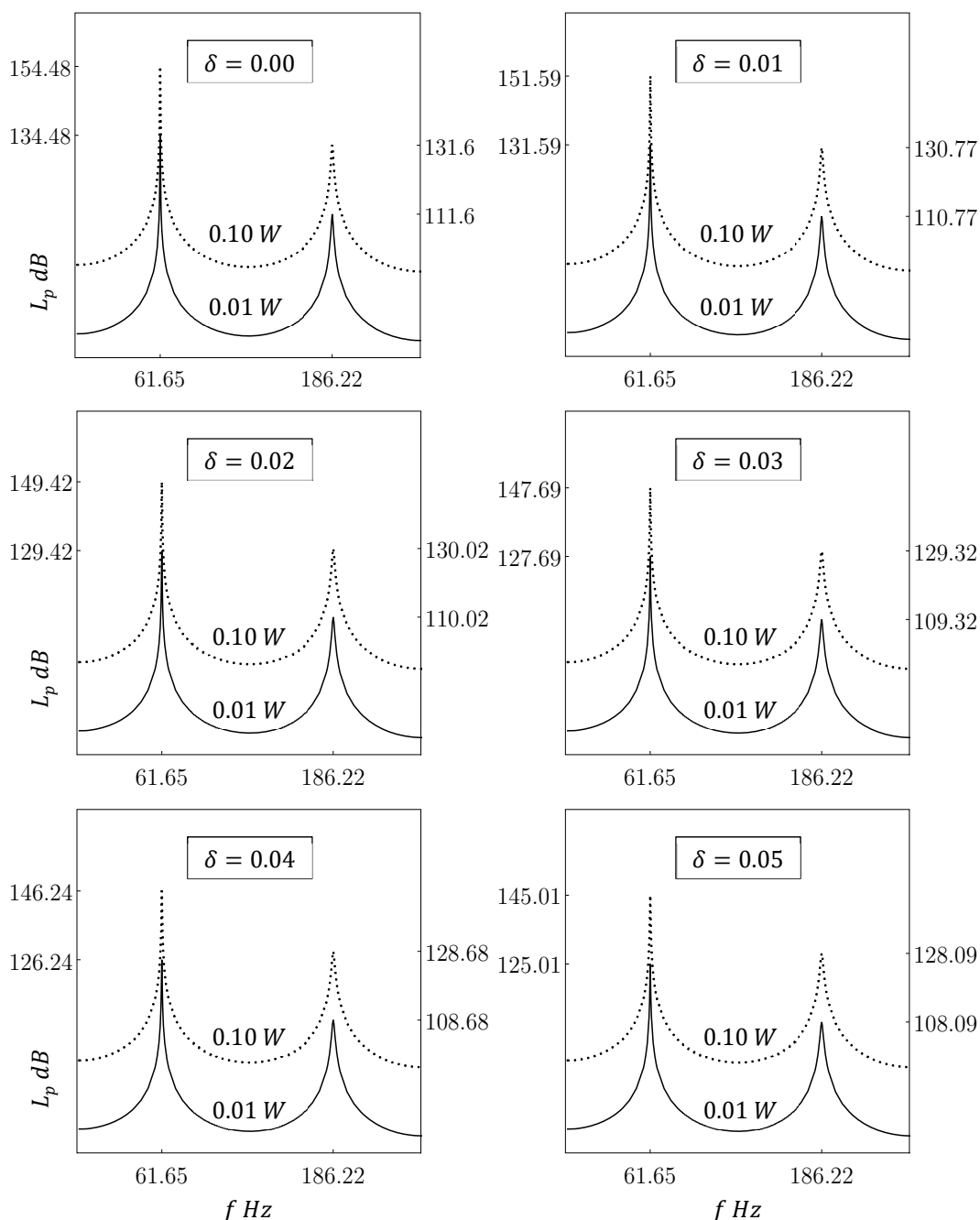
2D řez objemovou sítí
v rovině $xy, z = 0$

zvětšený detail sítě



Obr. 4.9 Zobrazení výpočtové sítě, na které byla prováděna frekvenční analýza metodou konečných prvků v kódu MSC.NASTRAN na zjednodušeném FSI modelu varhanní píšťaly.

Byla provedena frekvenční analýza v rozsahu $f < 2; 250 > Hz$ pro pět různých hodnot strukturálního tlumení odpovídajících hodnotám logaritmického dekrementu $\delta < 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 >$. Analýza byla prováděna s frekvenčním krokem $\Delta f = 5 Hz$. V blízkosti vlastních módů byl krok zmenšen na $\Delta f = 0.5 Hz$. Byly zaznamenány hodnoty hladin akustického tlaku L_p v monitorovacím bodě na souřadnici $x_{12} = 1.18 m$. Výsledky jsou na Obr. 4.10.

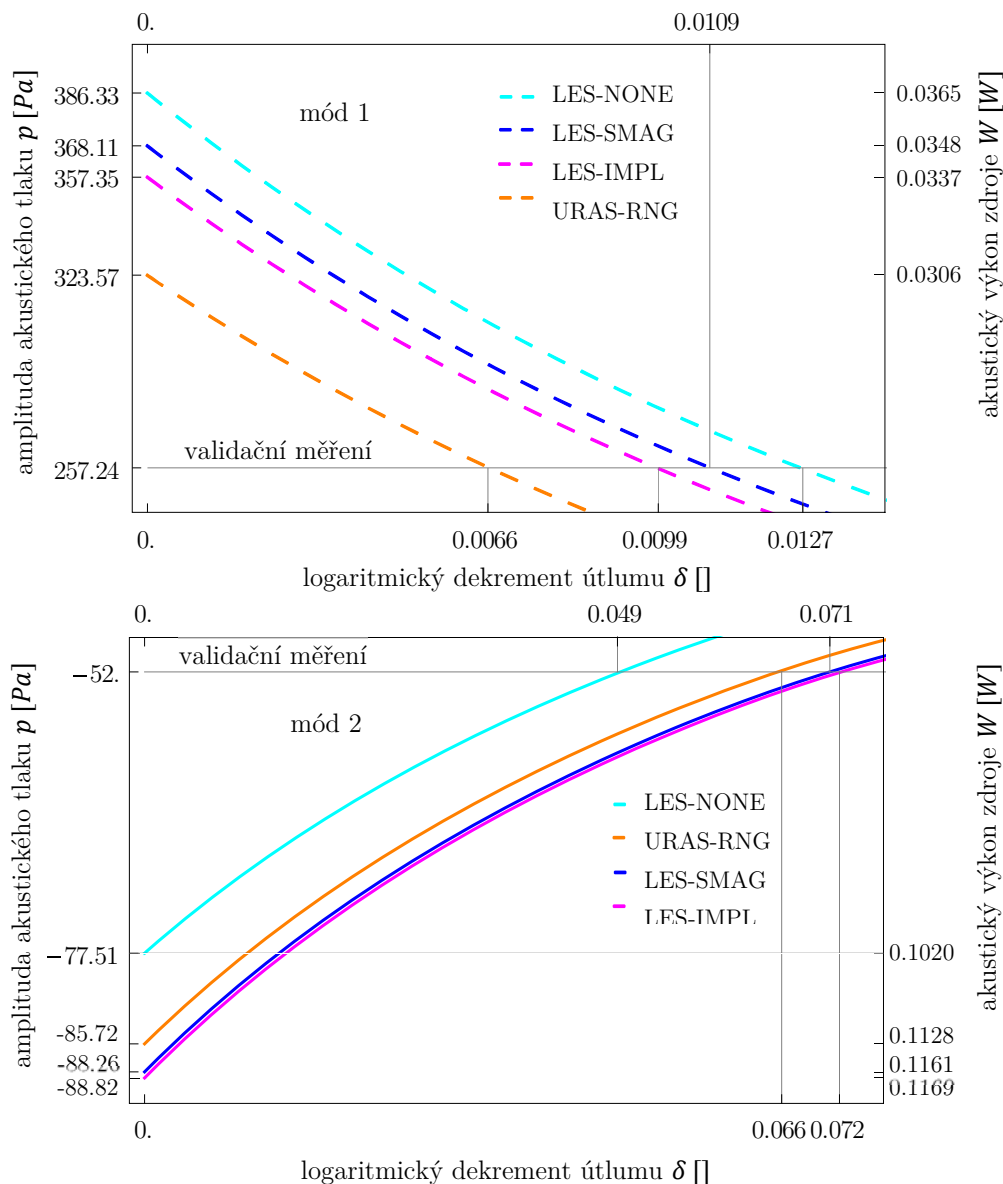


Obr. 4.10 Výsledky frekvenční analýzy varhanní píšťaly provedené v kódu MSC.NASTRAN. Frekvenční odezva soustavy vynesena graficky v logaritmických jednotkách decibel.

4.3.3 Vyhodnocení vlivu tlumení na generovaný akustický signál

Z výsledků frekvenčních analýz byla sestavena funkční závislost amplitudy akustického tlaku na zadané hodnotě strukturálního tlumení viz Obr. 4.11, jejímž posláním je určit, zda je možné změnit hodnoty amplitud akustických tlaků, vypočtených v CFD simulacích, na hodnoty odpovídající validačnímu měření zadáním strukturálního tlumení s realistickou hodnotou.

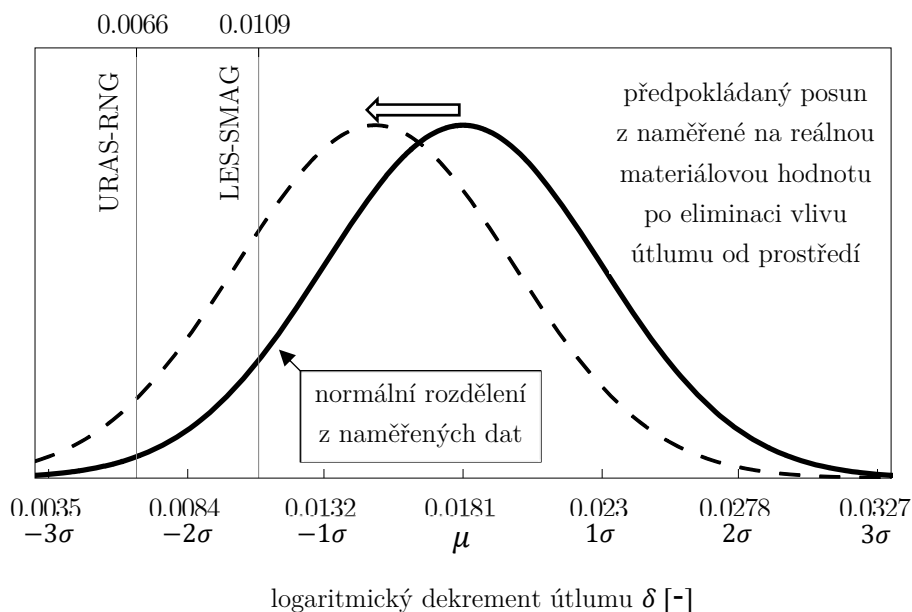
Sestavená funkční závislost naznačuje, že hodnota strukturálního tlumení rezonátoru má významný vliv na generované amplitudy akustického tlaku. Bez zohlednění strukturálního tlumení mají výsledky CFD simulací významně vyšší hodnoty amplitud akustického tlaku než odpovídá realitě.



Obr. 4.11 Mapa funkčních závislostí modifikující hodnoty amplitud akustického tlaku ze CFD simulací o vliv tlumení zadávaného jako logaritmickej dekrement útlumu na konstrukci rezonátoru varhanní píšťaly. Tyto grafy byly sestaveny na základě výsledků frekvenčních analýz provedených v kódu MSC.NASTRAN. Grafy ukazují změnu amplitudy akustického tlaku v monitorovacím bodě $x_{12} = 1.18 \text{ m}$. Na pravé straně grafu je uveden akustický výkon zdroje, kterým musel být buzen model pro frekvenční analýzu, aby bylo dosaženo na modelu bez strukturálního tlumení stejné amplitudy jako v CFD simulaci.

CFD simulace, ve kterých je turbulentní proudění modelováno vhodně nastavenými LES metodami (varianty LES-SMAG a LES-IMPL), poskytují výsledky, které po zapracování FSI mohou věrně simulovat aeroakustický jev. CFD simulace URAS-RNG s časově průměrovaným modelem turbulence je oproti vhodně nastaveným LES metodám ztluštěná. Toto se projevuje zejména ve výsledcích módu 1, kde pro dosažení shody s validačním měřením je nutné u varianty URAS-RNG na konstrukci rezonátoru aplikovat nereálně malou hodnotu tlumení $\delta = 0.0066$. Ve variantách LES-SMAG a LES-IMPL jsou pro dosažení shody s validačním měřením aplikovány již poměrně realistické hodnoty $\delta = 0.0109$ a $\delta = 0.0099$, při porovnání s hodnotou $\delta = 0.0181$, která byla určena jako bodový odhad střední hodnoty z měření logaritmického dekrementu útlumu víka varhanní píšťaly pro mód 1 při frekvenci 83 Hz.

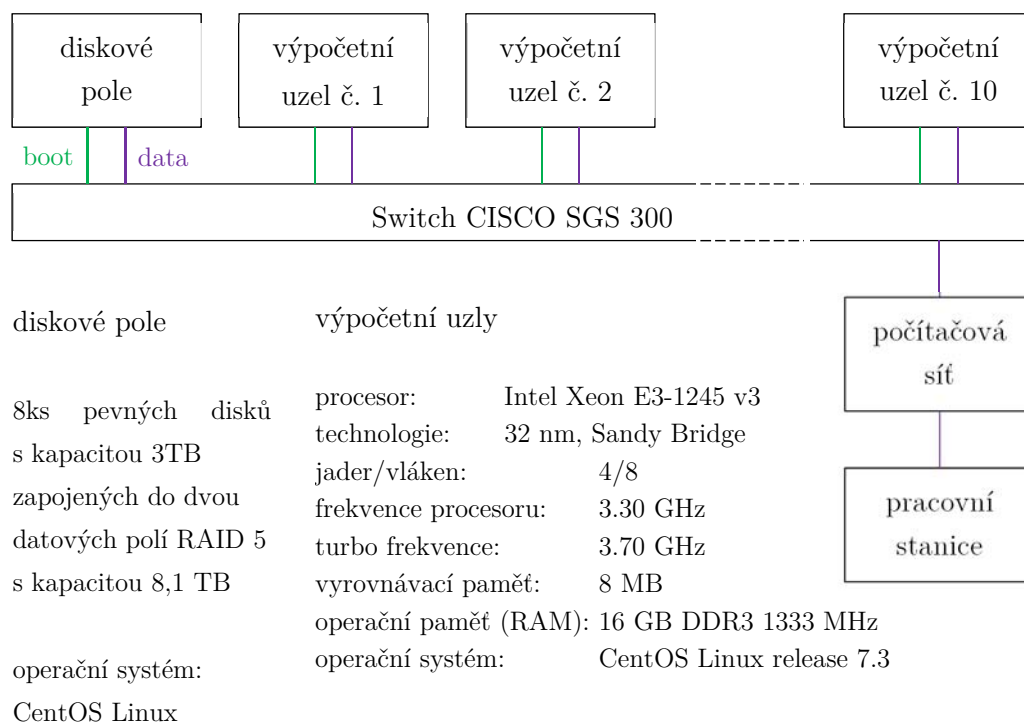
Logaritmický dekrement útlumu změřený akustickou metodou zahrnuje strukturální tlumení víka i tlumení od okolního prostředí (vzduchu). Má tedy vyšší hodnotu než je jen izolovaná hodnota strukturálního tlumení víka. Získaný bodový odhad střední hodnoty útlumu musí být tedy při odhadu strukturálního tlumení snížen. Tím se přiblíží hodnotám určeným ve frekvenční analýze, což svědčí ve prospěch hypotézy, že věrných výsledků lze dosáhnout pomocí vhodně nastavených LES metod. Uvedené souvislosti jsou lépe zřetelné při vynesení dat z Tab. 4.1 do grafu hustoty normálního rozdělení pravděpodobnosti viz Obr. 4.12.



Obr. 4.12 Graf hustoty normálního rozdělení pravděpodobnosti vyhotovený pro naměřená data logaritmického dekrementu útlumu na víku varhanní píšťaly viz Tab. 4.1.

4.4 NÁROKY NA VÝPOČETNÍ VÝKON CFD SIMULACÍ

CFD simulace všech čtyř úspěšných variant byly provedené na totožné výpočetní platformě, aby bylo možné korektně porovnat nároky jednotlivých variant, respektive jednotlivých výpočtových modelů na výpočetní výkon. Tato výpočetní platforma se sestávala z deseti dedikovaných výpočetních uzlů a jednoho diskového pole, které byly vzájemně propojené rychlou sítí Ethernet dle standardu IEEE 802.3ab přes switch s rychlostí přenosu dat 1 Gbit/s na každém připojovacím portu. Výpočetní uzly nejsou vybavené vlastními pevnými disky s operačním systémem, ale zavádějí operační systém (provádějí boot) z centrálního diskového pole. Zapojení separátních částí této výpočetní platformy do jednoho funkčního celku je schematicky znázorněné na Obr. 4.13. Výpočty byly spouštěné, ovládané a monitorované prostřednictvím pracovní stanice, která byla zapojena do výpočtové platformy přes počítačovou síť.



Obr. 4.13 Schéma zapojení separátních částí výpočetní platformy do jednoho funkčního celku.

V Tab. 4.2 jsou uvedené časy potřebné pro výpočet jednoho časového kroku a dále výpočtu o délce jedné sekundy fyzikálního času. Jak z tabulky plyne, doba na získání i takto krátkého záznamu signálu je enormní. Je nutné vzít v úvahu i skutečnost, že než se amplitudy akustického tlaku ve výpočtu ustálí, nelze minimálně úvodních 0.35 sekund pro vyhodnocení hladin akustických

tlaků použít, takže je nutné do celkového času výpočtu začlenit i tuto úvodní, neúčinnou část výpočtu.

varianta	potřebný výpočetní čas t na použité výpočetní platformě			
	$\frac{t_{\text{varianta}} \cdot 100}{t_{\text{LES-SMAG}}}$	časový krok	výpočet 1 s fyzikálního času	
	%	sekund	sekund	dnů
LES-NONE	129	2.89	378 797	4.38
LES-SMAG	100	2.25	294 482	3.41
LES-IMPL	96	2.15	281 915	3.26
URAS-RNG	163	3.66	479 745	5.55

Tab. 4.2 Tabulka nároků CFD simulací na strojový čas pro každou provedenou variantu.

Z porovnání nároků na strojový čas výpočtu v Tab. 4.2 je patrné, že standardní numerické schéma použité ve variantě LES-SMAG je z hlediska výpočetních nároků velmi efektivní. Je zajímavé, že odstranění části numerického schématu z varianty LES-SMAG, která slouží pro eliminaci vírů malých měřítek, čímž vzniká varianta LES-NONE, způsobí zvýšení strojového času cca o 29 %. Takto upravené numerické schéma sice vynechává výpočet některých procedur, čímž je spořena jistá část strojového času, na druhé straně toto zjednodušené numerické schéma vyžaduje celkově vyšší počet iterací pro snížení hodnot reziduí na úroveň zkonvergovaného řešení. Přestože varianta LES-NONE není korektní LES metodou, je ve své podstatě implicitní variantou LES metody, která používá nedostatečně disipativní numerické schéma pro prostorovou diskretizaci.

Nároky varianty LES-IMPL na výpočetní výkon jsou o něco menší než varianty LES-SMAG, kdy nároky na strojový čas jsou nižší cca o 4%.

Výpočet turbulentním modelem URANS ve variantě URAS-RNG vykázal navýšení nároků na strojový čas oproti variantě LES-SMAG cca o 63 %. Vzhledem k tendenci URANS snižovat amplitudy akustického signálu oproti LES metodám při vyšších nárocích na výpočetní výkon, není třeba URANS dále komentovat.

5 ZÁVĚR

V úvodní části výzkumné činnosti byly autorem charakterizovány a kategorizovány zdroje aeroakustických hluků a do hloubky prostudovány rezonanční mechanismy, které se uplatňují u hluků generovaných nestabilitami ve smykové vrstvě. Pro každý rezonanční mechanismus byla provedena rešeršní studie literatury. Byl prozkoumán matematický popis aerodynamického pole a akustického pole, kdy byl kladen důraz na rozkrytí rozdílů mezi oběma fenomény a odlišnými nároky na jejich numerické řešení. Byly prozkoumány numerické metody řešení Navierových-Stokesových rovnic, kde byl kladen důraz na metodu simulace velkých vírů LES, která je hlavní metodou pro tuto práci.

Bylo dosaženo všech dílčích cílů disertační práce, a to:

- **Byl vyvinut specifický softwarový nástroj pro analýzu výsledků CAA modelů překonávající přirozená omezení DFT**, který velmi přesně určuje hodnoty frekvencí a amplitud tónových složek ze signálu o délce pouhých několika desetin sekundy. V rámci disertační práce byly prozkoumány metody zpracování signálu nutné pro analýzu akustického signálu. Na základě tohoto výzkumu, který analyzoval specifika CFD simulací tónových hluků o nízkých frekvencích, byl vyvinut a naprogramován tento specifický softwarový nástroj v jazyce Mathematica od firmy Wolfram Research.

- **Byly úspěšně porovnány dva rozdílné přístupy modelování turbulence LES a URANS**, a to s ohledem na jejich přesnost, nároky na výpočetní výkon a spolehlivost konvergence. **Byla identifikována vhodná diskretizační a iterační schémata**. Byly získány výsledky pro tři varianty LES metody a jednu variantu metody URANS. Vedle de-facto standardu LES metody založené na tzv. subgrid-scale (SGS) modelu turbulence, byla vypočtena také varianta implicitní LES metody (ILES), která je moderním trendem LES metody, kde je eliminace energie vírů malých měřítek řešena volbou vhodně disipativního, numerického schématu. Úspěšně byla simulována také varianta ILES s málo disipativním numerickým schématem varianty LES-SMAG, bez použití SGS modelu, u které téměř nedocházelo k disipaci energie vírů malých měřítek a jednalo se tedy o jakousi variantu DNS metody na velmi hrubé síti. V rámci této práce byla zařazena také do kategorie LES metod. Pro variantu reprezentující časově průměrované metody URANS byl vybrán turbulentní model RNG k-epsilon, který je dle literatury používán s vysokou četností při modelování úloh aerodynamicky indukovaných tónových hluků v kavitách.

Také s modelem URANS byl úspěšně vybuzen aeroakustický jev a získán akustický signál očekávané kvality.

- Byla navržena a vyrobena specificky zmodifikovaná varianta reálné varhanní píšťaly, na které byly provedeny validační měření numerických modelů. Varhanní píšťala byla v rámci výzkumu identifikována jako aeroakustický objekt, který je typově zdrojem tónových zvuků, na které byla práce zacílena, zároveň jako vhodný objekt pro CFD simulace a validaci výsledků těchto simulací. Jedná se o varhanní píšťalu generující základní tón velké C. Na základě geometrie reálné píšťaly byl vytvořen její přesný CAD model, dle něhož byla v postupných krocích precizovaná výpočtová síť a numerická schémata pro kód OpenFOAM až do stavu, kdy CFD simulace poskytovaly důvěryhodné výsledky.

Na základě získaných poznatků a výsledků této práce bylo možné dát kladnou odpověď na hlavní vědeckou otázku, a to:

„Numerickou simulací lze věrně popsat chování tónových zdrojů hluku, u nichž je zvuk generován nestabilitami ve smykové vrstvě turbulentního proudění.“

Dále je možno konstatovat, že byla zcela potvrzena první pracovní hypotéza, a to:

„Chování tónových zdrojů hluku, u nichž je zvuk generován nestabilitami ve smykové vrstvě, lze věrně popsat numerickou simulací turbulentního proudění, která přímo počítá velké vírové struktury (LES).“

Druhá pracovní hypotéza byla potvrzena pouze částečně a byla přeformulovaná do následujícího znění:

„Chování tónových zdrojů hluku, u nichž je zvuk generován nestabilitami ve smykové vrstvě, lze také dostatečně věrně popsat numerickou simulací turbulentního proudění, která turbulentní proudění pouze modeluje (URANS).“

6 LITERATURA

- [1] DÁNIEL, V. *Modely mechanického kmitání konstrukcí ze dřeva a na bázi dřeva*. Brno, 2008. Disertační práce. MZLU v Brně.
- [2] FESPERMAN, J.T. *The organ as musical medium*. New York: Coleman-Ross Co, 1962.
- [3] Fletcher, N.H.; Rossing, T.D. *The Physics of Musical Instruments*. 2nd Edition. New York: Springer-Verlag New York, 1998. ISBN 978-0-387-98374-5.
- [4] GADE, S.; HERLUFSEN, H. Digital filter vs FFT techniques for damping measurements. *Technical Review*. 1994, no. 1-1994.
- [5] GHANADI, F.; ARJOMANDI M.; CAZZOLATO, B.; ZANDER, A. Understanding of the flow behaviour on a Helmholtz resonator excited by grazing flow. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2014, vol. 28, no. 5, pp. 219–231.
- [6] JONG, A. de.; BIJL H. Experimental and Numerical Investigation of the Flow-Induced Resonance of Slender Deep Cavities that Resemble Automotive Door Gaps, In: *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 7- 9 June 2010. Stockholm, Sweden, 2010.
- [7] LAAP, D.R. *The Physics of Music and Musical Instruments*. Medford: Wright Center for Innovative Science Education Tufts University [online]. 2006. Dostupné z: <http://kellerphysics.com/acoustics/Lapp.pdf>
- [8] LEER, B. van. Towards the ultimate conservative difference scheme III. Upstreamcentered finite-difference schemes for ideal compressible flow. *Journal of Computational Physics*. 1977, vol. 23, no. 3, pp. 263–275.
- [9] MARGOLIN, L.G. Modeling Turbulent Flow with Implicit LES. In: *Proceedings of the Joint Russian-American Five Laboratory Conference on Computational Mathematics/Physics*, 19-23 June 2005. Vienna, Austria, 2005.
- [10] OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W. *Discrete-Time Signal Processing*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1989.

- [11] RICOT, D. *Simulation numérique d'un écoulement affleurant une cavité par une méthode Boltzmann sur réseau, et application au toit ouvrant de véhicules automobiles*. Lyon, 2002. Dissertation. Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique.
- [12] ROSSING, T.D. *The Science of Sound*. Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
- [13] ROY, C.J.; GHUGE, H.A. Detached Eddy Simulations of a Simplified Tractor/Trailer Geometry. In: *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains*. New York: Springer, 2009, pp. 362–382. ISBN 978-3-540-85069-4.
- [14] SELESNICK, I.; SCHULLER, G. The Discrete Fourier Transform. In: *The Transform and Data Compression Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001, pp. 37–74.
- [15] SENTHOORAN, S.; CROUSE, B.; NOELTING, S.; FREED, D.; DUNCAN, B.; BALASUBRAMANIAN, G.; POWELL, R. Prediction of Wall Pressure Fluctuations on an Automobile Side-Glass Using a Lattice-Boltzmann Method. In: *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference)*, 8-10 May 2006. Cambridge, Massachusetts 2006.
- [16] SINGH, A.; RAJVANISHI, D.; NIKAM, D. Buffeting Noise Computations for an Open Side Window. In: *Proceedings of the 37th National and 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power*, 16-18 December 2010. Chennai, India 2010.
- [17] TELL, J. *Aeroacoustic study on roof bow CFD generation of input data for hybrid approach*. Göteborg, 2012. Diploma work. Chalmers University of Technology.
- [18] YAKHOT, V.; ORSZAG, S. A.; THANGAM, S.; GATSKI, T. B.; SPEZIALE, C. G. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A*. 1992, vol. 4, no. 7, pp. 1510–1520.

7 PUBLIKACE AUTORA

DOULE, O.; DETSIS, E.; EBRAHIMI, A.; ŠÁLENÝ, V. A Lunar Base with Astronomical Observatory. In: AIAA 41th International Conference on Environmental Systems, 17-20 July 2011. Portland, Oregon, USA, 2011.

DOULE, O.; ŠÁLENÝ, V.; HÉRIN, B.; ROUSEK, T. Omicron spacehabitat – research stage II. *Acta Astronautica*. 2012, vol. 70, no. January–February 2012, pp. 139-158.

DOULE, O.; ŠÁLENÝ, V.; HÉRIN, B. Omicron Orbital Hotel. In: *Newspace Conference 2011*, 28-30 July 2011. NASA Ames Research Center, USA, 2011.

DOULE, O.; IMHOF, B.; HOHENEDER, W.; WEISS, P.; ŠÁLENÝ, V.; GANCET, J.; ILZKOVITZ, M. 2013. Self-deployable Habitat for Extreme Environments - innovative architecture testbed for terrestrial and space applications supported by FP7. In: *64th International Astronautical Congress*, 23-27 September 2013. Bei-jing, China, 2013.

DOULE, O.; WACHTL, O.; ERIKSSON, K.; PLATT, D.; ŠÁLENÝ, V.; EBRAHIMI, A. Sinterhab v2: Deployment, Life Support Integration and its Architecture Spin-Offs. In: *64th International Astronautical Congress*, 23-27 September 2013. Beijing, China, 2013.

NELSON, J.V.; OSBORNE, B.; IMHOF, A. B.; WEISS, P.; TAILLEBOT, V.; AABLOO, A.; DOULE, O.; GANCET, J.; RANSOM, S.; ŠÁLENÝ, V. Results of the Self Deployable Habitat for Extreme Environments (SHEE) project. In: *67th International Astronautical Congress*, 26-30 September 2016. Guadalajara, Mexico, 2016.

ŠÁLENÝ, V.; KATOLICKÝ, J. Aeroacoustic computation of low frequency tonal sound by four different turbulence modeling approaches. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2018, vol. 8. (v tisku)

WONG, N.; DOULE, O.; CERMAK, M.; ŠÁLENÝ, V. Inflatable Land Shelter Demonstrator. In: *AIAA 42nd International Conference on Environmental Systems*, 15-19 July 2012. San Diego, California, 2012.

8 VĚDECKOVÝZKUMNÁ ČINNOST AUTORA

2017-dosud	Projekt TAČR, Ev. č. TH02010978, Eliminace vlhkostního zatížení hudebního nástroje
2016-dosud	Projekt TRIO, Ev. č. FV10482, Habitat pro extrémní prostředí s lehkou přetlakovatelnou konstrukcí /HELP/
2014-2015	Projekt TAČR, Ev. č. TA04011437, Přímá simulace vírových struktur v kompresorech metodou MILES-WBF
2014	Projekt RIV, Funkční vzorek, Měřicí zařízení pro validační experimenty výpočtové aeroakustiky (CAA)
2013-2016	Projekt FP7, Ev. č. FP7-SPACE-2012-312747, Self-deployable Habitat for Extreme Environments
2013	Projekt RIV, Funkční vzorek, Samočinně rozvinutelný habitat pro extrémní prostředí
2006	Projekt Sobriety, s.r.o., Aeroakustika pomocí CFD – projekt fáze II
2006	Projekt Sobriety, s.r.o., Aeroakustika: Vývojové práce – CFD výpočty
2005	Projekt Sobriety, s.r.o., Analýza aerohluků generovaných v dutině 5. dveří
2004	Projekt Sobriety, s.r.o., Zajištění projektu – Aeroakustické výpočty pomocí CFD

9 ŽIVOTOPIS

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Vratislav Šálený
Datum narození: 11. února 1966
Občanství: Česká republika
E-mail: vratislav.saleny@sobriety.cz

Vzdělání:

2010–dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Doktorské studium (kombinované), Dizertační práce: Numerická simulace hluku generovaného nestabilitami ve smykové vrstvě
1987–1992 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav, Inženýrské studium (prezenční) ukončeno vykonáním státní zkoušky a získáním vysokoškolského vzdělání ve studijním oboru 23-25-8 letadlová technika a přiznáním akademického titulu inženýr
1980-1984 AERO n.p. Vodochody, Střední odborné učiliště strojírenské, úspěšně ukončeno maturitní zkouškou

Pracovní zkušenosti:

2002–dosud Sobriety s.r.o. - zakladatel a většinový vlastník společnosti
1999–2002 Osoba samostatně výdělečně činná - letecký statik, práce na projektu dopravního letounu pro 8 cestujících Aero Ae270 Ibis
1997-1999 MSC.Software s.r.o. - technický ředitel a společník
1994-1997 ANLIN, spol. s r.o. - jednatel a společník
1992-1994 EVEKTOR, spol. s r.o. - letecký statik, práce na projektu dopravního letounu pro 8 cestujících Aero Ae270 Ibis

Jazykové znalosti:

Čeština: Rodný jazyk
Angličtina: Aktivně slovem i písmem

Abstrakt

Predikce a eliminace aerodynamicky generovaných hluků rychle se pohybujících dopravních prostředků je stále důležitější. Tónový hluk generovaný nestabilitou smykové vrstvy vzduchu proudícího nad otvory dutin je jedním z nejvýznamnějších zdrojů hluků. Výpočetní aeroakustika (CAA) nabízí nejobecnější možnosti pro predikci aerodynamicky indukovaných zvuků. CAA je prakticky vždy spojena s turbulentním prouděním, které je hlavní výzvou pro CFD simulace při řešení Navierových-Stokesových rovnic. Numerická simulace hluku generovaného nestabilitami ve smykové vrstvě je předmětem této práce. Jsou zkoumány čtyři různé přístupy modelování turbulence. Tři z nich patří do kategorie LES metod a jeden používá přístup URANS. Byla identifikována vhodná numerická diskretizační a iterační schémata, která byla implementována do software OpenFOAM. Přesnost a výpočetní výkonnost těchto schémat byly studovány během třídimenzionálních CFD simulací na modelu varhanní píšťaly, protože jako zdroj generování tónů využívá samočinné oscilace, označované jako módy smykové vrstvy (Rossiter). Výsledky jsou validovány měřením.

Abstract

Predicting and inhibiting aerodynamically generated noise for fast moving vehicles is increasingly important. The tonal noise generated by the shear-layer instability of air flowing around the cavity opening is one of the most significant sources of noise. Computational aeroacoustics (CAA) offers the most general approach to predicting those aerodynamically induced sounds. CAA is practically always associated with turbulent flow and turbulence is the major challenge for CFD simulations. The numerical simulation of the noise generated by instability in the shear layer is the subject of this work. Four different turbulence modelling approaches are examined. Three of them belong to the LES method category and one uses the URANS approach. Appropriate numerical discretization and iteration schemes have been identified and implemented in the OpenFOAM software. The accuracy and computational performance of those schemes have been subsequently studied during three-dimensional CFD simulations on a model of an organ pipe because it uses self-sustained oscillations, commonly referred as shear-layer (Rossiter) modes, as the source of its tone generation. The results are validated by a measurement.