

# **Výzkum akustických vlastností vybraných prvků vzduchotechnických systémů**

Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

Teze disertační práce



# Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

## Fakulta aplikované informatiky

Teze dizertační práce

### Výzkum akustických vlastností vybraných prvků vzduchotechnických systémů

### Research of Acoustic Properties of Selected Elements of HVAC Systems

Autor: **Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**

Studijní program: Inženýrská informatika (P3902)

Studijní obor: Automatické řízení a informatika (3902V037)

Školitel: prof. Ing. Roman Prokop, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Peter Zvolenský, CSc.,  
doc. Ing. Aleš Rubina, Ph.D.,  
Ing. Libor Ládyš

Zlín, listopad 2020

© Pavel Drábek

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary** v roce 2020.

Klíčová slova: *snižování hluku, tlumič hluku, vlastní hluk, tlaková ztráta, výpočetní aeroakustika, CAA, LES, SBES*

Key words: *noise reduction, air duct noise silencer, regenerated noise, pressure drop, computational aero-acoustics, CAA, LES, SBES*

Plná verze dizertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-967-0

# ABSTRAKT

Předmětná práce je orientována do problematiky vzduchotechnických systémů se zaměřením na prvky instalovaných do potrubní sítě za účelem snížení přenosu hluku do vnitřního i vnějšího chráněného prostředí budov. Práce se zabývá možnostmi stanovení vlivu vzájemné interakce hydraulických a akustických parametrů, konkrétně ve vztahu k množství generovaného vlastního hluku. Pro stanovení této interakce posloužil kulisový potrubní tlumič hluku, kde byly testovány různé geometrické varianty středového jádra. Zvolené řešení se opírá o existující metody numerické simulace akustických polí generovaných prouděním tekutiny, jejíž výstupy jsou komparovány s experimentálně získanými daty. Veškeré dílčí kroky vedoucí ke splnění vytyčených cílů jsou v práci diskutovány.

# ABSTRACT

This doctoral thesis is focused on the elements of HVAC systems that are installed in the pipeline network in order to reduce the transmission of noise to the indoor and outdoor space. The work deals with the possibilities of determining the influence of the mutual interaction of hydraulic and acoustic parameters, specifically in relation to the amount of regenerated noise. To determine this interaction, a round silencer was used, where various geometric variants of the central core were tested. The solution is based on existing computational aero-acoustics methods, and the outputs from the numerical simulation are compared with experimentally obtained data. All partial steps leading to the fulfilment of the set goals are discussed in work.



# OBSAH

1	ÚVOD	4
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
3	CÍLE PRÁCE	6
4	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	7
4.1	Výběr potrubního tlumiče hluku a varianty středového jádra	7
4.2	Návrh experimentální tratě pro stanovení vlastního hluku v potrubí	8
4.3	Metodika CAA pro případ turbulentního nestacionárního proudění v uzavřených profilech	10
5	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	12
5.1	Experimentální měření tlakové ztráty a vlastního hluku	12
5.2	Numerické řešení CFD a CAA	16
5.2.1	<i>Vypočtená tlaková a rychlostní pole</i>	16
5.2.2	<i>Validace CAA s experimentálně získanými daty</i>	18
6	DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	19
6.1	Stanovení vlivu tlakové ztráty na hodnotu vlastního hluku	19
7	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	20
8	ZÁVĚR	21
	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	23
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	24
	SEZNAM OBRÁZKŮ	27
	SEZNAM TABULEK	27
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	27
	ŽIVOTOPIS	29

# 1 ÚVOD

Akustika je vědní obor, který má v problematice vzduchotechnických systémů (dále jen VZT) své pevné místo. Aktuální trend zaměřený na zlepšování účinnosti jednotlivých částí motorů a lopatkových kol, podpořený stále efektivnějšími metodami řízení, umožňuje jednotkám dopravující vzduch pracovat většinu provozní doby v energeticky efektivní oblasti. To se kladně odráží i na množství generovaného hluku mechanického původu. Následně je hluk přenášený do místnosti tvořen primárně v důsledku turbulentního proudění a obtékání tuhých těles. Z toho důvodu se předpokládá, že optimalizace tvarových částí potrubních prvků vřazených do proudu vzduchu, za účelem snížení tlakové ztráty a vlastního hluku, bude více diskutovaným tématem.

Tato disertační práce se zaměřuje na problematiku kulisových potrubních tlumičů hluku, které pasivní formou účelně snižují hluk ve VZT systémech. Sledovány jsou základní akustické a hydraulické parametry především z pohledu jejich vzájemné interakce. Převážná část je soustředěna na možnosti stanovení vlivu tlakové ztráty středového jádra na množství generovaného vlastního hluku. V rámci práce byly navrženy různé tvarové nátrubky, kterými je možné osadit konce předmětného středového jádra tlumiče hluku a změnit tak jeho hydraulické parametry. Pro hodnocení jednotlivých variant byly aplikovány numerické a experimentální metody. Základem experimentální části práce byl návrh a realizace konfigurace měřicí tratě umožňující současné měření hydraulických a akustických parametrů v potrubí. Tato konfigurace představuje alternativní přístup k mezinárodně uznávané metodě zahrnující dozvukovou komoru. V práci došlo také k návrhu metodiky pro numerické řešení akustických polí generovaných prouděním tekutiny (CAA) v prostoru ohraničeném stěnami.

Výsledky této práce, aplikované do inženýrské praxe, mohou být uplatněny jak v projekčních, zkušebních, tak i výrobních organizacích. Výsledky výzkumu mohou být významné především pro výrobce VZT prvků, kterým mohou uvedené výstupy pomoci lépe porozumět vzniku aeroakustických hluků a zároveň přispět k identifikaci a následné optimalizaci nejvíce problémových částí.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Pojmem „VZT systém“ jsou v této práci označovány systémy nuceného větrání vyúsťující do vnitřních chráněných prostor budov, na které se vztahují jisté hygienické limity hluku. V nejčastějších případech se splnění hygienických limitů na hluk neobejde bez realizace protihlukového opatření, která jsou primárně řešena implementací tlumičů hluku do potrubí distribuční sítě. Hluk VZT systémů je tvořen více komponenty, vyznačující se různými frekvenčními spektry. Z toho důvodu je výběr prvku s vhodnou útlumovou charakteristikou klíčovým bodem projekční činnosti [1]. Nejčastěji užívanými prvky snižující hluk ve VZT systémech jsou tlumiče využívající tradiční disipativní metody [1]. Zatímco tyto typy tlumičů vykazují vysokou účinnost v oblasti středních frekvencí, tak v oblasti nízkých kmitočtů jsou téměř neúčinné. Navíc i z hlediska nízkého přirozeného útlumu v potrubní síti se oblast frekvencí  $f < 250$  Hz ukázala velmi problematickou. Právě nedostatek efektivních metod pasivní kontroly v tomto frekvenčním rozsahu je hlavní motivací současného výzkumu a vývoje.

Dalším výzkumným směrem je samotný vlastní hluk těchto tlumičů, neboť pro zajištění dostatečně velké absorpční plochy, tvoří tlumič i části, které jsou obtékány vzduchem. To se následně projeví vznikem lokální turbulence a poklesem statického tlaku napříč diskontinuitou [5][7]. Jistá část energie potřebná pro této turbulence je přeměněna na energii akustickou. Hlavní podíl na generování zvuku při obtékání vzduchu kolem tuhého tělesa má tzv. vznik Kármánových tónů, což je způsobeno tím, že se během střídavého oddělování vírů vyvíjí střídavé síly, které působí kolmo ke směru proudící vzdušiny o frekvenci shodné s frekvencí oddělování vírů od povrchu válcového elementu [5].

Značná pozornost v této oblasti byla věnována vývoji prediktivních metod umožňujících stanovení přibližných hodnot hladin akustického výkonu vlastního hluku různých VZT prvků. Za vytvořením teoretických modelů stály práce [6][8][3][2]. Nicméně tyto analytické přístupy nedokážou zohlednit veškeré vlivy podepisující na výsledné hodnotě vlastního hluku. Z toho důvodu jsou numerické simulace akustických polí generovaných prouděním tekutin označovaných jako CAA (Computational Aero-Acoustics), vhodnější alternativou.

Typický scénář řešení CAA úlohy představuje dvoufázový výpočetní přístup. V první se řeší pouze aerodynamická složka s pevně definovanými aerodynamickými podmínkami, aby byl získán stav odpovídající ustálenému proudění. Následuje fáze definovaný patřičným akustickým kódem pracující s krátkými periodickými okrajovými podmínkami, aby došlo k postihnutí generace a šíření akustických vln. K tomu se nejčastěji využívají tzv. Scale Resolving (dále jen SRS) modely jako jsou LES, DES, SBES a kombinaci jejich technik. Nicméně v současné době neexistuje žádný univerzální přístup, který by spolehlivě vedl k získání žádoucích akustických parametrů pro všechny typy úloh. Některá doporučení uvádí [4] [11].

### 3 CÍLE PRÁCE

Naplnění hlavních cílů představuje následující body, které byly stanoveny na základě současného stavu poznání:

- Návrh alternativního přístupu k měření vlastního hluku a hydraulických parametrů potrubních prvků v prostředí potrubní sítě bez zařazené dozvukové komory. Realizace navrženého řešení a provedení měření na vybraných VZT prvcích.
- Návrh a výroba dílů instalovatelných na oba konce středového jádra tlumiče hluku za účelem změny tlakové ztráty. Připravit, provést a vyhodnotit experimentální měření pro vybrané varianty, které poskytnou data pro validaci.
- Návrh metodiky pro CAA pro případ turbulentního nestacionárního proudění v uzavřených profilech. Osvědčené postupy pro CAA simulaci zpracovat do formy generátoru sekvence příkazů určených ke zpracování v kódu ANSYS Fluent.
- Validovat numerické postupy CAA na experimentálně získaných datech.
- Stanovit vliv tlakové ztráty elementů vřazených do proudu vzduchu na výsledné množství generovaného hluku. Posoudit vliv potrubního tlumiče hluku s různou tlakovou ztrátou na konečnou hladinu akustického tlaku v místě pozorovatele ve vybraném vnitřním chráněném prostoru.

## 4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

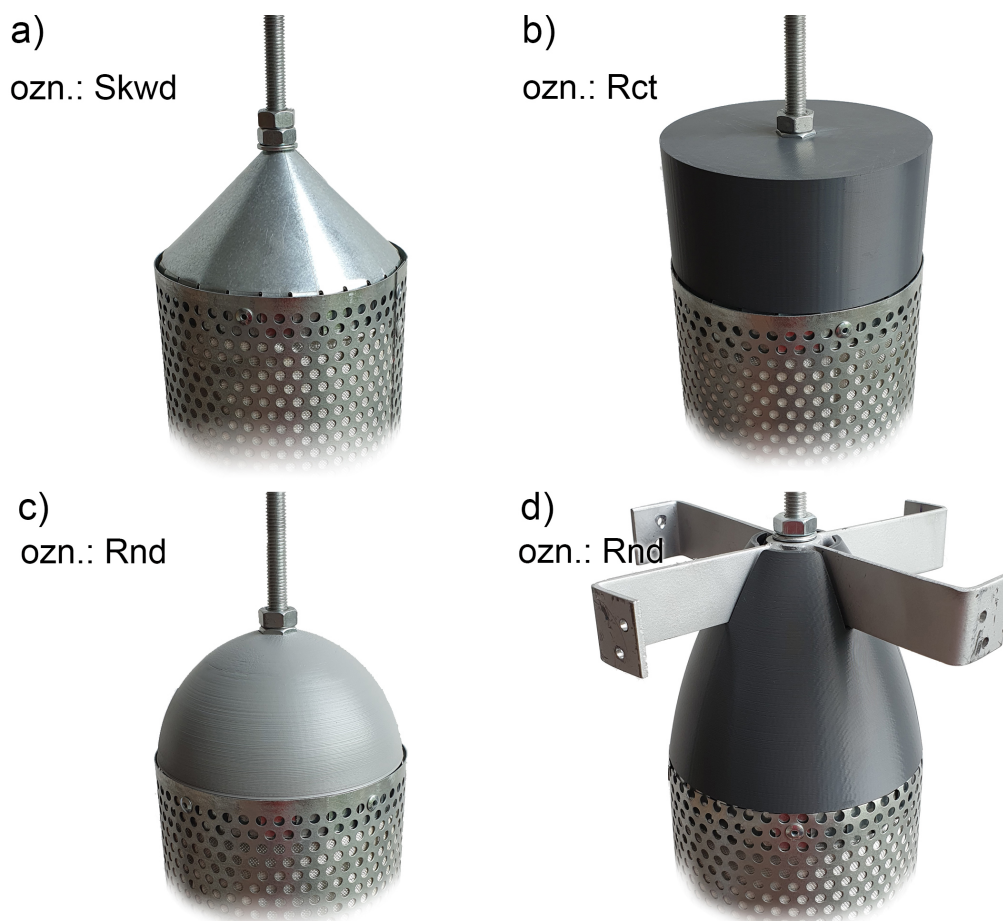
### 4.1 Výběr potrubního tlumiče hluku a varianty středového jádra

Hodnocení vzájemné interakce bylo provedeno na prvku, který bude svým konstrukčním provedením umožňovat různé úpravy a zároveň bude vhodným reprezentantem absorpčních tlumičů hluku montovaných do potrubí. Pro účely této práce byl zvolen kruhový tlumič hluku GDE200 se středovým jádrem, které je ve středové poloze zafixováno pomocí křížových držáku na obou koncích (viz Obr. 4.1).



*Obr. 4.1 Fotografie kulisového potrubního tlumiče hluku GDE 200.*

Základem bylo navrhnout varianty nátrubků, které umožní širokou variabilitu z hlediska hydraulických parametrů. Při návrhu bylo využito technologií optické digitalizace, kdy byla provedena trojrozměrná analýza kompletního povrchu koncové části středového jádra. Naskenovaná data byla dále zpracována v CAD prostředí do podoby objemové geometrie. Výsledkem je válcový nátrubek s rovnou čelní stěnou a ostrou hranou po jeho obvodu. Touto variantou se předpokládá zvýšení tlakové ztráty při osazení vstupní části nebo obou konců středového jádra. Dalšími variantami jsou díly sférických tvarů, kdy na vstupu se předpokládala varianta polokoule a na stranu výstupu protáhlá modifikace, zasahující až ke konci držáku. Originální řešení představuje kónické rozšíření pod úhlem  $45^\circ$  na obou stranách. Aplikací sférických variant bylo očekáváno zlepšení aerodynamických vlastností středového jádra. Výroba byla realizována pomocí 3D tisku. Výslednou podobu vyrobených nátrubků uvádí Obr. 4.2.

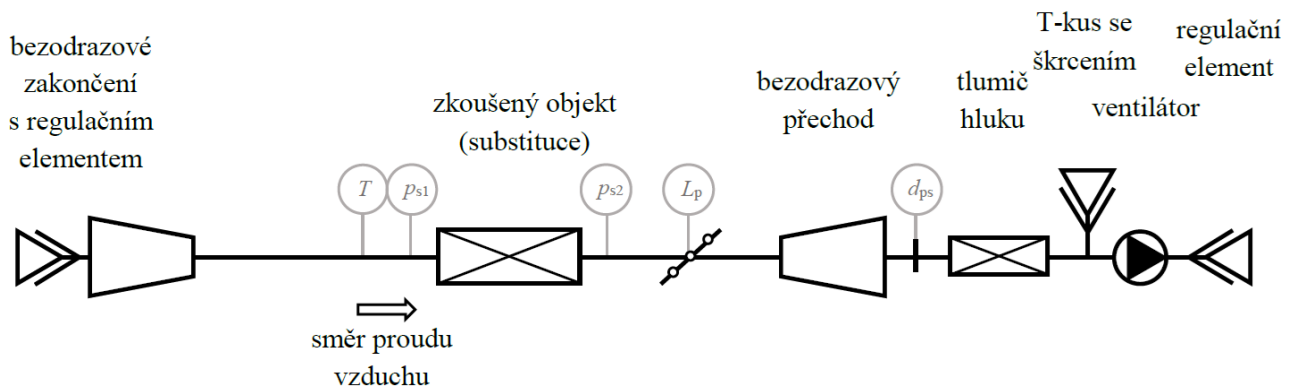


Obr. 4.2 Vyrobené varianty nátrubků (a - original, b - válcový, c - sférický, d - protáhlý).

## 4.2 Návrh experimentální tratě pro stanovení vlastního hluku v potrubí

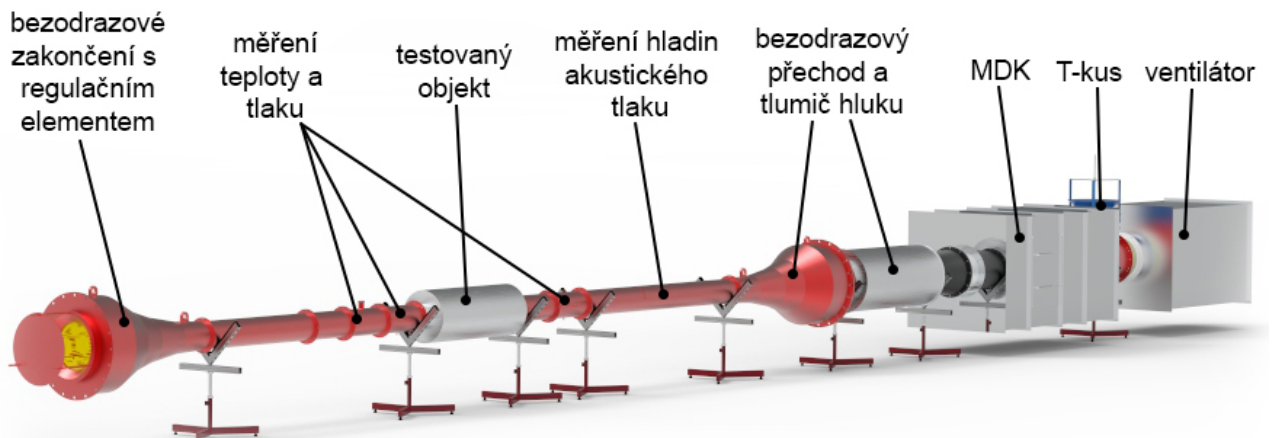
Měření základních parametrů VZT prvků probíhá na specializovaných tratích s tuhým potrubím, jejichž konkrétní konfigurace se odvíjí od měřeného parametru, velikosti a tvaru testovaného vzorku. Doporučené konfigurace uvádí [9][10].

Z hlediska charakteru této práce bylo žádoucí vedle akustických parametrů, současně měřit i tlakovou ztrátu. Sledovanými atributy byla rychlost, přesnost a rozsah měření. Obr. 4.3 zobrazuje navrženou konfiguraci, která umožňuje splnit požadavky na tiché proudění, měření tlakové ztráty a přesnou regulaci průtoku vzduchu. Konec tratě je osazen bezodrazovým zakončením, jehož hlavním znakem je dostatečně pozvolné rozšiřování průřezu potrubí, z důvodu potlačení odrazu zvukových vln zpět ke zdroji zvuku. Měření akustického tlaku



Obr. 4.3 Schéma konfigurace potrubní tratě s otevřenými konci pro měření vlastního hluku VZT prvků.

se děje ve třech polohách, rovnoměrně rozloženými na měřicí ploše za zkoušeným objektem, pomocí mikrofonů GRAS GS-40AF s předzesilovačem Nor1209 a měřicí stanice Nor850 od společnosti Norsonic, která slouží jako hladinový zapisovač akustického tlaku podle funkce času. Při měření s prouděním vzduchu jsou mikrofony osazeny kuželovými nástavci. Teplota vzdušiny je měřena v místě před testovaným objektem odporovým snímačem Pt100. Statický tlak je snímán v pozici před a za testovaným objektem, vždy vůči atmosferickému tlaku, pomocí převodníků tlaku PTSXR od společnosti AIRFLOW. Stejné zařízení slouží i pro měření tlakové diference na multidýzové komoře (dále MDK), která slouží ke stanovení objemového průtoku. Render tratě uvádí Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Trať pro měření vlastního hluku v potrubí (render).



### 4.3 Metodika CAA pro případ turbulentního nestacionárního proudění v uzavřených profilech

Pracovní tok CAA simulace představuje tvorbu modelu, dimenzování a analýzu výpočetní sítě, nastavení okrajových podmínek a řešiče, vyhodnocení a interpretace výsledků. Části předcházející samotnému výpočtu si vyžadují značnou pozornost, neboť mají zásadní vliv na rychlost výpočtu, konvergenci a kvalitu výsledků. Pro případy přímé metody CAA bylo zjištěno, že vhodný počet uzlových bodů  $N$  výpočetní sítě je vhodné volit na hodnotu 20 pro maximální sledovou frekvenci  $f_{max}$ . Způsobnost vytvořené výpočetní sítě pro CAA je vhodné ověřit pomocí tzv. "mesh sensitivity" analýzy. Sledovanými parametry je stěnový parametr  $Y^+$  a hodnota kritéria Courant-Friedrichs-Lewy (CFL).

Tab. 4.1 Nastavení řešiče pro nestacionární části 3D CAA.

Nastavení viskózního modelu				
Model		Modelové konstanty	SRS model	SGS model
Turbulence k- $\Omega$ SST		Default	SBES	WALE
Nastavení řešiče				
Typ	Vztah tlaku a rychlosti	Diskretizace	Diskretizace času	Diskretizace tlaku
Pressure based	SIMPLEC	Bounded second order implicit	Least Squares Cell Based	Second order
Akustický model		Ffowcs-Williams & Hawkings		

Numerické řešení v této práci i navržená metodika využívá komerčního kódu Fluent. Jednotlivé kroky se odvíjí od uvažované dimenze prostoru, pro který je výpočet uvažován (2D/3D). Cílem uvedené metodiky bylo co nejvíce urychlit dobu výpočtu. První fáze představuje stacionární simulaci, kterou se získají průměrovaná rychlostní a tlaková pole, a další parametry, které dále slouží jako vstupní okrajová podmínka pro následnou nestacionární simulaci. Snahou je v druhé, časově náročnější fázi pracovat s již řádně vyvinutými proudy. Protože téměř všechny SRS modely předpokládají nestabilní turbulentní proudění, je nutné turbulenci z průměrovaného řešení nejprve generovat. K tomu slouží



Obr. 4.5 Hlavní obrazovka generátoru journalů pro 2D řešení.

generátory syntetické turbulence, která zajistí poměrně realistické počáteční fluktuace a vzniklé turbulentní struktury jsou v průběhu nestacionárního výpočtu rozvíjeny. Nestacionární simulace běží do té doby, dokud není dosaženo přibližných výsledků korespondujících s výsledky ze stacionární části. Poté je možné nastavit akustický model, zdroje zvuku, pozice monitoringu akustického tlaku a pokračovat ve výpočtu.

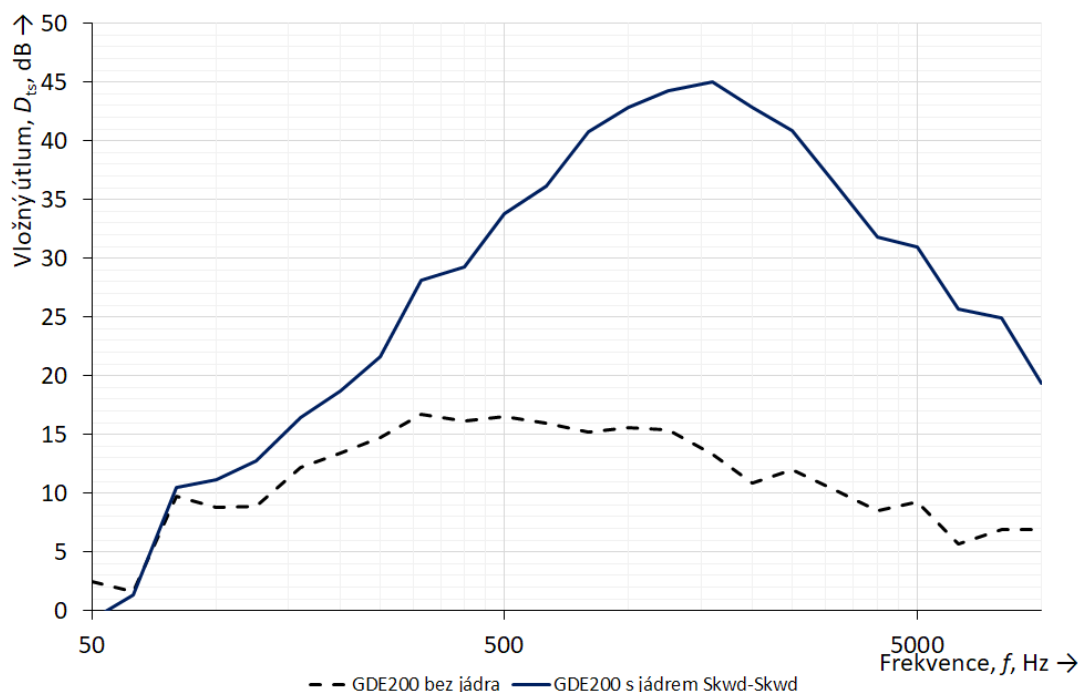
Pro 3D řešení byl zvolen hybridní model SBES, který nabízí možnost zohlednit perforované plochy tlumiče v podobě stěnové okrajové podmínky. Účinek perforace byl kompenzován zavedením parametru drsnosti. Iterativním způsobem byla hodnota parametru definující výšku drsnosti stanovena na  $K_s = 1,13e^{-3}$  m a konstanta drsnosti na  $C_s = 0,83$ . Takto nastavené parametry vykazovaly téměř identické hodnoty tlakové ztráty, jako v případě experimentálního měření.

Zpracovaná a ověřená metodika byla zpracována do podoby tzv. generátoru journalů, který umožňuje vytvořit sekvenci TUI příkazů určených ke zpracování v kódu ANSYS Fluent. Při jejich zavedení jsou příkazy postupně zpracovávány a v průběhu celého výpočtového procesu dochází k automatickému

post-processingu, kde jsou průběžně ukládány grafické výsledky i číselné hodnoty sledovaných veličin. Účelem tohoto nástroje byla minimalizace doby výpočtu, bez možnosti zavedení chyby v důsledku zapomenutí nebo přepsání. Jednotlivé příkazy mohou být vhodně modifikovány podle zvoleného modelu.

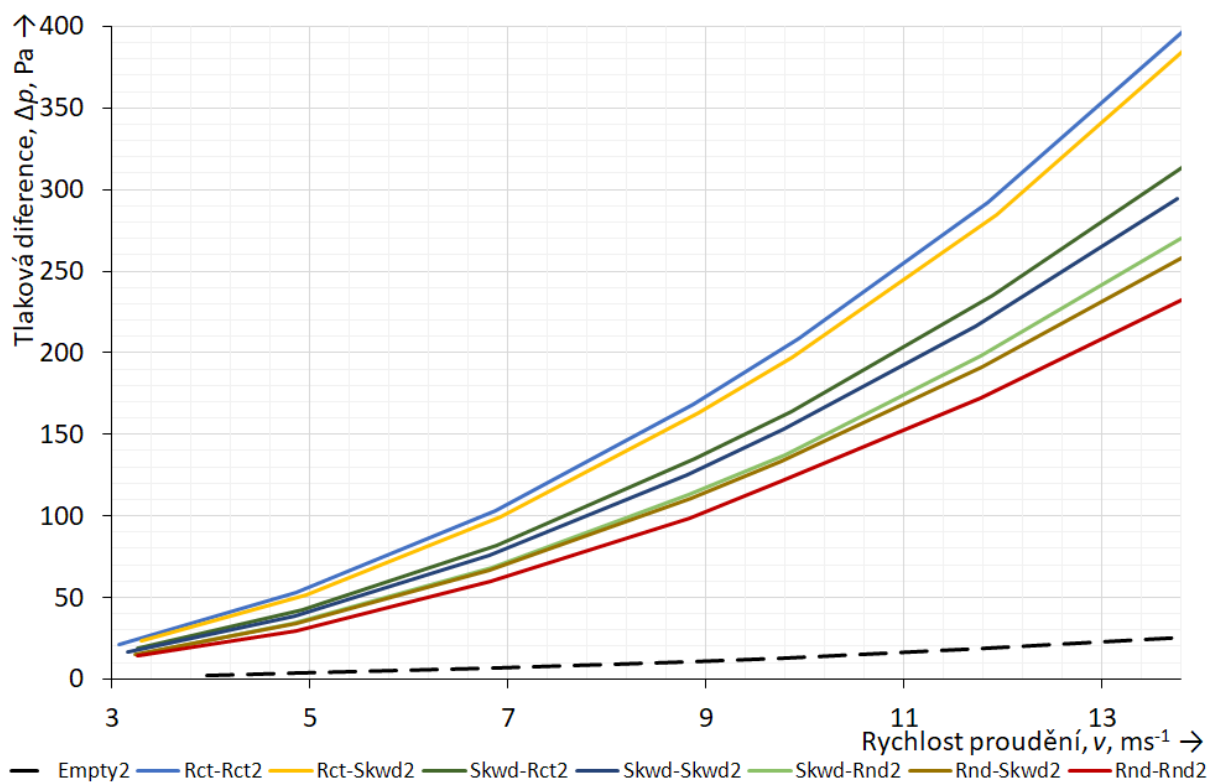
## 5 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

### 5.1 Experimentální měření tlakové ztráty a vlastního hluku

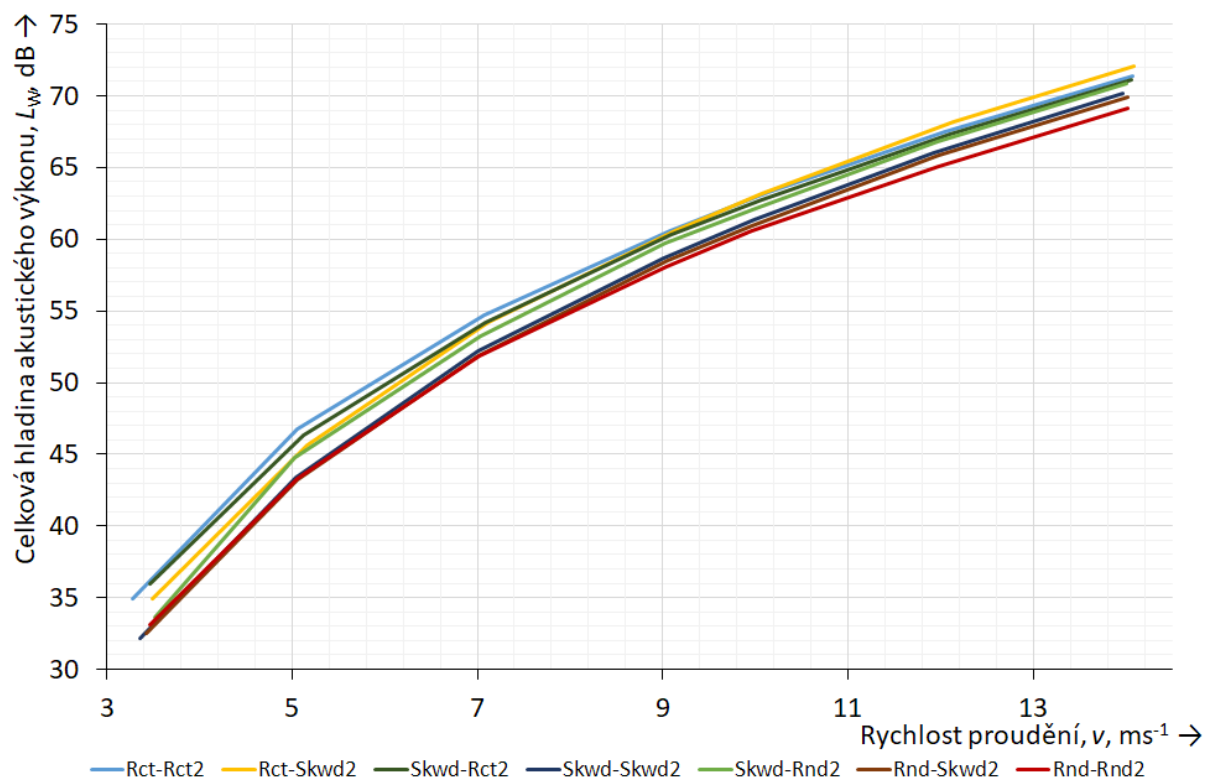


Obr. 5.1 Vložný útlum pro variantu s/bez středového jádra.

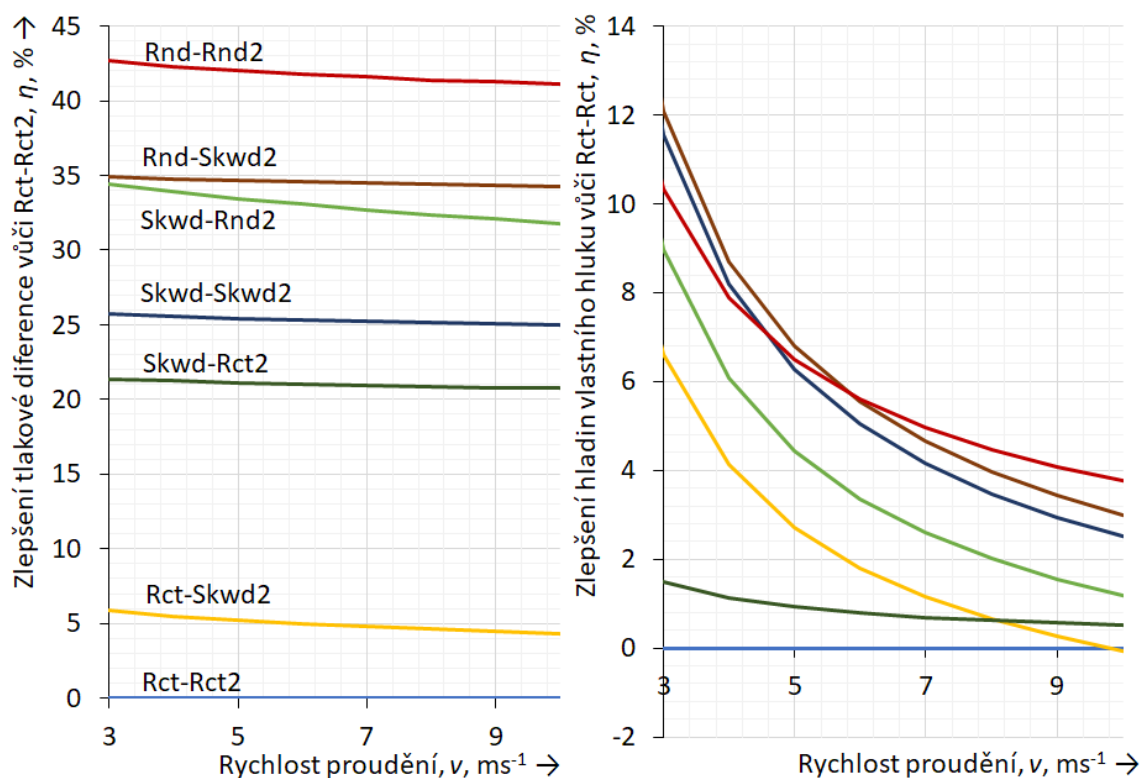
Úvodem je vhodné zobrazit samotný vliv středového jádra a jeho účinnost z hlediska absorpce zvuku, to uvádí Obr. 5.1. Z průběhů je patrné, že přítomnost středového jádra se velmi pozitivně projevuje na výsledném vložném útlumu. Kombinace středového jádra a absorpčního obkladu po obvodu tlumiče zajistila pro celý frekvenční rozsah zlepšení parametru vložného útlumu v průměru o 60 %. Nejmarkantnější situace je vidět v okolí 2kHz. Na druhou stranu v oblasti do 80 Hz se jeví středové jádro jako neúčinné. Obecně lze tedy usuzovat, že pro dosažení vysokého útlumu v oblasti středních kmitočtů na relativně krátké délce, je řešení v podobě dvou absorpčních ploch velmi účinné.



Obr. 5.2 Tlaková ztráta pro různé tvarové varianty středového jádra.



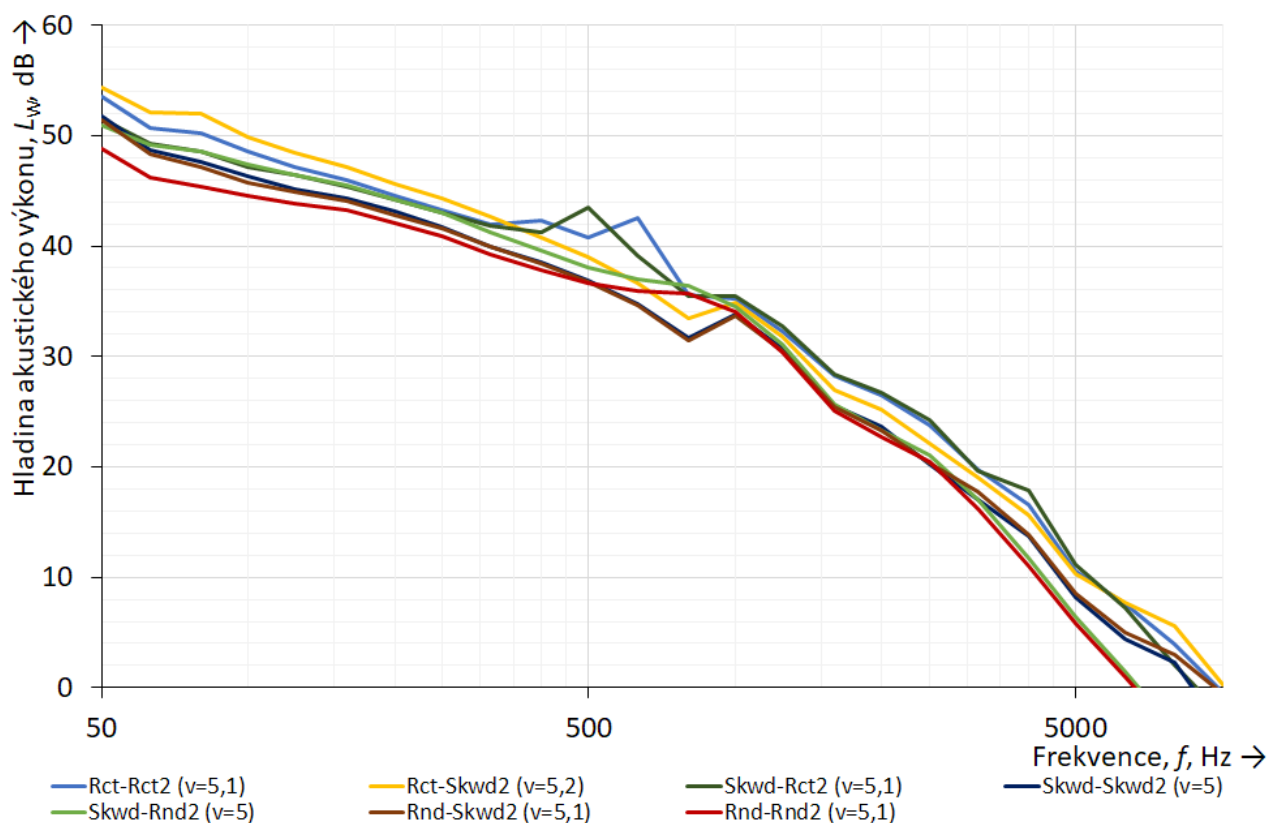
Obr. 5.3 Celkové hodnoty hladin akustického výkonu vlastního hluku pro různé rychlosti proudění.



Obr. 5.4 Zlepšení tlakové ztráty a hladin vlastního hluku jednotlivých variant vůči Rct-Rct.

Dalším sledovaným parametrem byla tlaková ztráta jednotlivých tvarových variant vztažená na průměrnou rychlost proudění na vstupu do tlumiče hluku (Obr. 5.2). Jak lze pozorovat, pro turbulentní proudění jsou výsledky tlakové ztráty úměrné druhé mocnině rychlosti. Tudíž i rozdíly jsou více patrné při vyšších rychlostech. Dle předpokladů, válcové varianty s rovnou čelní plochou na vstupní straně, disponují největším hydraulickým odporem. Originální řešení s kónickou náběžnou plochou představuje výrazné zlepšení, nicméně nejlepší výsledky byly dosaženy s aplikací aerodynamických nátrubků. Tvarová optimalizace konců středového jádra vykazuje lepší výsledky v případě vstupní strany tlumiče.

Nosnou částí této práce je vlastní hluk, jehož hodnoty pro celý frekvenční rozsah vůči rychlosti proudění, jsou uvedeny na Obr. 5.3. Obr. 5.5 zobrazuje hodnoty vlastního hluku ve frekvenční oblasti, pro rychlost proudění vzduchu na vstupu 5 ms<sup>-1</sup>. Na Obr. 5.3 lze pozorovat průběhy logaritmického charakteru, kde výsledky všech variant se pohybují v rozsahu do 4 dB. Opět je vidět, že nejvyšších hodnot vlastního hluku dosahují válcové varianty na vstupní straně, zatímco varianty s aerodynamickými nátrubky se pohybují na spodní



Obr. 5.5 Frekvenční průběh hladin akustického výkonu vlastního hluku pro  $5 \text{ ms}^{-1}$ .

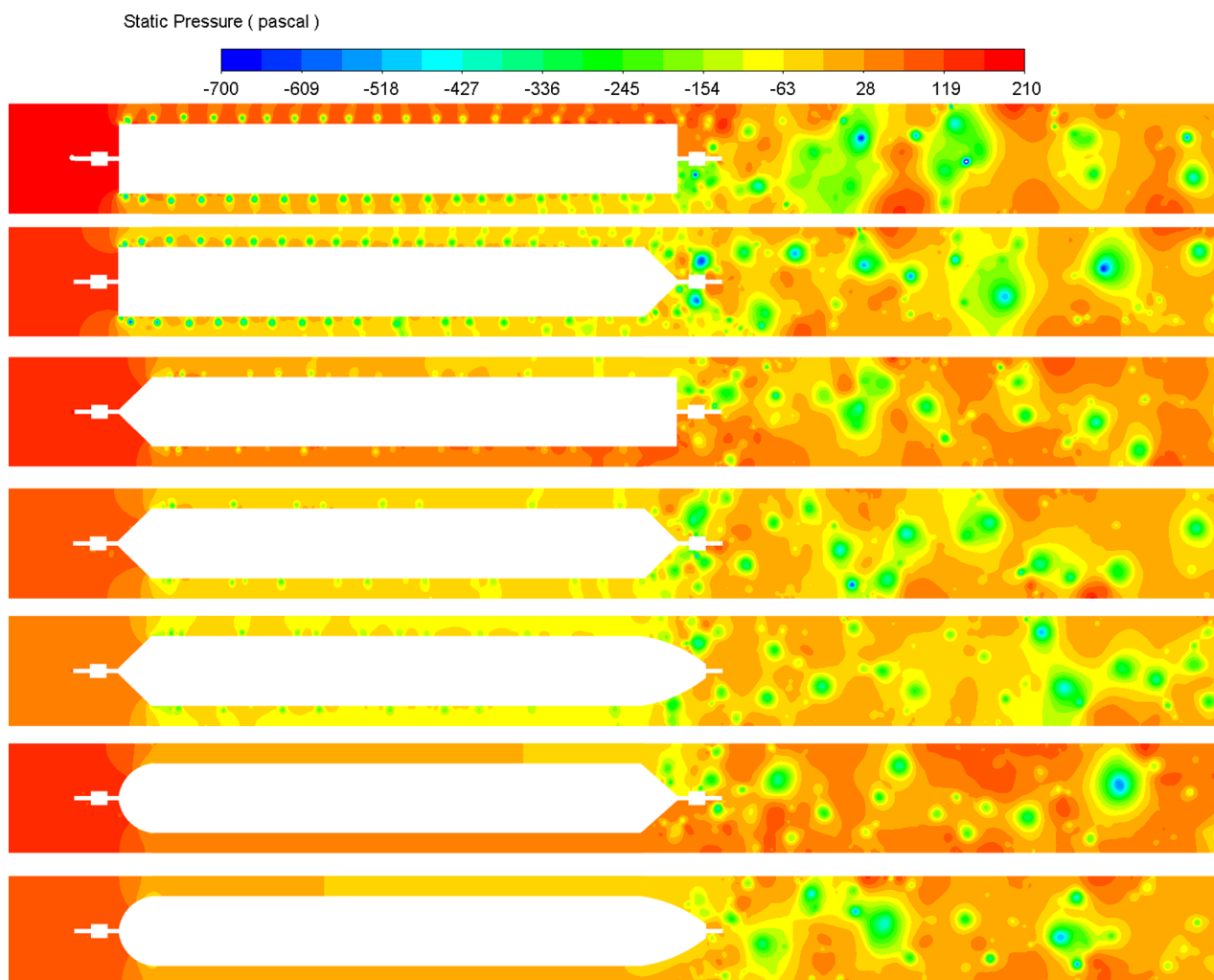
hranici. Pro lepší přehled je uveden Obr. 5.4, který zobrazuje procentuální zlepšení sledovaného parametru vůči nejhorší variantě.

Ukázka frekvenčního průběhu vlastního hluku je uvedena na Obr. 5.5 pro rychlost proudění  $5 \text{ ms}^{-1}$ . Z průběhů lze vyčíst, že na pozici hlavního peaku má největší vliv koncová část tlumiče na výstupu. Nicméně náběžná strana středového jádra může zajistit posunutí pozice hlavního peaku z hlediska frekvence. Na třetinooktávovém pásmu, se střední frekvencí 800 Hz, je zřetelný pokles u variant s originálním řešením na výstupní straně. Průběhy pro ostatní rychlosti vykazují velmi podobný charakter s tím, že pozice hlavního peaku se se zvyšující rychlostí posouvá do místa prvního příčného módu pro všechny varianty. Hlavní rozdíly jsou pro vyšší rychlosti patrné pro frekvence do 800 Hz. Nejhorší a nejlepší varianta se od sebe téměř na celém rozsahu do 800 Hz liší přibližně o 5 dB.

## 5.2 Numerické řešení CFD a CAA

### 5.2.1 Vypočtená tlaková a rychlostní pole

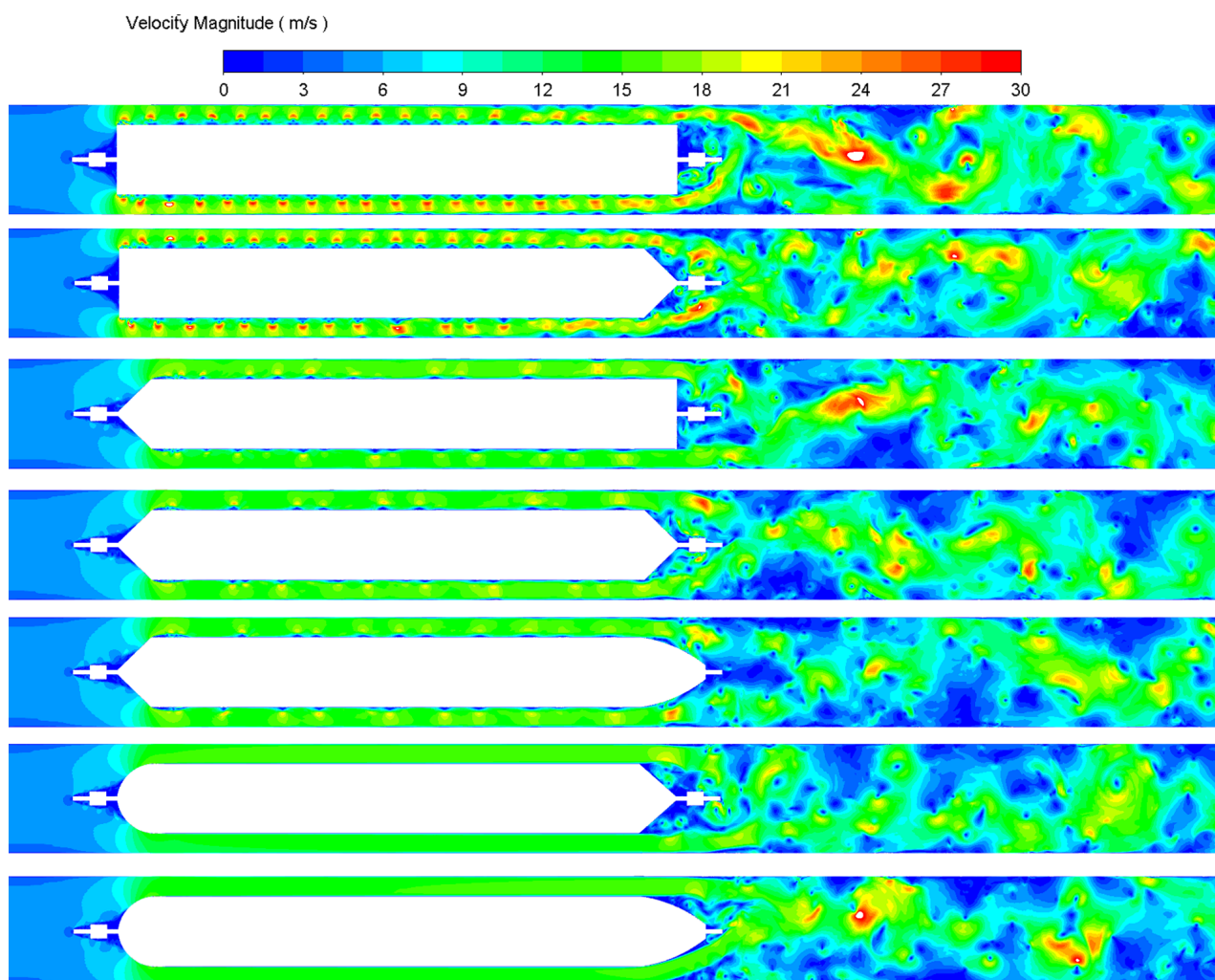
Charakter rychlostního pole se vždy odráží od zvoleného turbulentního modelu. Numericky získaná pole rychlostí a tlaku jsou vyobrazeny ve formě kontur absolutních hodnot na rovinném řezu v místě symetrie tlumiče hluku pro uvažovanou rychlost proudění na vstupu  $5 \text{ ms}^{-1}$  (Obr. 5.6, 5.7).



Obr. 5.6 Kontury hodnot statického tlaku v řezu osy symetrie pro jednotlivé varianty středového jádra.

Při vizuální komparaci kontur jsou zjevné značné rozdíly pro jednotlivé varianty, kde tvarové změny se podepisují na tlakovém i rychlostním profilu. Zatímco v prostoru, za středovým jádrem, dochází k chaotickému rozpadu vírových struktur u všech variant, tak v místě na vstupní straně se objevují periodické fluktuaace pouze u variant s viditelnou hranou. Víry se od hrany

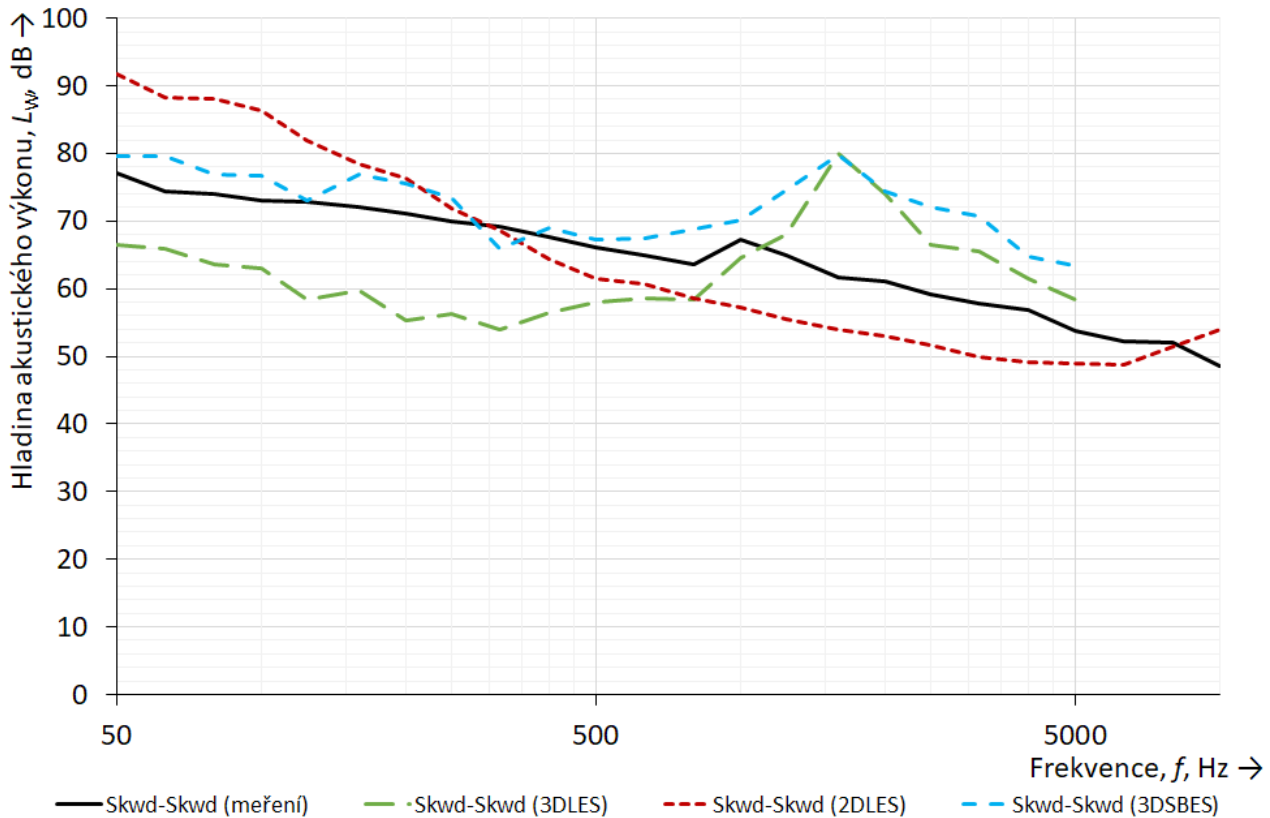




*Obr. 5.7 Kontury absolutních hodnot rychlostí v řezu osy symetrie pro jednotlivé varianty středového jádra.*

oddělují v pravidelných intervalech a v zadní části tlumiče postupně dochází k jejich rozpadu. Jak je vidět z tlakového pole, tohle uvolňování vede k místním a dočasným změnám tlaku v blízkosti povrchu středového jádra a tím i ke generování zvuku. V případě válcové varianty bylo uvolňování vírů pozorováno již od vstupní rychlosti  $2 \text{ ms}^{-1}$ . V zadní části je oddělování nasuperponováno turbulentními změnami v rychlosti, což zároveň vede k jejich rychlému rozpadu.

Výpočetní pole jsou získána ve 2D prostoru, což samo o sobě představuje jistá omezení a neumožňuje stanovení exaktních hodnot vypočtených veličin. Proto i zde uvedené rozsahy neodpovídají skutečnosti.



Obr. 5.8 Frekvenční průběhy hladin akustického tlaku pro jednotlivé přístupy řešení (originální varianta).

### 5.2.2 Validace CAA s experimentálně získanými daty

V případě 3D řešení docházelo na úvodu k validaci simulace z hlediska tlakové ztráty. Pro uvážení všech účinků bylo nutné kompenzovat vliv perforovaných ploch zavedením stěnové okrajové podmínky v podobě parametru drsnosti. Iterativním způsobem byla hodnota parametru definující výšku drsnosti stanovena na  $K_s = 1,13e^{-3}$  m a konstanta drsnosti na  $C_s = 0,83$ . Takto nastavené parametry vykazovaly téměř identické hodnoty tlakové ztráty, jako v případě experimentálního měření.

Pro kvantitativní srovnání získaných dat napočítaného akustického signálu, byly vybrány varianty originálního řešení a válcová varianta. Komparovány zvolené CAA přístupy a vybrané SRS modely, LES a SBES pro varianty 3D a LES pro 2D řešení. Obr. 5.8 zobrazuje frekvenční průběhy hladin akustického tlaku pro originální řešení tlumiče hluku pro podmínku rychlosti proudění na vstupu  $10 \text{ ms}^{-1}$ .

Výsledky porovnání jsou diskutovány v kapitole 6.



## 6 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Přítomnost středového jádra se pozitivně podepisuje na výsledné schopnosti absorbovat procházející zvukové vlny. V průměru se jedná o 60 % zlepšení hodnot vložného útlumu, pro zkoumaný kruhový tlumič hluku. Z hlediska tlakové ztráty se ukázalo, že tvarovou optimalizací středového jádra, je možné dosáhnout redukce hydraulické odporu i v řádech desítek procent. Z výsledků vlastního hluku lze pozorovat, že se snížením tlakové ztráty se snižuje i vlastní hluk.

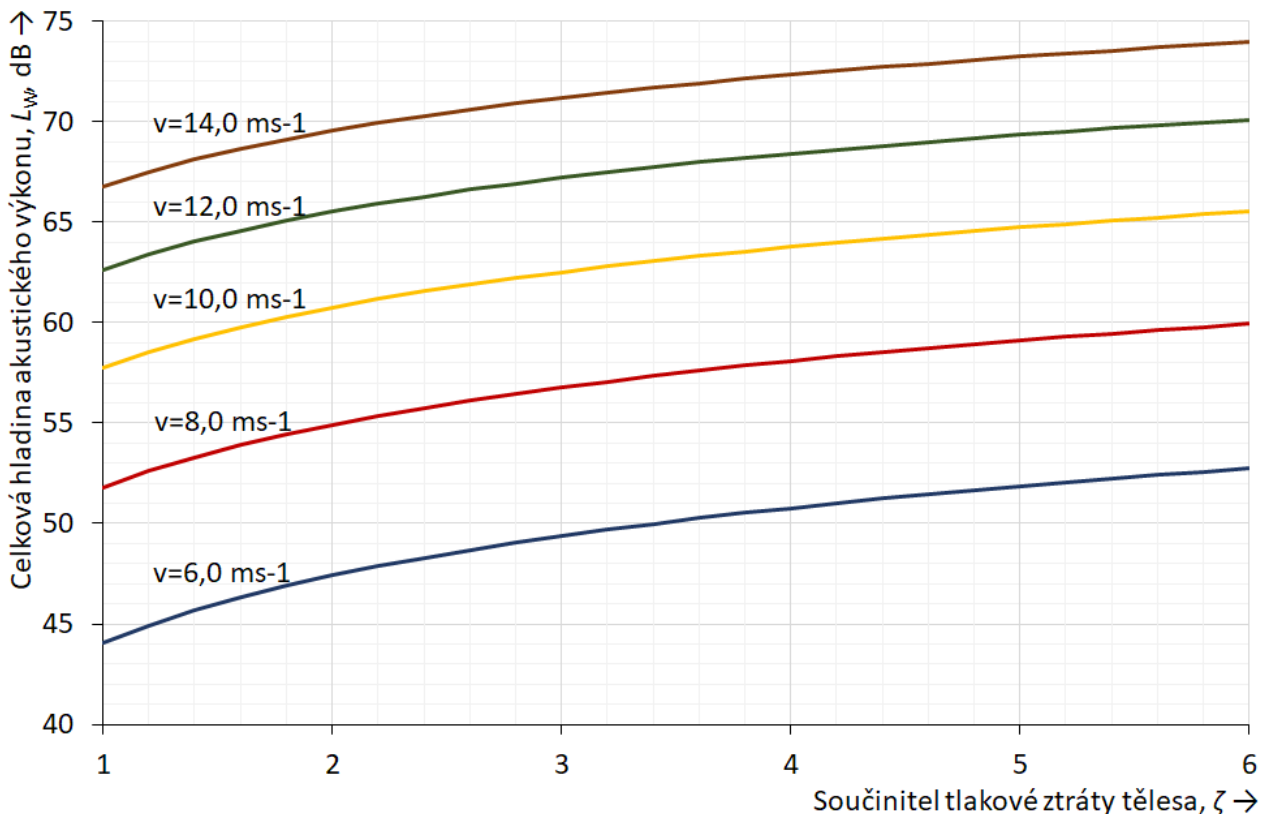
Možnosti predikce hodnot vlastního hluku pomocí CAA se ukázalo být, pro prvky zajišťující současně i tlumící funkci, velmi obtížné. Je všeobecně známo, že perforované obklady mají tendenci zvýšit akustický útlum na nižších frekvencích, a naopak sníží účinek na frekvencích vyšších. Tento jev nebyl v numerické simulaci postihnout. Další záležitostí, kterou je třeba uvážit, je útlum zvukových vln procházející tlumičem disipačními procesy a přenosem boční cestou. Některé hluky, které jsou v důsledku proudění generovány, mohou být tlumeny absorpčními plochami nebo vyzářeny povrchem připojovacího potrubí do okolního prostředí. Vzhledem k tomu, že v modelu byly uvažovány akusticky tvrdé stěny, mohou být výsledky nadhodnoceny i v tomto důsledku.

Pro takto komplexní prvek se ukázaly být hybridní RANS-LES modely vhodnější variantou než čisté LES. Zvolené SBES nabízí alternativní funkce pro definici vírů malých měřítek, dokáže explicitně přepínat do LES oblasti a především umožňuje aplikovat různé stěnové podmínky. Užití těchto metod v 2D prostoru nenabízí exaktní řešení pro predikci absolutních hodnot akustických veličin. Vzhledem k nutnosti kvantifikovaného odhadu parametru, kompenzující absenci třetího rozměru, je možné 2D řešení užít pouze pro predikci trendů, například za účelem porovnání více variant řešení.

### 6.1 Stanovení vlivu tlakové ztráty na hodnotu vlastního hluku

Nosnou částí této práce je vyjádření vlivu tlakové ztráty na výslednou hodnotu vlastního hluku. Ze získaných výsledků sedmi různých variant a rychlostí proudění na vstupu do tlumiče došlo ke stanovení celkové hladiny akustického výkonu, která je vztažena na hodnotu součinitele tlakové ztráty tělesa (viz Obr.

6.1). Jedná se o parametr, se kterým projektanti při návrzích VZT systémů běžně pracují a nebude tedy od věci s jejich znalostí odhadnout minimální hodnotu hladiny akustického výkonu vlastního hluku v místě za uvažovaným prvkem. Z uvedených křivek lze pozorovat logaritmickou závislost, která nabývá největších rozdílů při malé hodnotě součinitele tlakové ztráty. Rovněž nepřímo úměrně klesají rozdíly hladin vlastního hluku se zvyšující se rychlostí proudění na vstupu VZT prvku.



Obr. 6.1 Vliv součinitele tlakové ztráty tělesa na celkovou hladinu akustického výkonu vlastního hluku pro jednotlivé rychlosti proudění.

## 7 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Prezentované výsledky v této práci mohou být velmi prospěšné pro širší spektrum technických disciplín ve veřejném i komerčním sektoru. Teoretický aparát, uvedený v plné verzi práce může být užit jak ve vzdělávacích institucích, tak i dalších organizacích. Příkladem může být část věnující se strategii vedoucí ke snížení hluku z VZT, což může být velmi přínosné například pro začínající projektanty.

Vedle informačního obsahu nabízí práce i výstupy věcné. Ty mohou představovat poměrně cenný podklad pro zkušební i výrobní organizace. Uvedená potrubní trať, pro současné měření hydraulických a akustických parametrů, nabízí velmi atraktivní alternativu pro běžně užívanou konfiguraci s dozvukovou komorou. Tohle řešení dokáže redukovat nároky na prostor a naměřené hodnoty jsou přímo získány v prostředí potrubní sítě za testovaným prvkem. Největší benefit může mít tato práce pro výrobce tlumičů hluku a ostatních VZT prvků. Prezentované výstupy mohou pomoci lépe porozumět vzniku aeroakustických hluků a zároveň přispět k identifikaci a následní optimalizaci kulisových částí z hlediska tlakové ztráty i vlastního hluku. Vzhledem k tomu, že pro CAA úlohy nejsou běžně k dispozici praktické ověřené postupy, jak tomu je u úloh CFD, může uvedená metodika sloužit jako návod k tvorbě výpočetní sítě, nastavení řešiče a okrajových podmínek, případně i postprocesingu. Metodiku lze také vhodně adaptovat i na ostatní typy těles, které jsou obtékány proudem vzduchu.

Užitek disertační práce pro běžnou praxi představuje stanovený vliv tlakové ztráty na hodnotu vlastního hluku. Projektant VZT systémů je následně schopný z informací uvedených v projekčních materiálech, odhadnout hodnotu vlastního hluku pro kulisový tlumič hluku.

## 8 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala poměrně významným segmentem aeroakustiky, což představuje obtékání tuhých těles proudem vzduchu v uzavřeném prostoru.

V praktické části práce došlo ke splnění všech vytyčených dílčích cílů, které byly definovány v kapitole 3.

- Byl navržen alternativní přístup měření vlastního hluku a hydraulických parametrů v prostředí potrubní sítě bez zařazené dozvukové komory. Současně došlo i k modifikaci výpočetních vztahů potřebných pro vyhodnocení naměřených dat a stanovení hladin akustického výkonu vlastního hluku pro jednotlivá třetinooktávová pásma.
- Pro vybraný kulisový potrubní tlumič hluku byly navrženy a vyrobeny různé varianty nátrubků, kterými docházelo k úpravě tvaru středového jádra. Díky těmto nátrubkům bylo realizováno sedm různých variant stře-

dového jádra, které byly podrobeny sérií měření na navržené konfiguraci měřicí tratě.

- Byla zpracována metodika pro CAA pro proudění v uzavřeném prostoru. Samotná definice postupných kroků numerické simulace byla zhotovena do podoby nástroje umožňující na základě zvolených vstupů vytvoření journalového souboru, který je tvořen sekvencí příkazů určených ke zpracování v kódu ANSYS Fluent. Výhodou zvoleného řešení je automatický postprocessing, ale především eliminace prostojů a zadání chyby uživatelem. Vytvořený nástroj byl současně navržen ke zpracování výsledných souborů z FFT analýzy do podoby tabulek a grafů v MS Excel.
- Jednotlivé CAA přístupy byly validovány s experimentálně získanými daty. Došlo k identifikaci limitů metod LES/SBES pro případy simulace absorpčních tlumičů hluku a návrhu jejich možného řešení. Ukázalo se, že CAA pro zařízení zajišťující tlumicí funkci akustické energie a současně vedlejším produktem i její generaci, není triviální záležitost a vyžaduje si hlubokou znalost fyzikálně materiálových okrajových podmínek. Konkrétní závěry tohoto bodu diskutuje kapitola 6.
- Došlo ke stanovení vlivu tlakové ztráty na celkovou hodnotu vlastního hluku. Tento vztah je uveden ve formě křivek pro různé vstupní rychlosti proudění. Samotný vztah je uváděn pro hodnoty součinitele tlakové ztráty, se kterými projektanti běžně pracují. Bližší popis uvádí 6.1.

Výsledky této práce ukázaly hned několik směrů pro další výzkum. V první řadě by bylo vhodné ověřit způsobilost navržené měřicí tratě realizací mezilaboratorní zkoušky oproti konfiguraci se zařazenou dozvukovou komorou. Z hlediska numerického přístupu se jedná především možnosti uplatnění impedančních okrajových podmínek na plochy s akusticky absorpčním materiálem. Tento přístup by mohl více zpřesnit výsledky z CAA, nicméně vyžaduje poměrně rozsáhlou definici reflexního koeficientu. Ideální scénář pro komplexní hodnocení tlumičů hluku, vidí autor v podobě multifyzikálního řešení, kdy část proudění a absorpce zvuku by byla uvažována odděleně. Tento postoj by mohl vést i k optimalizaci z hlediska množství a velikosti absorpčních ploch, případně i tloušťky porézního materiálu.

# LITERATURA

- [1] A. BHATIA, B. Overview of Noise Control and HVAC Acoustics in Buildings. 2012.
- [2] CAI, C. a MAK, C. M. Generalized flow-generated noise prediction method for multiple elements in air ducts. *Applied Acoustics*. June 2018, 135, pp. 136–141. doi: 10.1016/j.apacoust.2018.02.008. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.02.008>.
- [3] MAK, C. M. a YANG, J. Flow-Generated Noise Radiated by the Interaction of Two Strip Spoilers in Low Speed Flow Ducts. *Acta Acustica united with Acustica*. 11 2002, 88, pp. 861–868.
- [4] MENTER, F. *Best Practice: Scale Resolving Simulations in ANSYS CFD*. ANSYS Germany GmbH, november 2015.
- [5] MÜLLER, G. a MÖSER, M. *Handbook of Engineering Acoustics*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-540-69460-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69460-1>.
- [6] NELSON, P. a MORFEY, C. Aerodynamic sound production in low speed flow ducts. *Journal of Sound and Vibration*. November 1981, 79, 2, pp. 263–289. doi: 10.1016/0022-460x(81)90372-2. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(81\)90372-2](https://doi.org/10.1016/0022-460x(81)90372-2).
- [7] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. nakladatelství ČVUT, 3 edition, 2009.
- [8] OLDHAM, D. a UKPOHO, A. A pressure-based technique for predicting regenerated noise levels in ventilation systems. *Journal of Sound and Vibration*. July 1990, 140, 2, pp. 259–272. doi: 10.1016/0022-460x(90)90527-7. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0022-460x\(90\)90527-7](https://doi.org/10.1016/0022-460x(90)90527-7).
- [9] ČSN EN ISO 11820. Akustika - Měření tlumičů in situ. technická norma, 1998.
- [10] ČSN EN ISO 7235. Akustika - Laboratorní měřicí postupy pro tlumiče hluku v potrubí a vzduchotechnické koncové jednotky - Vložný útlum, vlastní hluk a celková tlaková ztráta. technická norma, 2010.
- [11] UZUN, A., BLAISDELL, G. a LYRINTZIS, A. Recent Progress Towards a Large Eddy Simulation Code for Jet Aeroacoustics. 06 2002. doi: 10.2514/6.2002-2598. ISBN 978-1-62410-119-9.

# PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

## Články v periodiku

- [A.1] DRÁBEK, P. and ZÁLEŠÁK, M. Comparison of lighting simulation outcomes for electric lights with real reference, In *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2018, pp. 584-589, ISSN 1790-5079.
- [A.2] DRÁBEK, P., ŠVANCAROVÁ, Z. and KŘESÁLEK, V. Acoustic Evaluation of Three Architectural Types of Religious Buildings in Zlin, In *Akustika*. 2018, Volume 30, pp. 15-27, ISSN 1801-9064.
- [A.3] MAŇAS, D., MAŇAS, M., MIZERA, A., STOKLÁSEK, P., NAVRÁTIL, J., SEHNÁLEK, S. and DRÁBEK, P. The High Density Polyethylene Composite with Recycled Radiation Cross-Linked Filler of rHDPE<sub>x</sub>, In *Polymers*. 2018, Volume 10, ISSN 2073-4360.
- [A.4] DRÁBEK, P. and ZÁLEŠÁK, M. Quadruple Glazing Panel Filled With PCM and Its Influence on the Sound Insulation of Building Facades, In *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2017, Volume 13, pp. 360-366, ISSN 1790-5079.
- [A.5] DRÁBEK, P. and ZÁLEŠÁK, M. Acoustic verification of rectangular reverberation chamber using impulse sound source, In *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2016, Volume 12, pp. 377-385, ISSN 1790-5079.
- [A.6] DRÁBEK, P. and ZÁLEŠÁK, M. Effect of heat accumulation of buildings for control precision heating system, In *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2016, Volume 11, pp. 32-38, ISSN 1991-8763.

## Články ve sborníku

- [A.7] DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. and ZÁLEŠÁK, M. Možnosti stanovení základních akustických a hydraulických parametrů prvků vzduchotechnických systémů, In *Sborník přednášek 23. konference Klimati-*

zace a větrání. Praha : Společnost pro techniku prostředí, Odborná sekce Klimatizace a větrání, 2019, ISBN 978-80-02-02870-3.

- [A.8] SKOVAJSA, J., DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. and ZÁLEŠÁK, M. Měření v univerzální kompenzované kalorimetrické komoře, In *Sborník přednášek 23. konference Klimatizace a větrání*. Praha : Společnost pro techniku prostředí, Odborná sekce Klimatizace a větrání, 2019, ISBN 978-80-02-02870-3.
- [A.9] DRÁBEK, P. and OGUNLEYE, J. O. Possibilities of using lighting simulation tools to predict the level of illumination on the workplace from electric lights, In *MATEC Web of Conferences*. 2018, ISSN 2261-236X.
- [A.10] DRÁBEK, P. The regenerated noise of HVAC elements and its measurement in pipeline track, In *MATEC Web of Conferences*. 2018, ISSN 2261-236X.
- [A.11] ZÁLEŠÁK, M., CHARVÁTOVÁ, H., DRÁBEK, P., KOLÁČEK, M. and SEHNÁLEK, S. Základní výzkumné směry a trendy v oboru integrované systémy v budovách, In *Zborník odborných referátov z 19. medzinárodnej konferencie TEPELNÁ OCHRANA BUDOV 2017*. 2017, pp. 232-237, ISSN 978-80-89627-07-3.
- [A.12] DRÁBEK, P. Effect of implementation quadruple glazing panel into the walls on the airborne sound insulation of building facades, In *MATEC Web of Conferences*. 2017, ISSN 2261236X.
- [A.13] DRÁBEK, P. Comparison of two internationally recognized methods for determining the sound absorption coefficient, In *MATEC Web of Conferences*. 2017, ISSN 2261-236X.
- [A.14] SEHNÁLEK, S., DRÁBEK, P. and ZÁLEŠÁK, M. Friction coefficient measurements of silencers on specialized duct tract, In *MATEC Web of Conferences*. 2016, ISSN 2261-236X.
- [A.15] DRÁBEK, P. and ZÁLEŠÁK, M. Reverberation chamber and its verification for acoustic measurements, In *MATEC Web of Conferences*. 2016, ISSN 2261-236X.
- [A.16] DRÁBEK, P. and ZÁLEŠÁK, M. The impact of the heat accumulation on energy efficiency of building, In *Annals of DAAAM International*

*for 2015*. 2015, Volume 26, pp. 1-8, ISSN 2304-1382.

- [A.17] DRÁBEK, P. and ZÁLEŠÁK, M. Some aspects of the impact of building automation on energy efficiency of building, In *IEEE: Recent Advances in Systems*. 2015, pp. 240-242, ISSN 1790-5117.
- [A.18] ZÁLEŠÁK, M. and DRÁBEK, P. Vliv automatizace budov na energetickou efektivitu budovy, In *Tepelná ochrana budov 2015*. 2015, pp. 139-142, ISSN 978-80-89627-04-2.

## **Prototyp, funkční vzorek**

- [A.19] DRÁBEK, P., ZÁLEŠÁK, M. and SEHNÁLEK, S. Potrubní přípravek pro stanovení součinitele zvukové pohltivosti absorpčních materiálů na základě měření útlumu v potrubní síti, 2017, BI - Akustika a kmity.

## **Výzkumná zpráva**

- [A.20] ZÁLEŠÁK, M., DRÁBEK, P., SEHNÁLEK, S. and SKOVAJSA, J. Výzkumná zpráva pro ATREA, TnG-Air, Tech-Trade, ITC, Revel, Tepi.



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1	Fotografie kulisového potrubního tlumiče hluku GDE 200. . . . .	7
Obr. 4.2	Vyrobené varianty nátrubků (a - original, b - válcový, c - sférický, d - protáhlý). . . . .	8
Obr. 4.3	Schéma konfigurace potrubní tratě s otevřenými konci pro měření vlastního hluku VZT prvků. . . . .	9
Obr. 4.4	Trať pro měření vlastního hluku v potrubí (render). . . . .	9
Obr. 4.5	Hlavní obrazovka generátoru journalů pro 2D řešení. . . . .	11
Obr. 5.1	Vložný útlum pro variantu s/bez středového jádra. . . . .	12
Obr. 5.2	Tlaková ztráta pro různé tvarové varianty středového jádra. . . . .	13
Obr. 5.3	Celkové hodnoty hladin akustického výkonu vlastního hluku pro různé rychlosti proudění. . . . .	13
Obr. 5.4	Zlepšení tlakové ztráty a hladin vlastního hluku jednotlivých variant vůči Rct-Rct. . . . .	14
Obr. 5.5	Frekvenční průběh hladin akustického výkonu vlastního hluku pro $5 \text{ ms}^{-1}$ . . . . .	15
Obr. 5.6	Kontury hodnot statického tlaku v řezu osy symetrie pro jednotlivé varianty středového jádra. . . . .	16
Obr. 5.7	Kontury absolutních hodnot rychlostí v řezu osy symetrie pro jednotlivé varianty středového jádra. . . . .	17
Obr. 5.8	Frekvenční průběhy hladin akustického tlaku pro jednotlivé přístupy řešení (originální varianta). . . . .	18
Obr. 6.1	Vliv součinitele tlakové ztráty tělesa na celkovou hladinu akustického výkonu vlastního hluku pro jednotlivé rychlosti proudění. . . . .	20

## SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1	Nastavení řešiče pro nestacionární části 3D CAA. . . . .	10
----------	--	----

# SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRA- TEK

CAA	Computational Aero-Acoustics
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant–Friedrichs–Lewy
DES	Detached Eddy Simulation
FFT	Fast Fourier Transform
FW-H	Ffowcs-Williams & Hawking
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning
LES	Large Eddy Simulation
MDK	Multidýzová komora
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes
SBES	Stress-Blended Eddy Simulation
SGS	Subgrid-Scale
SRS	Scale Resolving
TUI	Text Interface Uses
VZT	Vzduchotechnický systém
WALE	Wall-Adapting Local Eddy-viscosity

# ŽIVOTOPIS

## Osobní údaje

Ing. Pavel Drábek  
NAROZEN: 24.8.1990  
ADRESA: 17. listopadu 3, 789 01, Zábřeh  
TELEFON: +420 725 300 227  
E-MAIL: pdrabek@utb.cz

## Vzdělání

### **2014 – do současnosti Doktorské studium**

Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně  
obor: Automatické řízení a informatika  
zaměření: Akustika, Numerické výpočty CFD a CAA, Osvětlení

### **2012 - 2014 Magisterské studium**

Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně  
obor: Integrované systémy v budovách

### **2009 - 2012 Bakalářské studium**

Fakulta aplikované informatiky, UTB ve Zlíně  
obor: Informační a řídicí technologie

## Odborné stáže

### **2018 ERASMUS+ stáž**

*Kaunas University of Technology, Kaunas (Litva)*  
činnost: období 17.09.2018 - 23.11.2018

### **07/2013 Odborná stáž**

*Schneider Electric, s.r.o., Napajedla, ČR*  
činnost: testování zařízení inteligentního osvětlení

## Zaměstnání

### **2014 – do současnosti Výzkumný projektový pracovník**

*CEBIA-Tech, FAI, UTB ve Zlíně, Zlín, ČR*

### **2014 - 2015 Energetický konzultant**

*Optimal-Energy, a.s., Brno, ČR*

### **2010 - 2014 Diagnostik řídicích jednotek motorů**

*Jiří Drtil Autoopravna, Mohelnice, ČR*

## **2012 - 2013 Grafik propagačních materiálů**

*Městské kulturní centrum Mohelnice, Mohelnice, ČR*

## **2006 - 2012 IT technik**

*Killian Systems, s.r.o., Zábřeh, ČR*

## **Absolvovaná školení**

### **2018 Školení produktů ANSYS**

*TechSoft Engineering, spol. s r.o., Praha*

ANSYS Meshing, Fluent Meshing, ANSYS Fluent - sdílení tepla, ANSYS  
Fluent - akustika, EnSight

### **2017 Nejistoty měření kalibrací a zkoušek**

*České kalibrační sdružení, z.s., Brno*

Vyhodnocování neelektrických veličin, GUM

## **Odborné znalosti**

- ANSYS SCDM, ANSYS Fluent, ANSYS Mechanical, ANSYS Discovery
- AutoCAD, Revit, Matlab, Wolfram Mathematica, Adobe Photoshop
- PLC B&R, ETS
- Java, HTML/CSS, MySQL, Linux Shell, VisualBasic

## **Jazyky**

- Angličtina (C1)

## **Aktivity**

- Spoluřešitel projektu INTERREG (od 2020) a NPU I. č. LO1303 (od 2015)
- Spoluřešitel smluvního výzkumu se spol. ATREA, Etelab, s.r.o., ITC, a.s., TNG-Air, s.r.o., Tech-Trade, s.r.o.

Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

**Výzkum akustických vlastností vybraných prvků  
vzduchotechnických systémů**

Research of Acoustic Properties of Selected Elements of HVAC Systems

Teze dizertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,  
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

První vydání

Náklad: vydáno elektronicky

Sazba: Pavel Drábek

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání: 2020

ISBN 978-80-7454-967-0

