

# Experimentální a numerická analýza hluku axiálního ventilátoru

Bc. David Kohout\*

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika  
doc. Ing. Hyhlik Tomáš Ph.D.

## Abstrakt

Práce se zabývá numerickým výpočtem hluku izolovaného axiálního ventilátoru a sestavením experimentu pro validaci vypočtených hodnot. Pro experiment bylo navrženo několik konfigurací. Zkoumanými vlivy na hluk ventilátoru byla poloha překážky před nebo za ventilátorem a poloha ventilátoru ve shroudu. Měření bylo provedeno v polobezdovukové komoře společnosti Bobcat v Dobříši. Druhou částí je porovnání naměřených dat se simulací. Kde pro numerickou simulaci je používán software od společnosti Exa založený na Lattice Boltzmannově metodě. V článku je popsán základní princip této metody a vyhodnocení výsledků simulace.

*Klíčová slova:* Ventilátor, Aeroakustika, Lattice Boltzmannova metoda

## 1. Úvod

V dnešní době se klade čím dál tím větší důraz na kvalitu životního prostředí a pracovní pohodu člověka. Důsledkem větších nároků na výkon strojů je nárůst jejich hlučnosti. Hluk pak může zanechat trvalé následky na zdraví. Proto jsou zavedeny normy pro povolené emise hluku, které musí jednotlivá zařízení splňovat. Jsou předepsány přesné požadavky pro akustické měření.

Práce vznikla v rámci spolupráce se společností Bobcat zabývající se výrobou a vývojem bagrů a nakladačů. Jedním z hlavních zdrojů hluku u těchto zařízení je ventilátor používaný při chlazení. Dalšími zdroji hluku jsou například hydraulické pumpy a spalovací motor. V rámci této práce byla sestavena konstrukce pro měření samotného axiálního ventilátoru. Pro měření byla použita polobezdovuková komora v Bobcatu v Dobříši.

Naměřená data pak sloužila pro ověření numerického výpočtu hluku ventilátoru. Pro výpočet proudění byl použit software PowerFLOW od společnosti Exa, který je založen na Lattice Boltzmannově metodě. Cílem bylo vyhodnocení přesnosti výpočtu. Dále také popis a analýza aeroakustických jevů spojených s axiálním ventilátorem.

## 2. Lattice Boltzmannova metoda

Program PowerFLOW, který je v této práci používán k řešení úloh proudění, je založen na Lattice Boltzmannově metodě (LBM). Tato metoda oproti konvenčním přístupům řešení proudění (CFD), které používají pro popis proudění makroskopický popis kontinua, používá mezoskopické kinetické rovnice. Předchůdcem LBM byla Lattice gas automata tzv. buněčné automaty (LGA). Nevýhodou LGA bylo použití diskretních hodnot, které měly za následek vnesení datového šumu. Výpočet bylo také možné použít pouze v oblasti z nízkých Reynoldsových čísel. Pro odstranění těchto nedostatků vznikla LBM, která vychází z diskretizace lattice Boltzmannovy rovnice [1]

$$f(\vec{r} + \vec{c}_i, t + 1) - f(\vec{r}, t) = \Omega(\vec{r}, t). \quad (1)$$

Kde  $f_i$  je distribuční funkce a nabývá hodnot mezi

0 a 1. Důsledkem bylo odstranění průměrování, potřebné k výpočtu makroskopických hodnot u LGA a s tím i odstranění datového šumu. Na pravé straně rovnice je kolizní člen  $\Omega$ , který popisuje počet částic na diskretní oblasti před a po kolizi. Pro řešení tohoto členu se zavádí aproximace, která tento člen zjednoduší, bez zavedení větší chyby do výsledku. Model aproximace je pojmenován po svých autorech Bhatnagarovi, Grossovi a Krookovi. Aproximaci zapisujeme ve tvaru [2]

$$\Omega = \frac{1}{\tau} \cdot (f^{eq} - f). \quad (2)$$

Kde  $\tau$  představuje relaxační čas, je omezen na hodnoty z intervalu  $(0, 5; \infty)$ . Definuje se jako čas potřebný pro uvedení distribuční funkce do rovnovážného stavu  $f^{eq}$ . S klesající hodnotou  $\tau$  se bude hodnota distribuční funkce přibližovat rovnovážnému stavu rychleji. Pro vyšší hodnoty se bude naopak přibližování rovnovážnému stavu zpomalovat. Makroskopické hodnoty jako je hustota  $\rho$  a rychlost  $\vec{u}$ , jsou vypočteny z hodnot distribuční funkce [1]

$$\rho = \sum_{i=0}^{m-1} f_i, \quad (3)$$

$$\rho \vec{u} = \sum_{i=0}^{m-1} f_i \vec{c}_i. \quad (4)$$

Druhým parametrem ve vztahu (2) je distribuční funkce  $f^{eq}$  v rovnovážném stavu. Rovnice pro její výpočet je odvozena z distribuční funkce Maxwella-Boltzmannova při zachování hmotnosti a hybnosti. Pro izotermickou kapalinu je definován vztahem [3]

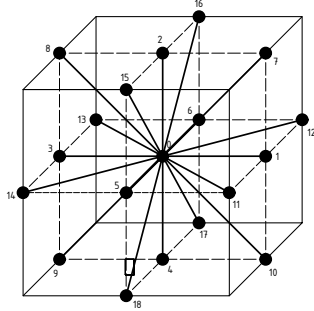
$$f_i^{eq} = \rho w_i \left[ 1 + \frac{c_i \cdot \vec{u}}{c_s^2} + \frac{(c_i \cdot \vec{u})^2}{c_s^2} - \frac{\vec{u}^2}{2c_s^2} \right]. \quad (5)$$

Zavádí se zde váha přenosu částic v daném směru  $w_i$ . Zohledňuje podíl pohybu v i-tém směru na celkovém pohybu částic v rovnovážném stavu. Kde součet

\*Kontakt na autora: kohouda1@fs.cvut.cz

$w_i$  ve všech směrech musí být roven jedné. Podle použité mřížky se tyto parametry mění. [3]

Mřížka je pravidelná a pravouhlá. Zapisuje se ve tvaru  $DnQm$ , kde  $n$  značí počet dimenzí prostoru a  $m$  je počet diskretních vektorů  $e_i$ . Program PowerFLOW používá trojrozměrnou mřížku s 19-ti diskretními vektory  $e_i$  mřížku D3Q19 viz obr. 1



Obr. 1. Mřížka D3Q19

Pro modelování turbulence pomocí LBM je nahrazen molekulární relaxační čas  $\tau$  turbulentním relaxačním časem  $\tau_{eff}$ . Turbulentní relaxační čas lze odvodit z RG (renormalization group). Kde  $\eta$  je získáno kombinací parametru bezrozměrné smykové rychlosti  $\eta = k \cdot |S| / \epsilon$ , lokální výřivosti  $\eta_\omega = k \cdot |\Omega| / \epsilon$  a helicity [4]

$$\tau_{eff} = \tau + C_\mu \cdot \frac{k^2 / \epsilon}{T \cdot \sqrt{(1 + \eta^2)}}. \quad (6)$$

PowerFLOW používá model Very Large Eddy Simulation (VLES). Rozlišitelná měřítka jsou počítána přímo a malá měřítka jsou počítána RNG  $k - \epsilon$  turbulentním modelem (Renormalization group method), který je odvozen pomocí statistické metody renormalizačních grup. Původní model  $k - \epsilon$  rozšiřuje o výpočet vlivu vírů na turbulenci. Přidává výpočet turbulentního Prandtlova čísla a efektivní viskozity. Pomocí těchto změn lze tento model aplikovat na větší škálu typů proudění. [5]

Přesné vyřešení turbulentní mezní vrstvy u stěny pro vysoká Reynoldsova čísla je výpočetně velmi náročné. Proto se zavádí stěnová funkce, která nastaví přibližné okrajové podmínky pro částice v blízkosti stěny. V PowerFLOW je používána stěnová funkce, která je založena na rozšíření stěnového zákona o tlakový gradient, k určení lokálního povrchového tření [5]

$$u^+ = f \frac{y^+}{A} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y^+}{A} + B, \quad (7)$$

$$A = 1 + f \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (8)$$

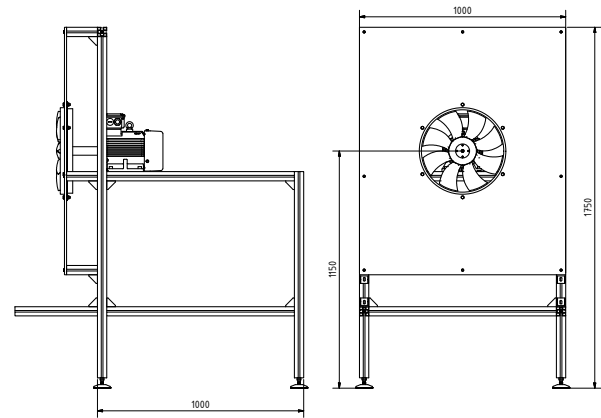
Kde  $u^+$  je bezrozměrná rychlost  $u^+ = u/u^*$  a  $y^+$  je bezrozměrná vzdálenost od stěny  $y^+ = (y \cdot u^*) / \nu$

### 3. Měření hluku ventilátoru

Měření bylo provedeno v polobeždozvukové komoře v Bobcatu v Dobříši splňující mezinárodní normy: ISO 3744, ISO 3745, ISO 9616-1, ISO 9616-2, ISO 9616-3. Polobeždozvuková komora je specifická tím, že všechny stěny a strop jsou obloženy absorpčním obkladem, který pohlcuje akustické vlnění. Dochází pouze k odrazu od betonové podlahy.

#### 3.1. Návrh konstrukce

Požadavky kladené na měřicí konstrukci pro ventilátor byly tuhost konstrukce a stabilita. Pro měření byl vybrán osmilistý ventilátor o průměru 390 mm od společnosti Multiwing, který byl poháněn elektromotorem. Pro co nejmenší vliv samotné konstrukce na tok přes ventilátor byla vytvořena příruba, která umožnila prodloužení vzdálenosti mezi motorem a ventilátorem na 160 mm.

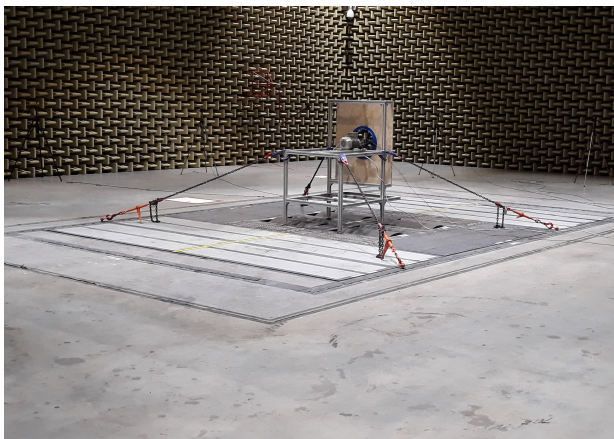


Obr. 2. Měřicí konstrukce

Ventilátor byl umístěn do symetrického aerodynamického obalu tzv. "shroud", který usměřňuje tok vzduchu. Shroud byl vyroben na 3D tiskárně a vnitřní válcové plochy byly poté zbrúšeny, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality povrchu. Hloubka shroudu odpovídá šířce ventilátoru. Důležitým parametrem je vzdálenost od konce lopatky ventilátoru ke shroudu. Vzdálenost byla zvolena 5 mm. Oddělení vtokové a výtokové částí ventilátoru je zajištěno dřevěnou deskou o tloušťce 20 mm. Nosná část konstrukce byla vyrobena z alutec profilů.

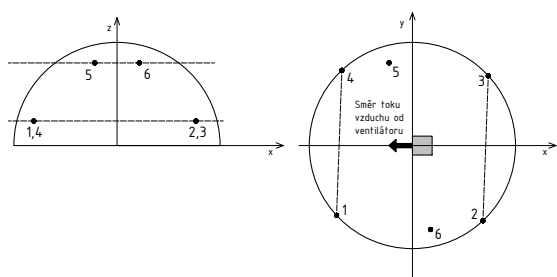
#### 3.2. Nastavení experimentu

Při měření byla konstrukce předeptuta řetězy k podlaze z důvodu zlepšení tuhosti a zajištění polohy konstrukce viz. obr.3. Důležitou částí byla přesná regulace otáček elektromotoru, která byla zajištěna pomocí frekvenčního měniče. Rozvodná skříň s měničem byla umístěna do řídicí místnosti. Pro přesný odečet otáček elektromotoru byla použita tacho sonda.



Obr. 3. Umístění konstrukce v polobezdozvukové komoře

Poloha mikrofonů v polobezdozvukové komoře podléhá normám ISO 3744 a ISO 3745. Mikrofony jsou umístěny na kulové ploše o poloměru 10m, čtyři ve spodní části a dva nad měřenou konstrukcí viz. obr.4. Souřadnice jednotlivých mikrofonů jsou zapsány v tabulce 1.



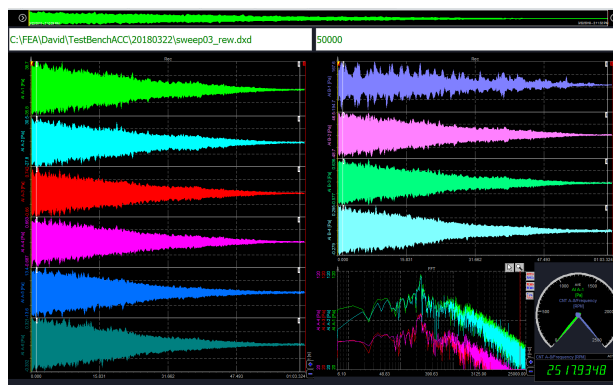
Obr. 4. Rozmístění mikrofonů

Tabulka 1. Souřadnice polohy mikrofonů

| Mikrofon č. | x [m] | y [m] | z [m] |
|-------------|-------|-------|-------|
| 1           | -7,1  | -7,1  | 1,5   |
| 2           | 7,1   | -7,1  | 1,5   |
| 3           | 7,1   | 7,1   | 1,5   |
| 4           | -7,1  | 7,1   | 1,5   |
| 5           | 2,7   | -6,5  | 1,5   |
| 6           | -2,7  | 6,5   | 1,5   |

Měřicí mikrofony jsou od společnosti Brüel & Kjaer typu 4189 vyhovují IEC 61672 třídě 1. Jejich dynamický rozsah je mezi 14,6 dB a 146 dB. Mikrofony obsahují předzesilovač A21 s vysokým vstupním odporem 1,5 GΩ a nízkým výstupním odporem. To umožňuje zapojení dlouhých kabelů bez ztráty signálu. Tacho sonda a výstupy ze všech mikrofonů jsou pak svedeny do jedné měřicí ústředny od společnosti DEWESoft. Kde je signál zároveň zaznamenáván a

zpracován. Na obr.5 je zobrazený záznam z měření v softwaru DEWESoftX2.



Obr. 5. Rozmístění mikrofonů

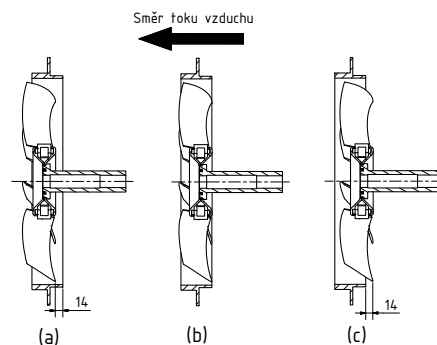
Před samotným měřením proběhla kalibrace všech mikrofonů. Byl naměřen hluk na pozadí, bez zapnutého ventilátoru, ten byl odečten od následujících měření.

### 3.3. Výsledky experimentu

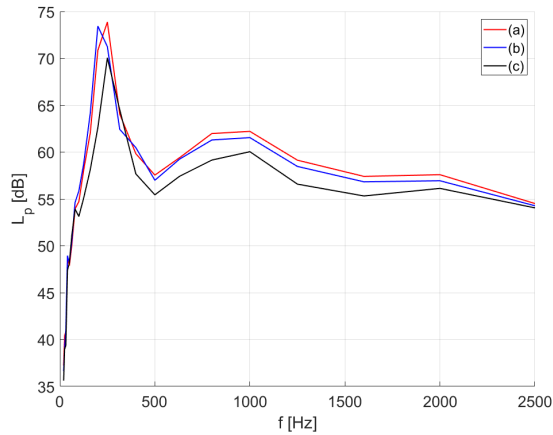
Experiment byl navržen pro validování dat numerického výpočtu, ale také pro sledování vlivu různých parametrů na hluk ventilátoru. Byly zvoleny dvě konfigurace nastavení ventilátoru:

- Poloha ventilátoru ve shroudu
- Poloha překážky

Prvním zkoumaným parametrem byl vliv polohy ventilátoru ve shroudu na generovaný hluk viz. obr.6. Při experimentu byla naměřena teplota v polobezdozvukové komoře 18 °C a vlhkost vzduchu 65%. Vzorovací frekvence byla nastavena na 50000 Hz. Byly nastaveny konstantní otáčky ventilátoru na hodnotu 2455 ot/min.



Obr. 6. Schéma polohy ventilátoru ve shroudu



**Obr. 7.** Spektra celkové hladiny akustického tlaku  $L_p$  [dB] v rozsahu frekvencí  $f$  0 – 2,5 kHz pro polohy (a), (b), (c)

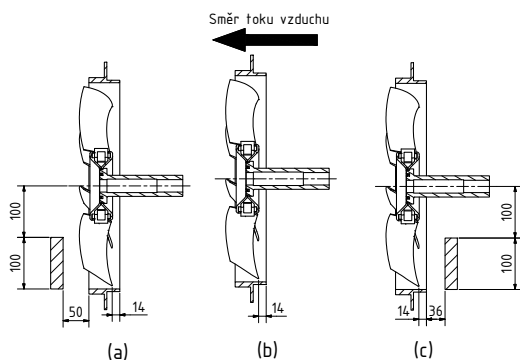
Na obr. 7 je zobrazena průměrná hladina akustického tlaku  $L_p$  v třetinooktávním pásmu pro jednotlivé polohy ventilátoru ve shroudu. Hodnota akustického tlaku je vypočtena podle vzorce 9 [6], zprůměrována z mikrofónů 1-6.

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p}{p_{ref}} \quad (9)$$

Kde  $p$  je naměřený akustický tlak a  $p_{ref}$  je referenční tlak, který udává hladinu 0 dB. Hodnota referenčního tlaku je rovna  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Nejzajímavější oblast spektra je do 2,5 kHz, kde jsou nejvýznamnější zdroje hluku. Ventilátor generuje hluk průchodem lopatek, frekvenci  $f_L$  vypočteme podle vzorce (10). Druhým mechanismem generování hluku je turbulentní proudění. Pro tento případ lze vidět, že frekvence lopatek na obr.7 není zachycena. Přítomnost této frekvence je odvislá od polohy překážky, tento vliv je diskutován v druhé části.

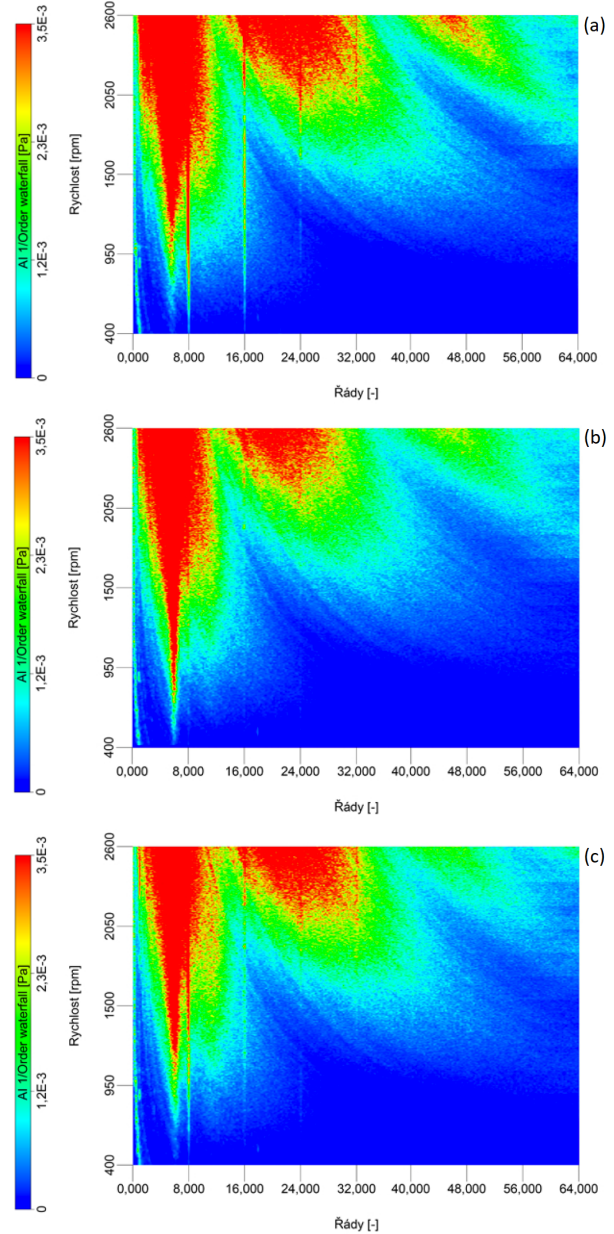
$$f_L = \frac{N \cdot b}{6300} = \frac{2455 \cdot 8}{60} = 327,3 \text{ Hz} \quad (10)$$

Hlavní zdroj hluku je na 200 Hz a 250 Hz, jedná se o aerodynamický hluk vznikající v odtrhávajícím se proudě vzduchu za ventilátorem. Z obrázku 7 je patrné, že posouváním odtokové hrany lopatek ventilátoru do shroudu viz obr. 6 je docíleno snížení hladiny akustického tlaku.



**Obr. 8.** Schéma polohy překážky vůči ventilátoru

Druhým zkoumaným parametrem byl vliv překážky viz obr.8 na celkový hluk a hluk generovaný průchodem lopatek. Měření bylo provedeno za stejných podmínek jako předešlé. Pouze pro otáčky byl nastaven rozběh ventilátoru z 400 ot/min na 2600 ot/min.



**Obr. 9.** Řádová analýza ventilátoru pro otáčky v rozmezí od 400 ot/min do 2600 ot/min pro polohu překážky v odtokové části (a), bez překážky (b), polohu překážky v přítokové části (c)

Řádová spektra jsou oproti frekvenčním bezrozměrná. Jeden řád je pak fixním násobkem základní frekvence stroje, v tomto případě násobky frekvence průchodu lopatek ventilátoru  $f_L$ . Vlastní frekvence konstrukce jsou v grafu zobrazeny svislou čarou v oblasti do 1. řádu.

Důležitým úsekem je však frekvence v okolí 6. řádu, která je pro všechny polohy dominantní a její rozsah se s rostoucími otáčkami zvětšuje. Jedná se o frekvenci vybuzeou turbulentním prouděním v úplavu ventilátoru.

Frekvence procházejících lopatek  $f_L$  je reprezentována svislou čarou na 8.řádu. Pro ventilátor bez umístění překážky obr.8(b) je hluk generovaný na této frekvenci překryt hlukem vznikajícím v úplavu ventilátoru, který se nachází v okolí 6.řádu. Při umístění překážky (a) a (c) je tato frekvence vybudena. Dále lze vidět její harmonický druhý, třetí a čtvrtý násobek na 16., 24. a 32. řádu.

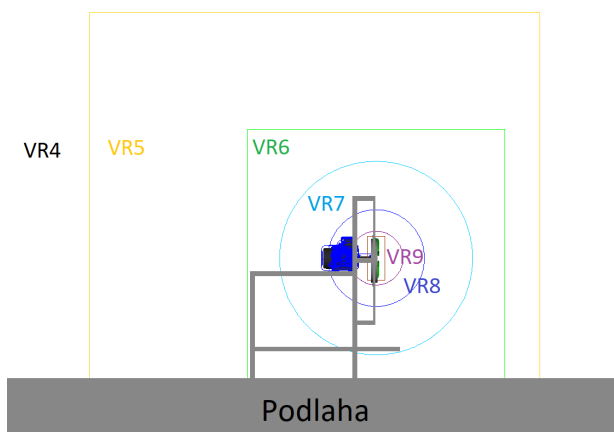
## 4. Numerická analýza hluku ventilátoru

Kapitola je věnována ověření přesnosti numerického výpočtu hluku ventilátoru v komerčním softwaru od společnosti Exa. Výpočet proudění byl proveden v programu PowerFLOW 5.4b, založeného na LBM. Pro přímý výpočet akustických hodnot je použita metoda Ffowcs Williams and Hawkins [7] v programu PowerACUSTICS 4.1b.

### 4.1. Nastavení simulace

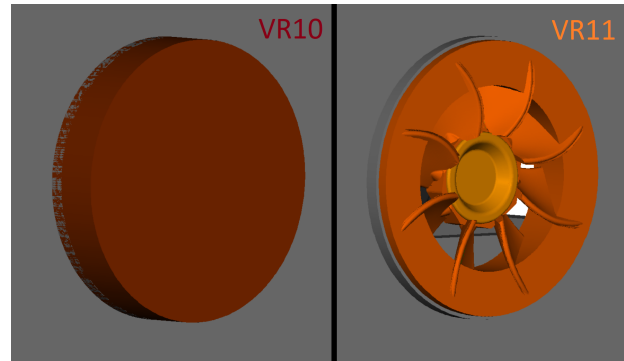
Pro ověření výpočtu byla vybrána konfigurace s vysunutým ventilátorem ze shroudu viz obr.7 (a) bez překážky. Otáčky ventilátoru byly nastaveny na 2455  $ot/min$ , stejně jako při experimentu. Průměr ventilátoru  $D_v = 390mm$  a průměr habu je  $D_h = 132mm$ . Rychlost na konci lopatek je potom rovna  $u_t = 50.132m/s$ . Okolní tlak byl nastaven na hodnotu  $p_o = 101325Pa$  a teplota  $T = 25^\circ C$ .

Na okraji výpočtové oblasti viz obr.10 byly nastaveny okrajové podmínky pro tlak  $p = p_o$ . Pro zabránění odrazu akustických vln od stěn, byly vytvořeny tzv. "sponge zóny". Podlaha byla nastavena jako pevná stěna.



Obr. 10. Rozdělení výpočetní oblasti na VR

Výpočetní síť je generována automaticky před samotným výpočtem. Pro nastavení rozlišení sítě jsou používány tzv. "Volume of resolution"(VR). Velikost celé sítě je vztažena k nejmenšímu elementu celé sítě, od kterého pak velikost v jednotlivých VR dvakrát vzroste.



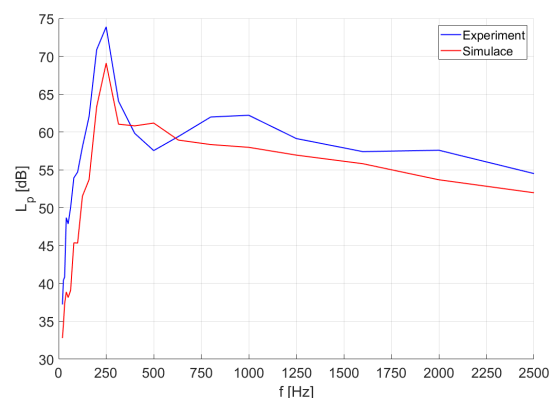
Obr. 11. VR10 a VR11 v okolí ventilátoru

Pro výpočet byla nastavena velikost nejmenší buňky  $\Delta x = 0,4mm$  pro VR11 viz obr.11, to odpovídá 975 elementům na průměr ventilátoru. Celková doba výpočtu byla nastavena na 22 otáček ventilátoru. Zápis vypočtených dat je až po 6 otáčkách, kde dojde k ustálení toku a hluku. Časový krok je dopočten podle velikosti nejmenšího elementu na  $\Delta t = 8.148 \cdot 10^{-5}s$ .

Hodnoty akustického tlaku jsou zapisovány na kulovou plochu v oblasti VR7, ze které jsou pomocí FW-H přepočteny vzhledem k jednotlivým mikrofonom. Velikost elementu v této oblasti je  $x_{V7} = 6,4mm$ . Pro popsání akustické vlny je potřeba 12 až 16 bodů na vlnovou délku, proto je možné vyhodnocovat frekvenci do  $f_{max} = 4,9kHz$ .

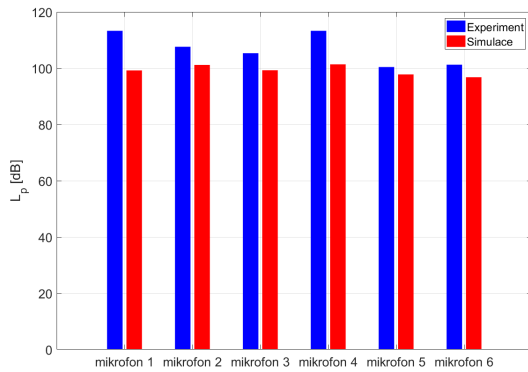
### 4.2. Porovnání výsledků simulace a experimentu

Hladina akustického tlaku pro experiment a simulaci v třetinooktávovém pásmu je zobrazena na obr.12. V této konfiguraci není viditelná frekvence procházejících lopatek a její násobky. Zůstává zde pouze maximum 250 Hz, kde se data ze simulace a experimentu scházejí na stejné frekvenci, s jinou hladinou akustického tlaku (posunutou o 4,6%). Podle [8] mohou být tyto frekvence důsledkem vzniku vírových struktur mezi krajem lopatky a shroudem. Vírové struktury se pohybují menší rychlostí, než je rychlost otáčení ventilátoru. Dochází k pravidelnému prorážení vírových struktur lopatkami ventilátoru a tím se může generovat hluk o nižší frekvenci, než je frekvence procházejících lopatek  $f_L$ .



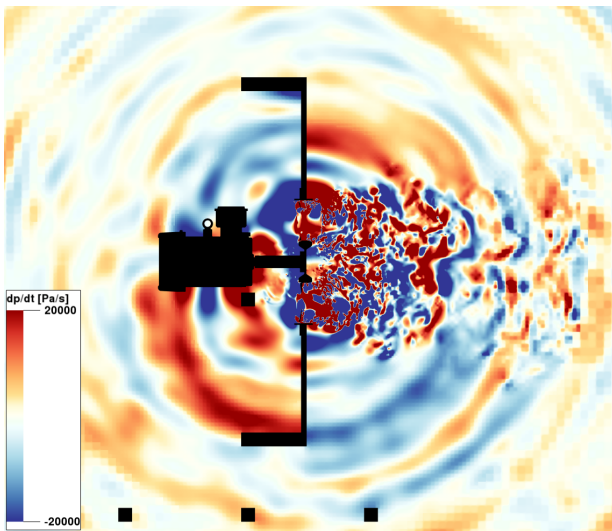
Obr. 12. Porovnání spektra celkové hladiny akustického tlaku  $L_p [dB]$  experimentu a simulace v rozsahu frekvencí  $f 0 - 2,5 kHz$

Druhým parametrem pro porovnání experimentu je celková hladina akustického tlaku pro jednotlivé mikrofony. Na tomto grafu můžeme vidět, že odchylka simulace od reálných hodnot je u jednotlivých mikrofonů v rozmezí 4 – 10%. Největší odchylka 10% je pro mikrofony umístěny v oblasti úplavu za ventilátorem a pro zbylé mikrofony je odchylka mezi 4 – 5%. Z mikrofonů je pak spočtena průměrná hodnota, pro kterou vychází celková odchylka 7,5%



**Obr. 13.** Porovnání průměrné hodnoty hladiny akustického tlaku  $L_p$  [dB] na jednotlivých mikrofonech experimentu a simulace v rozsahu frekvencí  $f$  0 – 2,5 kHz

Pro zobrazení šíření akustických vln je vypočtena časová derivace tlaku v rovině osy ventilátoru viz obr.14.



**Obr. 14.** Zobrazení akustického tlaku v rovině osy ventilátoru

## 5. Závěr

V experimentální části byla provedena normalizovaná akustická měření pro izolovaný axiální ventilátor. Výsledkem měření bylo popsání vlivu aerodynamické překážky a shroudu na hluk generovaný ventilátorem. Snížení hluku se docílilo při zasunutí odtokové hrany lopatky ventilátoru do shroudu. Dále zde byl diskutován vliv vstupního toku na frekvenci procházejících lopatek ventilátoru, která pro konfiguraci bez překážky zanikala.

Vyšetřování šíření zvuku z hlediska numerických výpočtů je složitým a výpočetně náročným úkolem. Použití konvenčních přístupů mechaniky tekutin založených na řešení Navier-Stokesových rovnic je omezeno na menší výpočetní domény. V rámci této práce byl vybrán komerční program založený na Lattice Boltzmannově metodě. Hlavní výhodou této metody je snadná paralelizovatelnost jednotlivých výpočtů a s tím i možnost využití většího výpočetního výkonu.

Důležitou částí práce je vyhodnocení přesnosti výpočtu. Podle průběhu spekter lze vidět, že simulace kopíruje průběh naměřených hodnot v okolí maxima 250 Hz. Samotná přesnost výpočtu hladiny akustického tlaku je v toleranci do 10%.

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Stanislavu Stančkově za konzultace a odbornou pomoc při měření a doc. Ing. Tomáši Hyhlíkovi Ph.D. za konzultace při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Bobcat za poskytnutí prostředků, měřících prostor k realizaci experimentu a softwaru pro numerické výpočty.

## Seznam symbolů

|               |  |
|---------------|--|
| $b$           | počet lopatek ventilátoru (1)  |
| $B$           | empirická konstanta (1)  |
| $\vec{c}$     | rychlost částice (m/s)   |
| $c_s$         | rychlost zvuku (m/s)   |
| $C_\mu$       | konstanta modelu (1)   |
| $e_i$         | diskrétní vektor (1)   |
| $f$           | distribuční funkce (1)   |
| $f^{eq}$      | distribuční funkce v rovnovážném stavu (1)                                 |
| $f_L$         | frekvence procházejících lopatek (Hz)                                      |
| $k$           | turbulentní kinetická energie ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )                  |
| $L_p$         | hladina akustického tlaku (dB)   |
| $\bar{N}$     | otáčky ventilátoru (ot/min)  |
| $p$           | tlak (Pa)  |
| $\vec{r}$     | vektor polohy částice (m)  |
| $t$           | čas (s)  |
| $T$           | teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )   |
| $\vec{u}$     | vektor makroskopické rychlosti proudění ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
| $u^+$         | bezrozměrná rychlost (1)   |
| $w_i$         | váha přenosu částic v daném směru (1)                                      |
| $\vec{x}$     | vektor polohy (m)  |
| $y^+$         | bezrozměrná vzdálenost od stěny (1)  |
| $\epsilon$    | rychlost disipace ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ )                              |
| $\eta$        | smyková rychlost (1)   |
| $\eta_\omega$ | lokální vířivost (1/s)   |
| $\kappa$      | empirická konstanta (1)  |
| $\nu$         | kinematická viskozita ( $\text{m}^2/\text{s}$ )                            |
| $\rho$        | hustota ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )   |
| $\tau$        | relaxační čas (s)  |
| $\tau_{eff}$  | turbulentní relaxační čas (s)  |
| $\Omega$      | kolizní člen (1)   |

## Literatura

- [1] A. A. Mohamad. *Lattice Boltzmann method. fundamentals and engineering applications with computer codes* / A. A. Mohamad. New York: Springer, c2011. ISBN: 978-0-85729-454-8.
- [2] Shiyi Chen a Gary D. Doolen. "LATTICE BOLTZMANN METHOD FOR FLUID FLOWS". In: (). DOI: 10.1146/annurev.fluid.30.1.329. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.fluid.30.1.329>.
- [3] Cyrus K. Aidun a Jonathan R. Clausen. "Lattice-Boltzmann Method for Complex Flows". In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 42.1 (2010), s. 439–472. ISSN: 0066-4189. DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145519. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-fluid-121108-145519>.
- [4] Kaveh Habibi et al. "Prediction of the Sound radiated from Low-Mach Internal Mixing Nozzles with Forced Mixers using the Lattice Boltzmann Method. symposium, April, 1-4 1998". In: (). DOI: 10.2514/6.2013-2143. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2013-2143>.
- [5] Christopher M. Teixeira. "Incorporating Turbulence Models into the Lattice-Boltzmann Method". In: *International Journal of Modern Physics C* 09.08 (1998), s. 1159–1175. ISSN: 0129-1831. DOI: 10.1142/S0129183198001060. Dostupné z: <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0129183198001060>.
- [6] Michael Moser. *Engineering acoustics. an introduction to noise control*. 2nd ed. New York: Springer, c2009. ISBN: 978-3-540-92722-8.
- [7] Guillaume Brès, Franck Pérot a David Freed. "A Ffowcs Williams - Hawkins Solver for Lattice-Boltzmann Based Computational Aeroacoustics". In: *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (2010-06-07), s. -. DOI: 10.2514/6.2010-3711. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2010-3711>.
- [8] Franck Perot et al. *Axial fan noise aeroacoustics predictions and inflow effect on tonal noise using LBM*. Květ. 2013.