

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**OVĚŘENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ
EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘICÍ TRATĚ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Souhrn

Bakalářská práce se zabývá měřením akustických vlastností experimentální měřicí trati navržené pro zjišťování akustických parametrů různých vzduchotechnických elementů. Cílem této práce je vytvořit podrobný popis jednotlivých částí měřicího systému a provést měření, na jehož základě stanovíme parametry hluku pozadí této soustavy. Ze způsobu provedení daného měření na této trati navrhnou změny, které pomohou zlepšení ovladatelnosti a zjednodušení postupu zpracování naměřených dat.

Summary

This thesis is focused on the measurement of acoustic properties for experimental measurement device. The device was designed for detection of acoustic parameters for various HVAC elements. The major goal of this work is to create a detailed description of the individual components of the measurement system and to perform measurements. From these measurements we set the background noise of the system. In the final part of this thesis I discuss changes that will improve measuring of acoustic parameters and I suggest ways how to simplify the process of data processing.

Prohlášení o samostatném vypracování bakalářské práce

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Ověření akustických parametrů experimentální měřicí tratě“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Kučery, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 12. 1. 2016

Karel Tůma

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu ing. Miroslavu Kučerovi, Ph.D. za odborné konzultace a rady v průběhu zpracování této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých značek	6
Úvod	8
1. Aerodynamické zdroje hluku	9
1.1 Hluk při výtoku tekutiny	9
2. Experimentální měřicí trať	13
2.1 Popis experimentální měřicí trati	13
2.2 Popis a schéma zapojení měřících prvků na experimentální trati	24
3. Měření akustických parametrů experimentální trati	27
3.1 Podmínky a schéma měření	27
3.2 Stanovení hladin akustického výkonu volné vyústky	28
3.3 Stanovení celkové hladiny akustického výkonu	33
3.4 Porovnání akustických parametrů dvou tratí	37
3.4.1 Popis porovnávané trati	37
3.4.2 Výsledky	40
4. Návrh změn v dosavadním způsobu měření	43
5. Závěr	45
6. Použitá literatura	47

Seznam použitých značek

Značka	Veličina	Rozměr
A	celková pohltivost zvuku místnosti	m^2
c	rychlost zvuku	m/s
d	průměr	m
D	roztečný průměr	m
f	kmitočet	Hz
I	intenzita zvuku	W/m^2
K	koeficient úměrnosti	-
K_S	konstanta vyústky	-
K_{1p}	korekce na hluk pozadí	dB
$K_{2\alpha}$	korekce na zkušební prostředí	dB
$K_{1,2}$	přepočtená konstanta polynomu	
$K_{1,2}^*$	konstanta polynomu	-
L_p	hladina akustického tlaku	dB
L_{pi}	hladina akustického tlaku v i -tém bodě bodě	dB
L_{poz}	hladina akustického tlaku pozadí	dB
L'_p	střední hladina akustického tlaku	dB
L_W	hladina akustického výkonu	dB
L_{Wc}	celková hladina akustického výkonu	dB
M	hmotnostní průtok	kg/s
Ma	Machovo číslo	-
N	počet mikrofonů	-
n	počet škrťících perforovaných desek	-
p	tlak, přetlak	Pa, MPa
r	měrná plynová konstanta	J/kgK
Re	Reynoldsovo číslo	-
S	měřicí plocha, jmenovitý průřez	m^2
Sh	Strouhalovo číslo	-

Značka	Veličina	Rozměr
T	termodynamická teplota	K
t	teplota vzduchu	°C
W	akustický výkon	W
w	rychlost proudění vzduchu	m/s
x	vzdálenost	m
	Reynoldsovo číslo	-
y	celková hladina akustického výkonu	dB
ΔL	korigovaná střední hladina akustického tlaku	dB
ΔL_g	korekce na směr vyzařování	dB
ΔL_f	korekce na kmitočtové složení zvuku	dB
Δt	rozdíl teplot v trysce	K
Δp	tlak v dýze	Pa
κ	Poissonova konstanta	-
μ	průtokový součinitel	-
ν	kinematická viskozita vzduchu	m ² /s
ρ	hustota vzduchu	kg/m ³

Úvod

Cílem mé bakalářské práce je provést podrobný popis systému a vyhotovit podrobný návod k obsluze experimentální měřicí tratě, která je určena pro měření akustického výkonu elementů komfortního vzduchotechnického zařízení. Tato trať byla navržena a postavena v roce 2005 Doc. Ing. R. Novým, CSc. a Ing. M. Kučerou, Ph.D. a v nedávné době prošla rekonstrukcí tlumičů hluku.

Experimentální měřicí trať je umístěna v halových laboratořích Ústavu techniky životního prostředí a jedná se o velmi sofistikovaný systém, který musel splnit celou řadu podmínek, aby byla zajištěna funkčnost celého systému a výstupem měření byly jednoznačné výsledky vypovídající o jednotlivých měřených elementech. Mezi hlavní podmínky, které vedly k volbě konstrukčního a systémového řešení této tratě patří nízká hladina hluku pozadí, což byla hlavní nevýhoda již existující trati, kde proud vzduchu vzniká pomocí připojeného ventilátoru, který je značným zdrojem aerodynamického hluku.

Právě tento nedostatek vedl autory k úvaze nad řešením systému dané měřené trati, kde by tento zdroj aerodynamického hluku odpadl. Jako řešení zde bylo vybráno použití tlakové nádoby o objemu $6,3 \text{ m}^3$, kde po natlakování pomocí kompresoru na předepsaný tlak dojde po otevření ventilu k řízené expanzi vzduchu a následnému proudu vzduchu potrubím.

Tento popsáný postup měření sám několikrát provedu a určím limitní parametry experimentální měřicí tratě, dále určím hydraulické a akustické okrajové podmínky za nichž je možné experimentální měření na této trati provádět.

V závěru se budu snažit nasbírané informace využít k návrhu ke zlepšení systému stran ovladatelnosti a sběru dat.

1. Aerodynamické zdroje hluku

Důvodem vzniku aerodynamického hluku je působení proudu vzduchu na okolní obklopující prostředí. Jedná se tedy o zvuk způsobený pohybem vzduchu nikoliv kmitáním povrchu pevných těles jako u klasické akustiky. U aerodynamických zdrojů hluku je třeba rozlišovat dva základní způsoby vzniku hluku:

- a) volnou turbulenci, tj. např. hluk při výtoku tekutiny z potrubí
- b) hluk od turbulence vzniklé obtékáním tuhého tělesa

V našem případě se budeme zabývat pouze prvním jmenovaným způsobem, tedy hlukem při výtoku tekutiny z volného konce vyústky.

1.1 Hluk při výtoku tekutiny

Při výtoku vzduchu z volného vyústění potrubí v hlukové laboratoři není proud vzduchu omezen stěnami ani zde nevznikají žádné zpětné proudy, které by mohly ovlivnit průběh proudu, proto lze hovořit o volném proudu. Pokud navíc přivádíme vzduch do prostředí o stejných fyzikálních vlastnostech, lze hovořit o volném zatopeném proudu. Tento proud vzduchu je jedním ze základních případů aerodynamického zdroje zvuku. Jeho aerodynamické schéma je na obr.1-1.

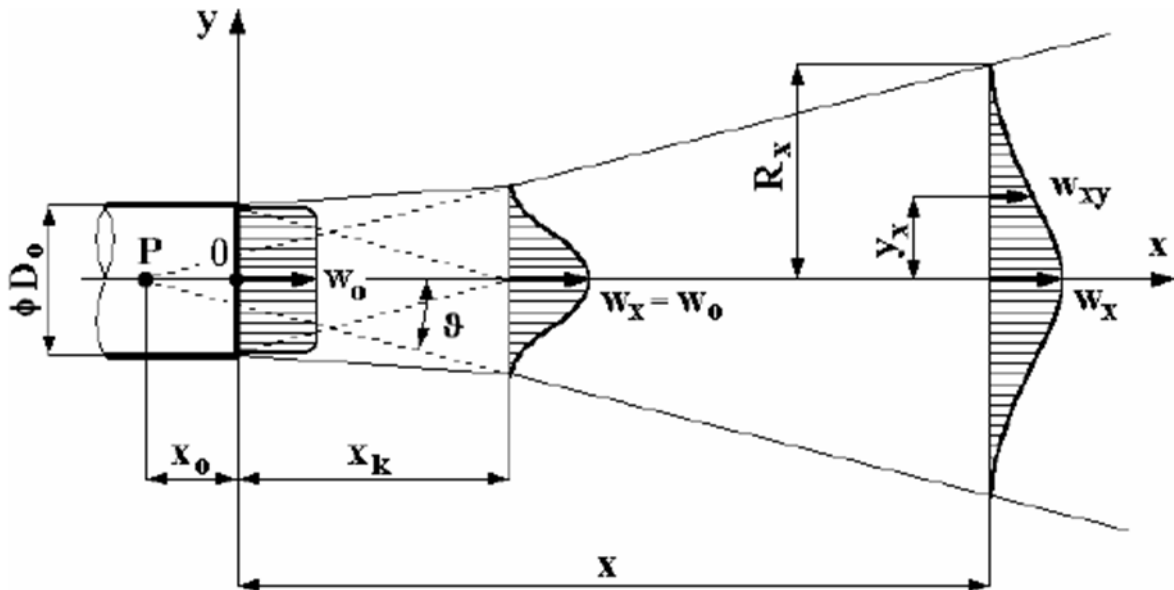
Nejčastěji je volný zatopený proud z kruhového otvoru turbulentní, platí pro Reynoldsovo číslo $Re_0 > 2000$

$$Re_0 = \frac{w_0 d_0}{\nu_0}, \quad (1.1.1) \quad [L1]$$

kde	w_0	[m/s]	výstupní rychlost proudu z otvoru
	d_0	[m]	průměr otvoru
	ν_0	[m ² /s]	kinematická viskozita vzduchu.

Největší rychlosti bude proud vzduchu dosahovat ihned po výtoku z potrubí do volného prostředí (bude přibližně stejný jako v potrubí), postupně bude s sebou strhávat klidný vzduch z okolí, tím vzniká další slabé proudění směrem k hlavnímu proudu vzduchu. Postupem

proudu směrem od vyústky se bude tedy zvětšovat množství proudícího vzduchu, což povede také k rozšiřování profilu proudu, ale naopak střední rychlost proudění se bude snižovat.



Obr.: 1-1 Schéma volného izotermního proudu z kruhové vyústky [L8]

V proudu vzduchu vytékajícím z vyústky můžeme najít dvě na sebe navazující části kuželových ploch. Oblast krajní v délce označené x_k a oblast hlavní v délce x , pro kterou platí úhel rozšiřování $2\vartheta \approx 25^\circ$. Délka krajní oblasti se u ideálně vyrovnaného rychlostního profilu pohybuje okolo $x_k = 6,2 d_0$. U ideálního rychlostního profilu vytékajícího proudu vzduchu je vrchol kužele P (pól) v rovině výstupního otvoru.

V oblasti krajní x_k se osová rychlost proudu w_x téměř nemění a lze říci, že je rovna výtokové rychlosti w_0 .

Celkově se však v oblasti hlavní osová rychlost proudění vzduchu postupně snižuje a lze ji popsat vztahem

$$\frac{w_x}{w_0} = K_s \frac{\sqrt{S_0}}{x} \quad (1.1.2) \quad [L8]$$

kde je $K_s [-]$ konstanta vyústky

$S_0 [m^2]$ průřez vyústky

$x [m]$ vzdálenost od konce vyústky

$w_0 [m/s]$ osová rychlost výtoku vzduchu z vyústky

$w_x [m/s]$ osová rychlost výtoku vzduchu z vyústky ve vzdálenosti x .

Příčný rychlostní profil lze v hlavní oblasti určit z tzv. Schlichtingova vztahu jako

$$\frac{w_{x,y}}{w_x} = \left[1 - \left(\frac{y_x}{R_x} \right)^{1,5} \right]^2, \quad (1.1.3) \quad [L8]$$

Kde R_x [m] je poloměr rychlostního profilu ve vzdálenosti x (m).

Z hlediska našeho měření akustického výkonu experimentální trati nás budou zajímat hlavně dvě oblasti proudu vyzařující zvuk, oblast vysokofrekvenční tzv. jádro proudu ($x < x_k$) a nízkofrekvenční nebo-li hlavní oblast zatopeného proudu.

Pro vyjádření celkového akustického výkonu generovaným proudem vzduchu lze použít tohoto vztahu

$$W = K \rho_0 w_0^8 c^{-5} D_0^2, \quad (1.1.4) \quad [L1]$$

kde D_0 [m] průměr vyústky,
 w_0 [m/s] rychlost výtoku vzduchu z vyústky,
 K [-] koeficient úměrnosti $< 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ až } 7 \cdot 10^{-5} >$

Výsledky získané použitím vztahu (1.1.4) se dobře shodují s experimentálně zjištěnými údaji v oblasti Machova čísla blízkého se $Ma=1$. Nás však budou zajímat hodnoty výrazně nižší při výtokových rychlostech pod cca 30m/s, kde však závislost na 8. mocnině rychlosti proudění neplatí a z mnoha experimentálních prací spíše vyplývá závislost na 6. mocnině výtokové rychlosti. Vztah (1.1.4) nám určuje celkový akustický výkon vyzařovaný přes celé slyšitelné pásmo. Maximum akustické energie je vyzařováno v oblasti jádra proudu a stejně jako je tomu u rychlosti proudu vzduchu i vyzařovaný akustický výkon se s rostoucí vzdáleností od konce vyústky prudce klesá a jeho kmitočet se výrazně snižuje, navíc je silně směrově závislý. Svého maxima dosahuje přibližně pod úhlem 45° od osy proudu. Směrové závislosti nejsou stejné pro všechny kmitočty.

Hladina akustického tlaku pro 1/3 oktávové pásmo v určité vzdálenosti r a směru ϑ se určí dle vztahu

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{1}{4\pi r^2} + \Delta L_\vartheta + \Delta L_f, \quad (1.1.5) \quad [L1]$$

kde je L_w [dB] celková hladina akustického výkonu podle vztahu (1.1.4)

ΔL_ϑ [dB] korekce na směr vyzařování

ΔL_f [dB] korekce na kmitočtové složení zvuku.

Tento vztah platí pro rozsah Machových čísel $0,5 < Ma < 1$.

V našem případě se však pohybujeme ve výrazně nižších rychlostech výtoku vzduchu z vyústky ($Ma < 0,12$) a pro takto nízké rychlosti platí vztah jiný

$$W = K \rho_0 w_0^4 c^{-1} D_0^2, \quad (1.1.6) \quad [L1]$$

kde je $K=10^{-7}$.

Na konkrétní velikost této konstanty K má zásadní vliv intenzita turbulence v hrdle vyústky.

Z praxe je známá závislost exponentu rychlosti na Machově čísle $W = f(w^{5 \div 6})$ pro různé prvky vzduchotechnického systému (klapky, trysky, vyústky).

2. Experimentální měřicí trať

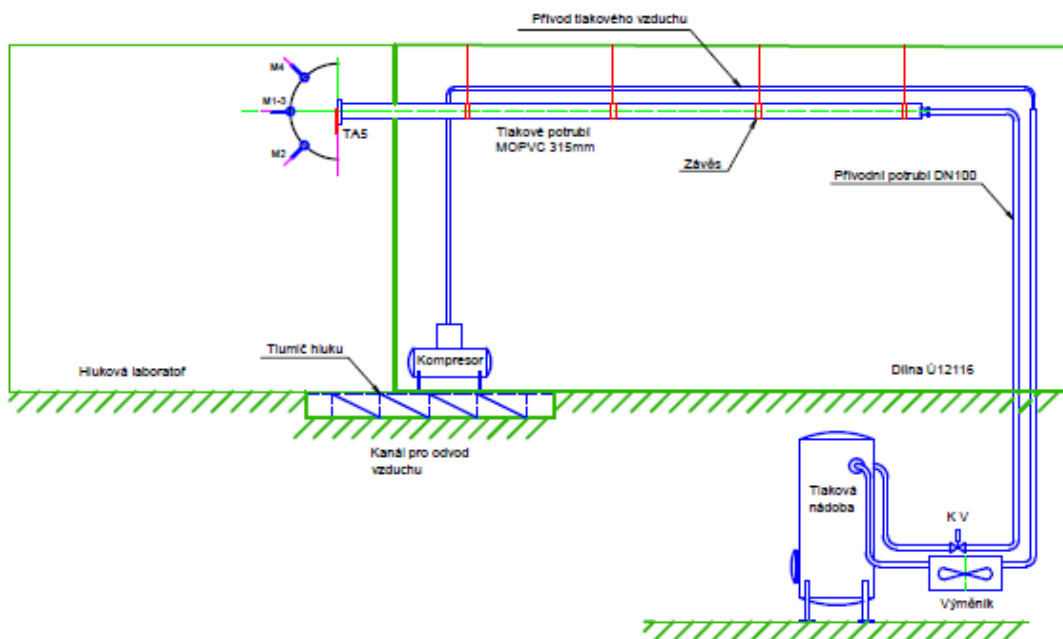
2.1 Popis experimentální měřicí trati

Jak již bylo řečeno v úvodu, tato trať byla navržena a postavena v roce 2005 Doc. Ing. R. Novým, CSc. a Ing. M. Kučerou, Ph.D. a v nedávné době prošla rekonstrukcí tlumičů hluku.

Experimentální měřicí trať byla navržena a sestrojena za účelem měření akustických výkonů různých vzduchotechnických elementů běžně používaných v komfortních vzduchotechnických zařízeních.

Jelikož v běžných vzduchotechnických zařízeních se rychlost proudění vzduchu pohybuje v rozmezí od 1-10 m/s, bylo potřeba najít vhodný zdroj proudu vzduchu, který by tyto podmínky zajistil. Dále aby bylo vůbec možné dané vzduchotechnické elementy měřit, musel být splněn požadavek na co nejnižší hodnoty hluku určeného zdroje a celého navrženého systému.

Z těchto důvodů autoři vybrali koncepci založenou na expanzi stlačeného vzduchu, který se vlastní silou expanze pohybuje potrubím a nevzniká nám tím tedy žádný hluk spojený s výrobou proudu vzduchu zařízeními jako např. ventilátor, které jsou zdrojem velkého hluku a nebyly by tedy pro tento experiment příliš vhodné, bylo by je nutné zatlumit velkými tlumiči s velkým útlumem.



Obr. 2-1 Schéma měřicí trati

Jako zdroj proudícího vzduchu, jak již bylo výše uvedeno, je použita tlaková nádoba o objemu 6,3 m³ umístěná na dvoře halových laboratoří fakulty strojní ČVUT, do které se pomocí kompresoru GX 5 C značky Atlas Copco přivádí vzduch a stlačuje se na hodnotu přetlaku 0,7 MPa. Jedná se o vzduchem chlazený šroubový jednostupňový kompresor poháněný elektromotorem se vstřikováním oleje o výkonu 10 l/s a maximálním dopravním tlakem 1 MPa. Volba daného kompresoru byla určena podle požadavků na co nejrychlejší naplnění nádoby požadovaným tlakem ale také možností využívání kompresoru na potřeby běžného provozu dílny (přívod vzduchu k soustruhu a frézce).



Obr. 2-2 Tlaková nádoba na dvoře halových laboratoří [L5]

Tlaková nádoba je do prostoru halových laboratoří napojena ocelovým potrubím DN 100 vedeným přes kulový ventil, který je z důvodu snadného řízení dálkově ovládaný servopohonem.



Obr. 2-3 Kulový ventil ovládaný servopohonem [L5]

Potrubí dále prochází přímo skrze chodbu halových laboratoří do prostoru dílny Ústavu techniky prostředí, kde se napojuje pomocí přechodové příruby na hlavní část měřeného tlakového potrubí o průměru 315mm a délce 12m.

Na úseku potrubí vedoucím dílnou k napojení přechodové příruby na hlavní část jsou osazeny dva přírubové kompenzátory DN 100, které mají eliminovat možné vzniklé chvění od konstrukce budovy na které je potrubí pevně uchyceno.

Přechod z potrubí DN 100 na vysokotlaké plastové potrubí s tlumičem hluku uvnitř muselo splňovat některé okrajové podmínky:

- Tvarově plynulé napojení, které nebude klást přílišný odpor proudu vzduchu, což by mělo za následek vznik aerodynamického hluku
- Napojení nesmí obsahovat netěsnosti
- Vysokotlaké plastové potrubí spolu s tlumičem hluku musí ve spojení s přechodem zamezit vzájemnému axiálnímu pohybu
- Musí být konstruován na tlak 1 MPa



Obr. 2-4 Detail napojení přechodu s plastovým MOPVC potrubím [L5]

Hlavní část potrubí měřicího systému vede po celé délce dílnou Ústavu techniky prostředí přes dělicí stěnu až do hlukové laboratoře, kde ústí jeho volný konec. Potrubí je vedeno pod stropem, ke kterému je uchyceno čtyřmi rovnoměrně rozmístěnými závěsy.

Celková délka této hlavní části potrubí (aerodynamického tunelu) je cca 12m. Vnitřek potrubí je osazen čtyřmi kruhovými tlumiči hluku (FLEXO) s vnitřním průměrem 180 mm a vzájemně spojenými přírubami.

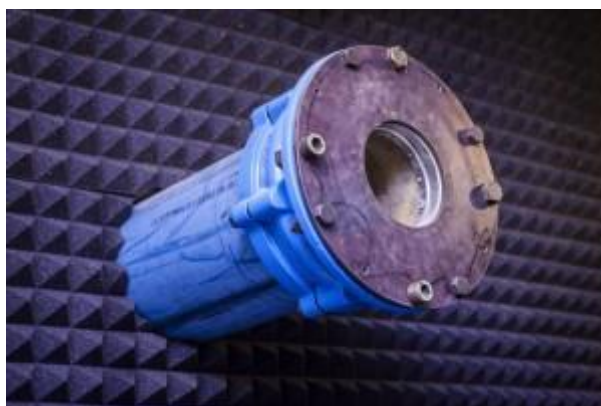


Obr. 2-5 Hlavní část potrubí měřící experimentální trati s tlumiči hluku [L5]

Volné vyústění hlavního potrubí experimentální měřicí trati v hlukové laboratoři je odděleno od dílny Ústavu techniky prostředí dělicí stěnou. Potrubí touto stěnou prochází, avšak není s ní pevně spojeno. Mezi potrubím a stěnou je vzduchová mezera, která je vyplněná polyuretanovou pěnou a plní funkci částečné eliminace chvění stavební konstrukce.

Umístění volného vyústění potrubí je voleno s ohledem na provádějící potřebná měření vyžadující volný prostor neomezený stěnami, od kterých by se mohla akustická vlna odrazit.

Z tohoto důvodu je vyústění potrubí ve vzdálenosti 1m od dělicí stěny a vertikální i horizontální vzdálenost od okolních stěn laboratoře je min. 2m.



Obr. 2-6 Vyústění hlavního potrubí do hlukové laboratoře

Z důvodu velkého množství vytékajícího vzduchu do hlukové laboratoře za poměrně krátký časový interval bylo nutno řešit odvod tohoto vzduchu z místnosti. Jako nejlepší řešení autoři vybrali použití zazděného místního kanálu vedoucího podlahou laboratoře pod dělicí stěnou do vedlejší dílny Ústavu techniky prostředí. Po probourání zazdění se uvolnil průchod vzduchu kanálem o rozměru 300x300 mm a délce 7m plně postačující pro odvod vytékajícího vzduchu při měření.

Do kanálu byly vloženy paralelně tři řady tlumících vložek firmy C klima v délce 5m.

Na vstupu a výstupu z kanálu je umístěna mříž o rozměrech 500x600 mm.



Obr. 2-7 Kanál pro odvod vzduchu z bezodrazové místnosti s umístěnými kazetovými tlumiči hluku [L5]

Pokud by byl celý navržený systém založen na neřízené expanzi tlakového vzduchu z tlakové nádoby, samotné vyprázdnění nádoby potrubím DN100 při vstupním tlaku 1MPa by trvalo asi 2 minuty, což by pro naše účely bylo nedostatečné a navíc by byly kladeny vysoké nároky na tlakovou odolnost celého měřicího systému.

Pro zajištění požadovaného průtoku a minimálního potřebného času na měření bylo potřeba navrhnout způsob redukce nadměrného tlakového spádu v tlakové nádobě.

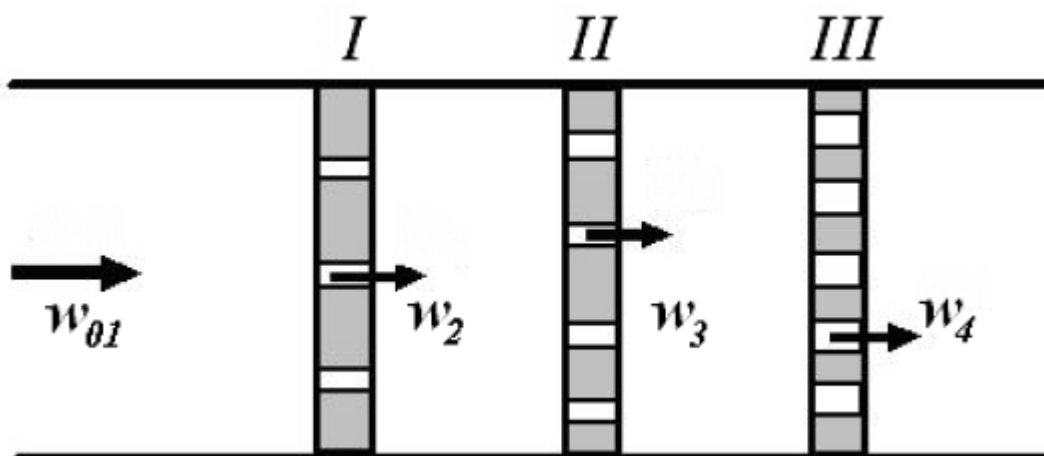
Autoři proto navrhli reduktor tlakové difference. Tento reduktor obsahuje kaskádu perforovaných kruhových desek umístěných přímo v tlakové nádobě.

Použitím této kaskády dochází ke snižování tlakového poměru postupně mezi jednotlivými perforovanými deskami a tím také ke snižování rychlosti, které je důležité z hlediska vyzářeného akustického výkonu. Pro danou kaskádu je určen počáteční průtok, který se v průběhu expanze postupně snižuje. Rozteč jednotlivých různě perforovaných desek byla zvolena tak, aby výtok vzduchu z jedné desky neovlivňoval vtok do následující desky v kaskádě.

Postupné snižování tlakového poměru mezi jednotlivými úseky kaskády lze popsat následovně:

$$\frac{p_0}{p_n} = \frac{p_0}{p_1} \cdot \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{p_2}{p_3} \dots \frac{p_{n-1}}{p_n}, \quad (2.1.1) \quad [L5]$$

Kde n [-] počet škrťících perforovaných desek v sérii.



Obr. 2-8 [L6]

Úbytek tlaku mezi jednotlivými deskami musí být stejně veliký a výrazně nižší než kritický tlakový spád. Pro úbytek tlaku v jednotlivých úsecích kaskády bude platit vztah

$$\frac{p_0}{p_n} = \left(\frac{p_{n-1}}{p_n} \right) \Rightarrow \left(\frac{p_0}{p_n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.1.2) \quad [L5]$$

S poklesem tlaku je spojena taky změna teploty

$$\frac{T_n}{T_{n-1}} = \left[\left(\frac{p_0}{p_n} \right)^{-\frac{1}{n}} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (2.1.3) \quad [L5]$$

Pro vyjádření celkového akustického výkonu vyzařovaným zatopeným proudem, pokud použijeme za charakteristický rozměr průměr trysky, bude pro výpočet platný vzorec (1.1.4).

V tomto případě byl průřez reduktoru zvolen konstantní, z čehož plyne, že rychlost proudění před vstupem do kaskády perforovaných desek bude dána vztahem

$$w_{01} = \frac{M}{\rho_0 S_0}, \quad (2.1.4) \quad [L5]$$

kde M [kg/s] je hmotnostní průtok vzduchu,

ρ_0 [kg/m³] hustota vzduchu před vstupem do kaskády,

S_0 [m²] průřez reduktoru.

Na výstupu z reduktoru po n-tém stupni škrcení potom bude platit vztah

$$w_n^2 - w_{0n}^2 = 2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} r \cdot T_{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_{n-1}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right], \quad (2.1.5) \quad [\text{L5}]$$

kde w_{0n} [m/s] je rychlost v plném průřezu reduktoru před n-tým stupněm škrcení,

S_n [m²] průřez před škrtícím otvorem,

S_{n-1} [m²] průřez škrtícího otvoru,

μ_n [-] průtokový součinitel n-tého stupně.

Kromě tlakového spádu je výsledná rychlost proudění n-tým stupněm ovlivněna také teplotou.

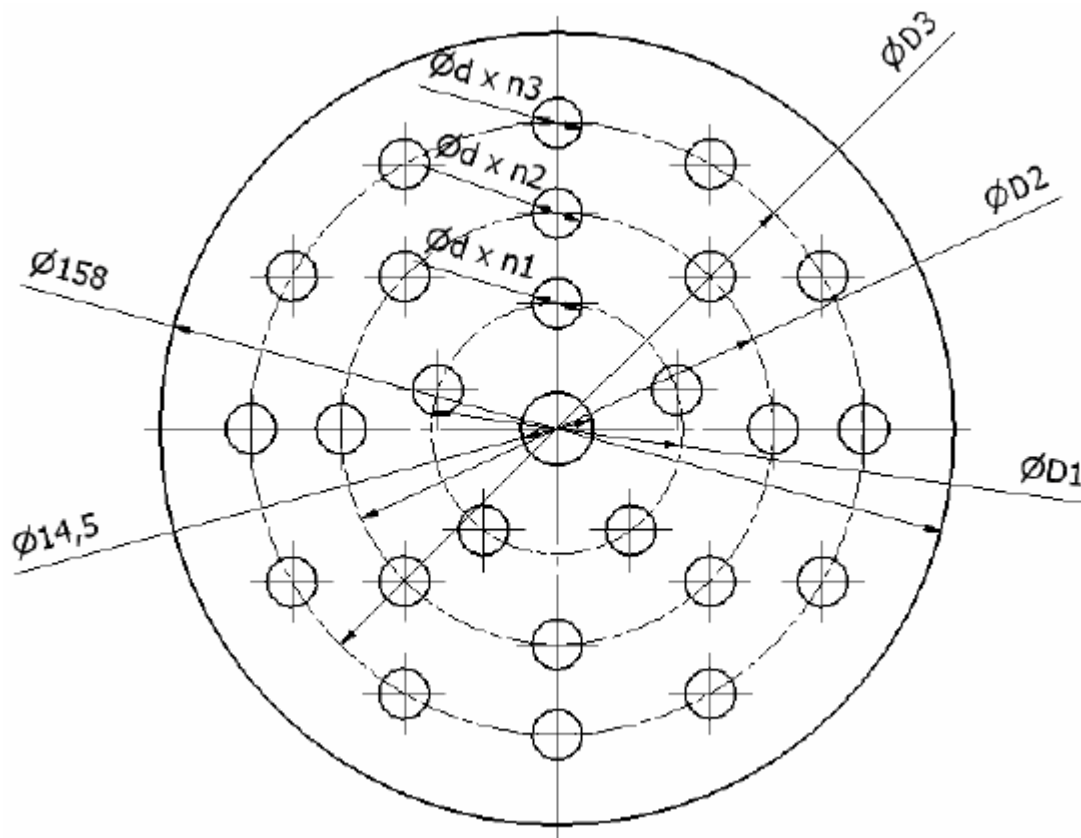
Teplota během expanze klesá, a proto i rychlost w_{0n} při průchodu reduktorem klesá a její hodnota se v jednotlivých stupních kaskády řídí rovnicí kontinuity. Hmotnostní průtok je po celé délce kaskády ve všech jednotlivých stupních stejný a odpovídá vztahu

$$\begin{aligned} M_1 &= \mu_1 \cdot S_1 \cdot w_1 \cdot \rho_1 = \mu_2 \cdot S_2 \cdot w_2 \cdot \rho_2 \\ &= \mu_n \cdot S_n \cdot w_n \cdot \rho_n. \end{aligned} \quad (2.1.6) \quad [\text{L5}]$$

Po dosazení předchozích vztahů do této rovnice získáme platný vztah pro hmotnostní průtok v jakémkoliv místě reduktoru a následnými úpravami i potřebný vztah pro průřez škrtícího orgánu

$$S_n = \frac{M}{\mu_n} \left\{ \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_{n-1}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right] \frac{p_{n-1}}{\sqrt{r T_{n-1}}}} \right\}^{-1}. \quad (2.1.7) \quad [\text{L5}]$$

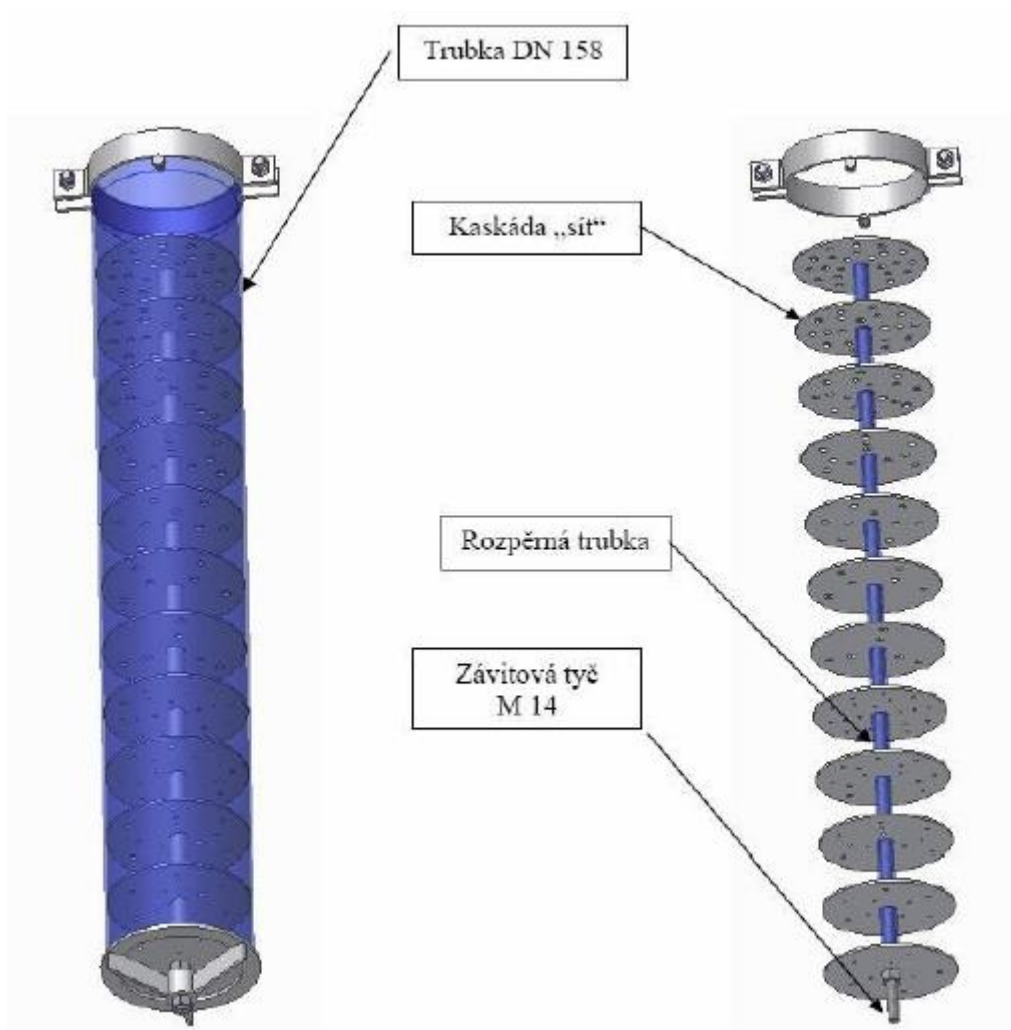
Z předchozích uvedených skutečností vyplývá, že čím více škrtících perforovaných desek v kaskádě bude, tím vyšší bude pokles rychlosti v reduktoru a tím i pokles hluku.



Obr. 2-9 Schéma rozložení děr na perforované desce [L5]

Jako výsledný počet perforovaných desek v kaskádě reduktoru bylo zvoleno 12 o průměru děr 6mm a výsledný škrtící efekt z počátečních 1000kPa na atmosférický tlak 100kPa.

Reduktor tlaku je umístěný přímo v tlakové nádobě. Skládá se z výše uvedených kruhových perforovaných desek tloušťky 3mm nasunutých na závitovou tyč o průměru 14mm. Mezi jednotlivými perforovanými deskami jsou vloženy rozpěrné trubky o délce 80mm zajišťující přesnou vzdálenost a zamezující axiálnímu pohybu, na obou koncích je tato kaskáda stažena maticemi. Tato kaskáda je vložena do trubky DN158 o délce 1050 mm, na spodním konci závitové tyče je umístěna speciální příruba s trojramenným křížem a zajištěná maticí. Celé konstrukční řešení popsaného reduktoru tlaku je voleno s ohledem na možnost snadného připevnění na potrubí v nádobě DN150 o vnějším průměru 160mm. Na požadovaný průměr byla trubka DN160 na horním konci soustružena v délce 50mm. Nasunutí celého reduktoru na potrubí je zajištěno pomocí objímky a pojištěno dvěma šrouby M8.



Obr. 2-10 Zařízení pro regulaci tlaku (reduktor tlaku) [L6]

Při provedených kontrolních měření se přišlo na nežádoucí problém v podobě zamrzání kapiček vody, obsažených v přivedeném vzduchu, na otvorech perforovaných desek.

K tomuto zamrzání docházelo při expanzi vzduchu z tlakové nádoby. Vlivem prudkého podchlazení vzduchu (až o 30 K) se díky vzniku námrazy ucpávaly otvory a docházelo ke znehodnocování výsledků .

Z toho důvodu se přistoupilo k řešení snížení vlhkosti v přiváděném vzduchu, spočívající v instalaci chladiče na přívodní potrubí. Na obr.: 2-12 je vidět nainstalovaný chladič, který se skládá z rekuperačního výměníku a axiálního ventilátoru. Průchodem vzduchu přes chladič se na stěnách výměníku vysráží kapičky vody, které jsou posléze zachyceny na odvaděči kondenzátu a odvedeny ven ze systému.



Obr. 2-11 Chladič přiváděného vzduchu[L5]

Tímto nám odpadl problém se zamrzáním reduktoru tlaku, bohužel čas potřebný pro naplnění nádoby se ještě prodloužil o cca. 15 minut.

2.2 Popis a schéma zapojení měřících prvků na experimentální trati

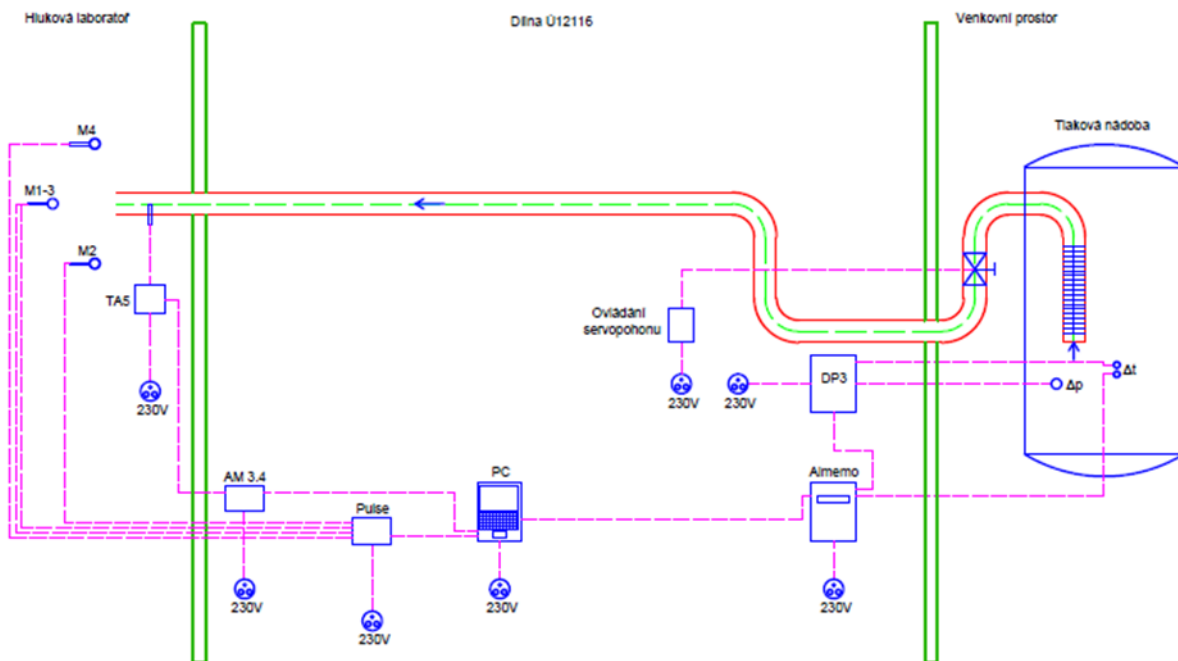
Měřící prvky na experimentální měřící trati jsou navrženy a umístěny tak, aby při neřízené expanzi stlačeného vzduchu co nejpřesněji dokázaly změřit požadované veličiny a tato měřená data automaticky ukládat do počítače, aby bylo možné je dále zpracovávat dle potřeby našeho experimentálního měření.

Mezi měřené veličiny patří:

- Přetlak v nádrži p [V]
- Rozdíl tlaku v trysce a v nádrži Δp [%]
- Teplota v nádrži t_i [°C]
- Rozdíl teplot v trysce a v nádrži Δt [mV]
- Teplota v nádrži t_i [°C]
- Rychlost výtoku vzduchu z trysky w_i [m/s]
- Teplota vzduchu v trysce při výtoku t_i [°C]
- Hladina akustického tlaku v 1/3 okt pásnu L_p [dB]

Mezi přístroje na měření daných veličin patří:

- p [V] Čidlo diferenčního tlaku DMP 331
- Δp [%] Čidlo diferenčního tlaku Rosemount DP3
- t_i [°C] Platínový odporový snímač teploty PT100
- Δt [mV] Termoelektrický snímač teploty (termočlánek)
- w_i [m/s] Termoanemometr Airflow TA5
- t_s [°C] Termoanemometr Airflow TA5
- L_p [dB] Zvukoměr B&K Pulse 365-B



Obr.: 2-12 Schéma zapojení měřících přístrojů

Legenda: TA5 – termoanemometr Airflow, AM 3.4 – datová paměť, M1-4 – mikrofony, 230V – elektrické napětí přístrojů.

Informace o sledovaných veličinách z tlakové nádoby nám zaznamenává Data Logger Almemo 3290 ,jedná se o zařízení pro sběr a ukládání analogových nebo binárních informací. Může být používán buď jako prostředník mezi snímacími senzory a počítačem, což platí v našem případě, nebo může samostatně ukládat naměřené hodnoty.

V našem případě jde o předávání informací z tlakové nádoby umístěné na dvoře halových laboratoří, kde jsou zaznamenávány tyto čtyři druhy informací napojené na měřící vstupy v zadní části dataloggeru následujícím způsobem:

- 1) M0 Δt [mV] rozdíl teplot v dýze proti teplotě v nádrži
- 2) M1 t [°C] teplota v nádrži
- 3) M2 Δp [%] tlak v dýze
- 4) M3 p [%] tlak v nádrži oproti atmosférickému tlaku

Všechny 4 kanály jsou zaznamenávány v reálném čase s nastaveným krokem jedné vteřiny, který je zároveň hlavním srovnávacím kritériem mezi jednotlivými měřícími přístroji.

Data Logger Almemo 3290 však neměří data přímo v základních jednotkách. V tabulce jsou uvedeny potřebné hodnoty pro jejich přepočet.

Tab. 2-1 Přepočtové vztahy jednotek [L5]

Veličina	Přepočtový vztah
$p [Pa]$	$p = (494604 \cdot p[V]) + 1 \cdot 10^{-10}$
$\Delta p [Pa]$	$\Delta p = (39,827 \cdot \Delta p[\%]) - 102,755$
$\Delta t [^{\circ}C]$	$\Delta t = 23,485 \cdot \Delta t[mV]$

Rychlost nabíhajícího proudu v místě volného vyústění potrubí w_i [m/s] a teplota t_s [$^{\circ}C$] jsou měřené pomocí termoanemometru TA5, který bohužel nedisponuje vlastní pamětí a musí být propojen s datovou pamětí Airflow AM3.4. Jako zdroj TA5 slouží 4 tužkové baterie a napájení paměti je 9V. Na TA5 je třeba nastavit rozsah jednotlivých měřených veličin a to pro rychlost w_i rozsah 0-30 m/s a teplotu t_s rozsah 0-80 $^{\circ}C$. Propojení mezi termoanemometrem TA5 a AM 3.4 je pomocí kabelu na kanál paměti CH2, tím docílíme zaznamenávání teploty na kanále CH1 a rychlosti proudění vzduchu na kanále CH2. Všechny zde popsané přístroje jsou řízeny pomocí počítače, jehož nastavený čas je řídicím časem celého měřicího systému.

3. Měření akustických parametrů experimentální trati

Cílem měření na experimentální trati určené k měření akustických vlastností elementů vzduchotechniky bylo definovat parametry hluku pozadí této soustavy a vytvořit podrobný popis měřicího systému.

Získané akustické parametry dále porovnam s jinou experimentální trati umístěnou v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí jejíž parametry jsem získal od pana ing. J. Králíčka, který se touto trati zabýval ve své diplomové práci. Na základě tohoto porovnání získám informace o vhodnosti použití dané trati na měření různých vzduchotechnických elementů a výhody i nevýhody použití trati.

3.1 Podmínky a schéma měření

Konstrukční řešení experimentální měřicí tratě na měření vlastností vzduchotechnických prvků bylo popsáno v předcházejících kapitolách, stejně jako popis jednotlivých měřících přístrojů sbírajících potřebné informace o chování daných veličin důležitých pro vyhodnocení potřebných akustických parametrů měřené experimentální trati.

Tento ucelený systém sběru potřebných dat vyžaduje kontinuální záznam všech požadovaných veličin v reálném čase po jedné vteřině, což vede k vyšším požadavkům na přístrojové vybavení a také na samotné vyhodnocení. Naopak výhodou je právě kontinuální sběr dat, který nám dává dobrou představu o chování trati v průběhu měření při měnících se podmínkách a současně i zachycení rušivých vlivů od hluku pozadí atd.

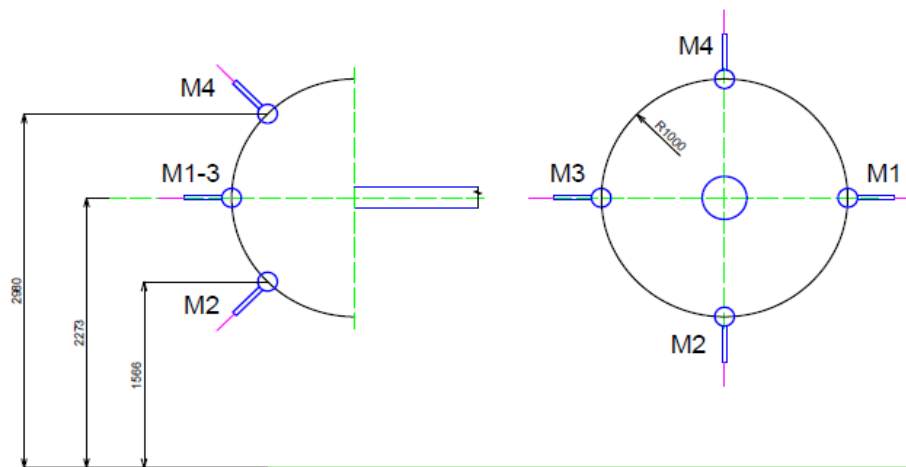
Zařízení potřebné pro měření akustických parametrů experimentální trati bylo umístěné v hlukové laboratoři Ústavu techniky prostředí o objemu 139 m^3 pokrytou na všech stěnách $0,1\text{m}$ tlustým molitanem.

Veškeré podmínky měření byly navrženy v souladu s normou řady ČSN EN ISO 3740. Jednalo se o měření v poli přímých vln. Tato mezinárodní norma nám stanovuje metodu pro měření hladiny akustického tlaku na měřící ploše obklopující zdroj hluku.

Jako měřící plochu je vhodné zvolit polokouli o poloměru $r = 1\text{m}$.

Pro daná měření byla použita dostupná zvukoměrná aparatura PULSE 356-B-140 vybavená čtyřmi mikrofony. Tyto mikrofony musí být umístěny v přesně definovaných pozicích

společně tvořících potřebnou půlkulovou plochu obklopující zdroj hluku (volný konec potrubí) a během měření se nesmí měnit. Schéma umístění mikrofonů je na obr.3.1.



Obr. 3-1 Polohy mikrofonů

Mikrofony M4 a M2 jsou vůči ose potrubí umístěny pod úhlem 45° z důvodu předpokladu největšího akustického výkonu, který je silně směrově závislý a svého maxima dosahuje právě pod úhlem 45° , jak již bylo zmíněno v kapitole (1.1). Směrové závislosti nejsou stejné pro všechny kmitočty.

3.2 Stanovení hladin akustického výkonu volné vyústky

Akustický výkon či hladina akustického výkonu není přímo měřitelná veličina, je tedy nutné ji získat přepočtem z jiné přímo měřitelné veličiny, kterou je hladina akustického tlaku měřená mikrofony na kulové ploše v určité vzdálenosti od volného konce vzduchovodu. Je třeba si však uvědomit rozdíl mezi těmito hladinami. Hladina akustického výkonu nám vždy dává informaci o akustickém výkonu přímo vyzařovaným zdrojem hluku, v našem případě tedy volného konce potrubí, je to tedy vlastnost zdroje hluku, naopak hladina akustického tlaku nám podává informaci o celkovém akustickém ději v místě pozorování a proto ji lze přímo měřit. Hladina akustického tlaku se výrazně mění se vzdáleností a směrem od zdroje. Bude-li zdroj akustické energie obklopen plochou S [m^2], možno na této ploše určit intenzitu zvuku [W/m^2]. Veškerý vyzářený akustický výkon od našeho zdroje musí touto plochou projít, tudíž mezi jednotlivými veličinami platí jednoduchý vztah

$$W = IS \quad (3.2.1) \quad [L2]$$

V našem případě se jedná o měření na čtyřech mikrofonech přesně umístěných v předepsané poloze tak, aby tvořily kulovou plochu o poloměru 1m. Důvodem je způsob šíření zvuku od zdrojů, který se šíří v homogenním prostředí přímočaře do všech směrů, a tedy tvar této zvukové vlny lze považovat za kulový. Hodnotu 1m je vhodné volit z důvodu dosažení do vzorce pro výpočet hladiny akustického výkonu

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{IS}{I_0 S_0} \quad (3.2.2.) \quad [L2]$$

Takto upravený vztah lze jednoduše rozdělit na dvě části a upravit na konečný vztah. První člen pravé strany je hladina intenzity zvuku, která jak známo lze nahradit hladinou akustického tlaku, ve druhém členu máme doporučovanou vhodně zvolenou referenční plochu $S_0 = 1 \text{ m}^2$ což vede na výsledný vztah

$$L_w = L_p + 10 \log S \quad (3.2.3.) \quad [L2]$$

Hodnoty akustického tlaku snímané mikrofony jsou zaznamenávány kontinuálním měřením s krokem 1s, který je pro všechny ostatní měřené veličiny stejný, a ukládány do PC.

Měření akustického tlaku se provádí v 1/3 oktávovém pásmu o středních frekvencích 25 až 12500 Hz. My však budeme pracovat pouze v rozsahu 50 až 10000 Hz, protože dle dlouholetých zkušeností není hluková laboratoř vhodná pro měření nízkých frekvencí.

Z našeho měření čtyřmi mikrofony je potřeba nejprve určit střední hladinu akustického tlaku na měřicí půlkulové ploše ze vztahu

$$L'_{p,ik} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{0,1 \cdot L_{p,ijk}} \right], \quad (3.2.4.) \quad [L5]$$

kde $L_{p,ijk}$ [dB] je hladina akustického tlaku změřená j-tým mikrofonom,

N [-] počet mikrofonů.

Jelikož takto získané střední hladiny akustického tlaku obsahují i hluk pozadí způsobený například hlukem měřících přístrojů, vibracemi přenášených na okolní předměty a zařízení, hlukem venkovního prostředí, okolních strojů apod., které i při snaze o co největší eliminaci nelze nikdy úplně odstranit a je tedy potřeba je z naměřených hodnot odečíst.

Z tohoto důvodu je potřeba nejprve provést měření pozadí při nulovém proudění vzduchu potrubím a následně provést korekci na hluk pozadí dle následujícího vztahu

$$K_{1p,ik} = 10 \log(1 - 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{ik}}), \quad (3.2.5.) \quad [L5]$$

kde

$$\Delta L_{ik} = L'_{p,ik} - L_{poz},$$

kde L_{poz} [dB] je hladina akustického tlaku pozadí.

Dále je potřeba ještě provést korekce na zkušební prostředí podle vztahu

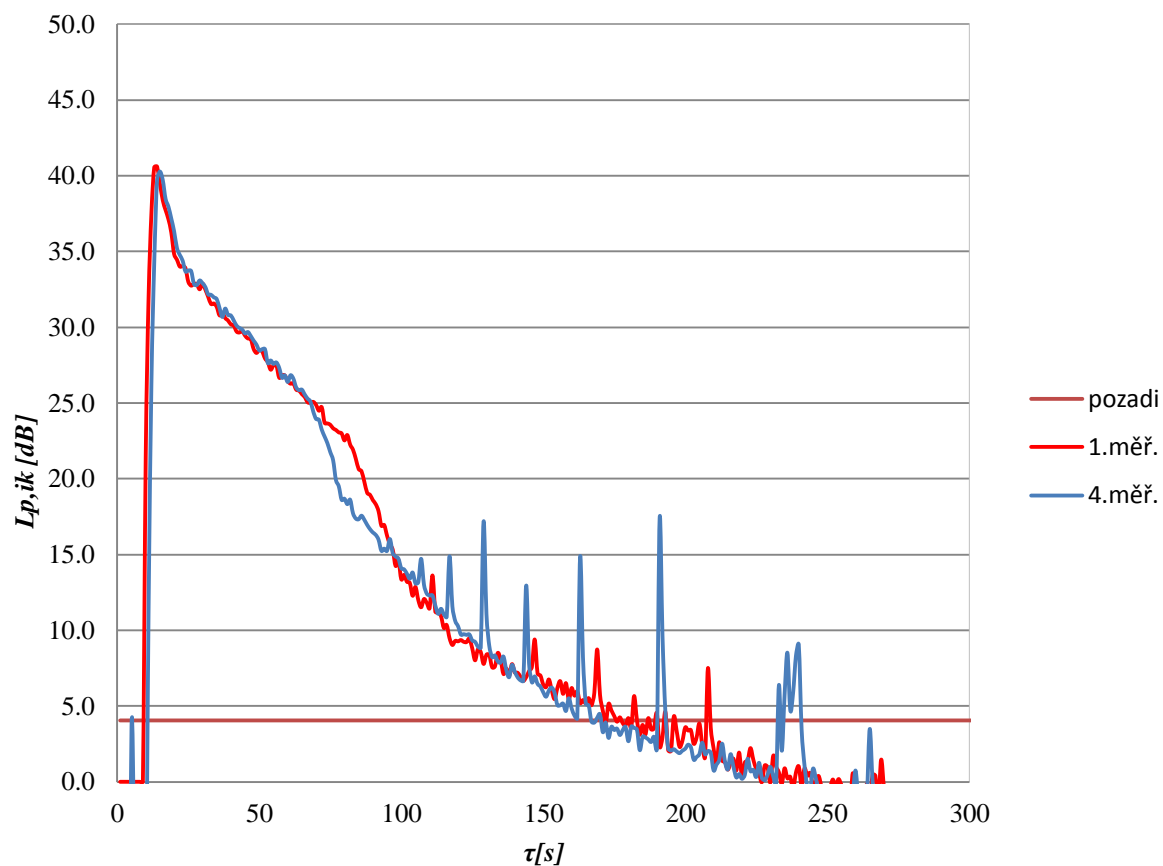
$$K_{2\alpha,ik} = -10 \log \left[1 + 4 \left(\frac{S}{A} \right) \right], \quad (3.2.6.) \quad [L5]$$

kde A [m²] je celková pohltivost zvuku místnosti.

Výsledný vztah zahrnující odečtení těchto korekcí vypadá tedy takto

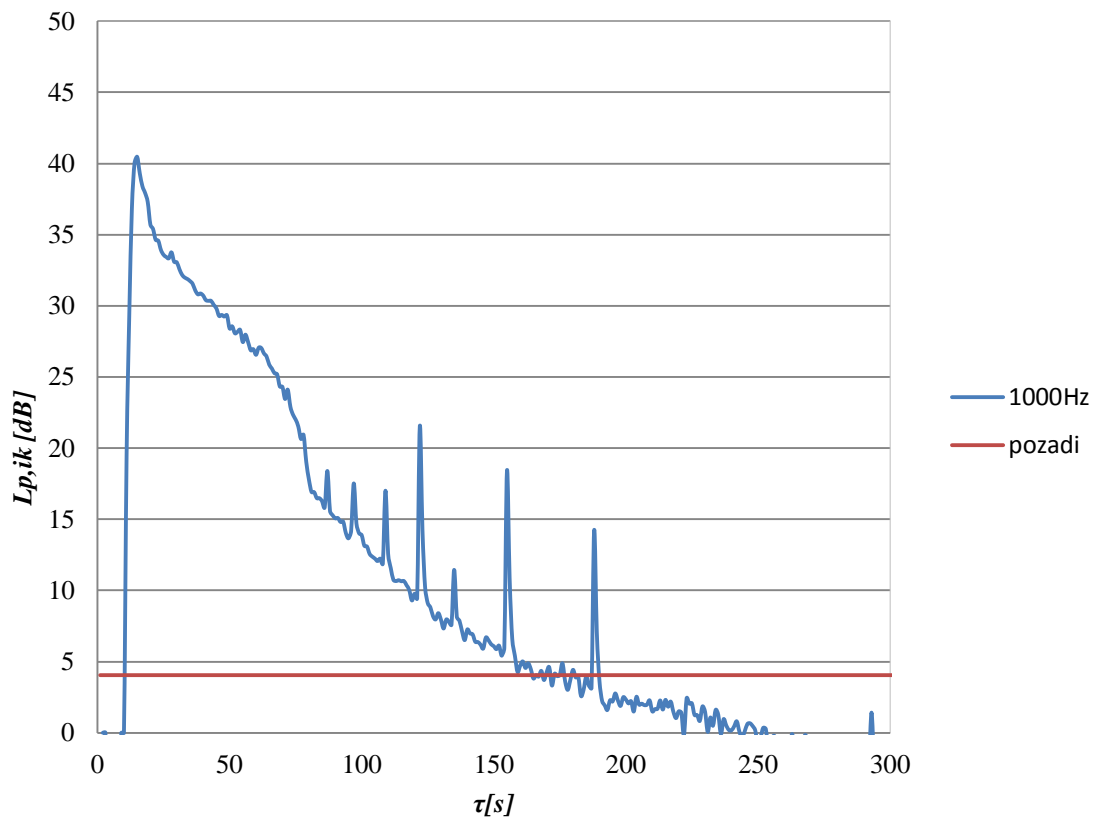
$$L_{p,ik} = L'_{p,ik} + K_{1p,ik} + K_{2\alpha,ik}. \quad (3.2.7) \quad [L5]$$

Aby bylo docíleno co nejpřesnějšího měření bez zbytečného rušení způsobeného vnějšími vlivy, bylo potřeba provádět měření nejlépe v nočních hodinách, kdy hladiny hluku pozadí byly výrazně nižší než přes den. Jelikož se však ani tímto nelze vyhnout zásahu vnějšími vlivy, bylo potřeba následně každé měření zkontrolovat a odstranit nesmyslné skokově vyšší hodnoty nesouvisející s chováním dané měřené experimentální trati. Tyto naměřené hodnoty akustického tlaku v závislosti na čase byly zpracovány v programu MS Excel a vyneseny do grafu pro všech 24 sledovaných frekvencí, příklad na obr.3-2. Jaké hodnoty souvisí a jaké naopak nesouvisí a byly způsobeny vnějšími vlivy se dá prokázat řadou opakovaných měření a následném porovnání naměřených hodnot mezi sebou. Pokud při jednom z měření skokové hodnoty nastanou a v jiném opakovaném měření nikoliv, jedná se s největší pravděpodobností o hodnotu nesouvisející s chováním dané trati.

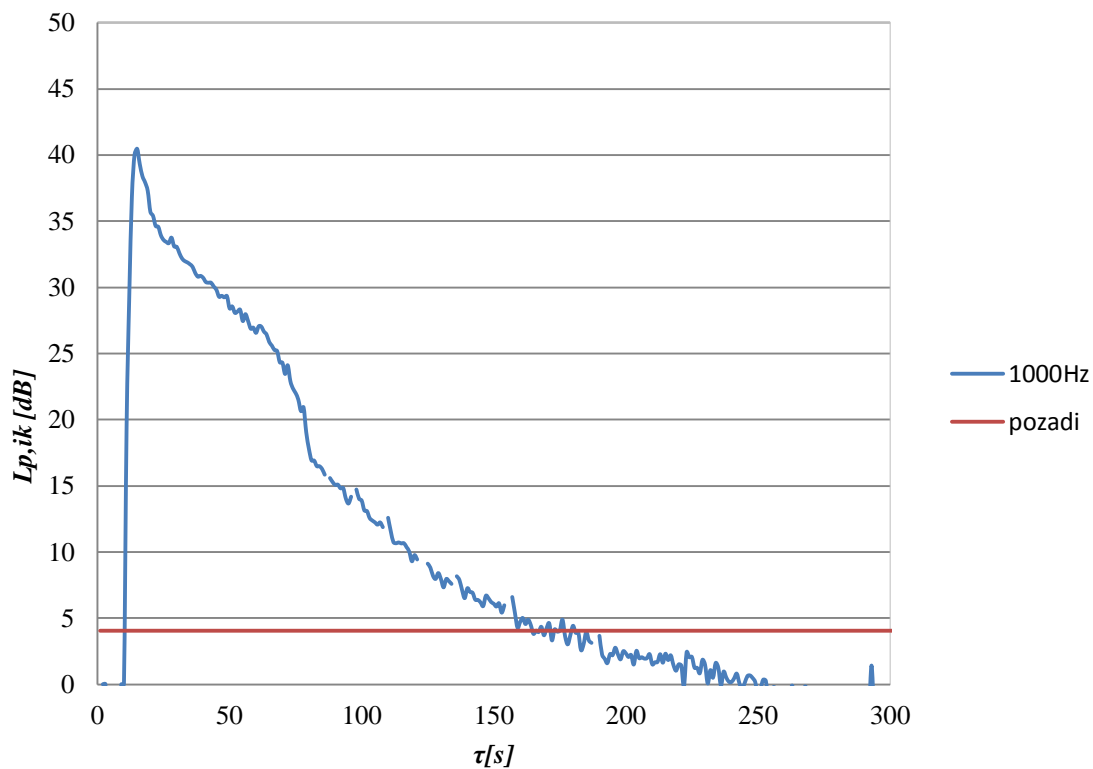


Obr. 3-2 Porovnání průběhu hladiny akustického tlaku pro kmitočet 1000Hz u dvou různých záznamů měření

Zde je vidět, že ke skokovému nárůstu dochází u každého náhodně vybraného záznamu různě a liší se i hodnoty tohoto nárůstu. Z toho je patrné, že se nejedná o hodnoty související s chováním trati, ale jedná se o zásah vnějšími vlivy z okolí a můžeme je tedy ze záznamu odstranit.



Obr. 3-3 Plný časový záznam hladiny akustického tlaku pro frekvenci 1000Hz

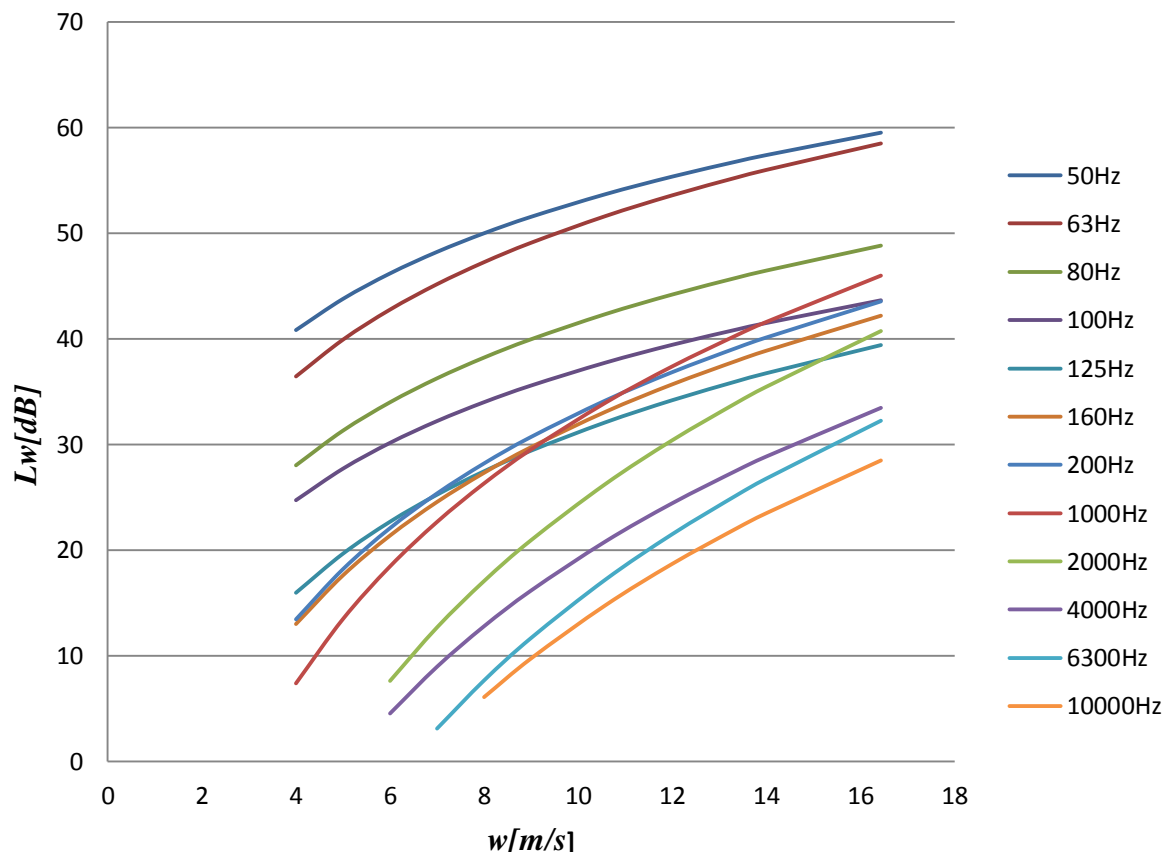


Obr. 3-4 Vyčištěný časový záznam hladiny akustického tlaku pro frekvenci 1000Hz

Hladina akustického výkonu zdroje je dána obecně platným vztahem:

$$L_{w,ik} = L_{p,ik} + 10 \log S \quad (3.2.8) \quad [L5]$$

kde S je plošný obsah měřicí plochy [m^2]



Obr. 3-5 Hladiny akustického výkonu pro jednotlivé kmitočty

3.3 Stanovení celkové hladiny akustického výkonu

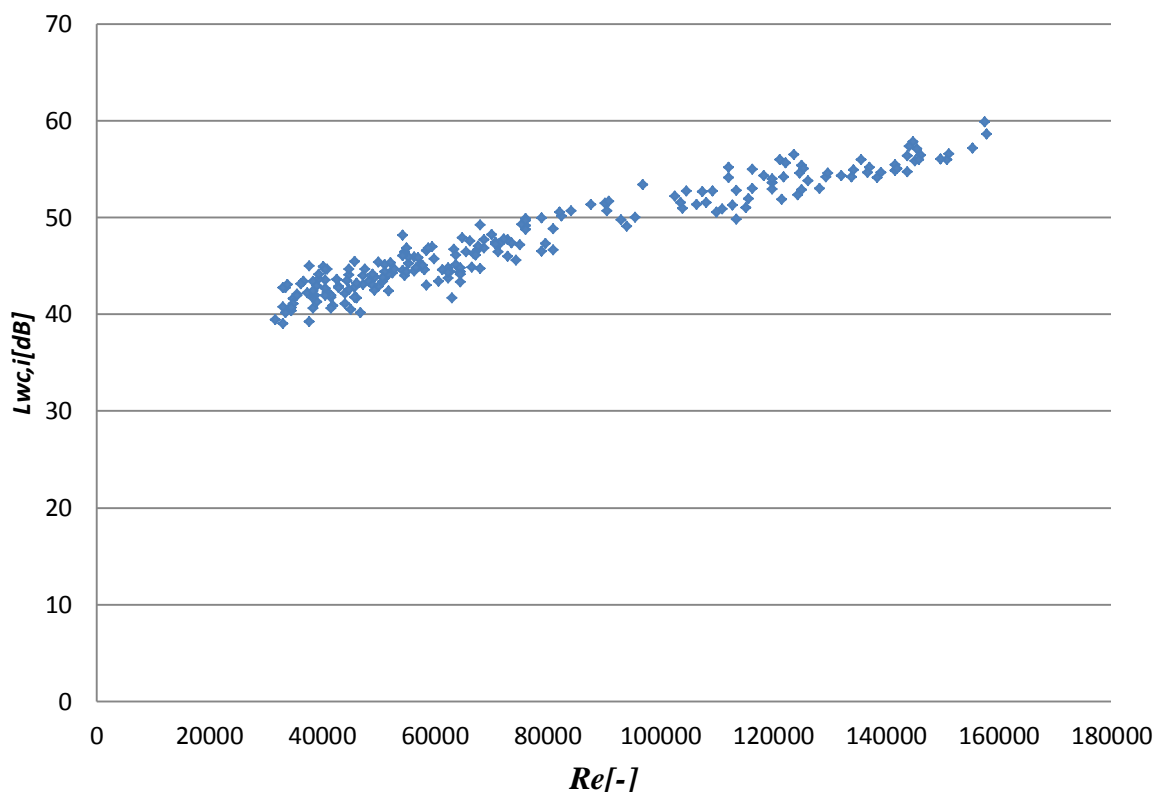
Akustický výkon či akustický tlak jsou veličiny, které samy o sobě nenesou žádnou významnou informaci, neboť nám neříkají nic o poloze signálu na kmitočtové ose. Obě veličiny úzce souvisejí s teorií vlnění. Každé vlnění má určitou frekvenci nebo frekvenční rozsah. Proto při uvádění hladin akustického výkonu nebo akustického tlaku musíme uvádět daný kmitočet. Pokud nás budou zajímat příčiny vzniku určitého hluku, budou nás zajímat jednotlivá spektra hladin akustického tlaku resp. výkonu. Jestliže nás však bude zajímat celkový pohled na hlučnost zařízení, je výhodnější pracovat s jednočíselnou informací akustického tlaku resp. výkonu, který je vlněním vyvolán celkem v celém slyšitelném frekvenčním rozsahu.

Celkovou hladinu akustického výkonu v celém oktávovém pásmu se stanovíme ze vztahu

$$L_{Wc,i} = 10 \log \sum_{k=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{Wi,k}} \quad (3.3.1) \quad [L5]$$

Celkový frekvenční rozsah je v našem případě 50Hz až 10000 Hz, jedná se tedy o 24 hodnot.

Jednotlivé výpočty celkového akustického výkonu měřené experimentální tratě v závislosti na bezrozměrném Reynoldsově čísle jsou uvedeny v příloze P1.



Obr. 3-6 Průběh celkového akustického výkonu v závislosti na Reynoldsově čísle pro měř. č. 1

Takto zobrazený záznam celkového akustického výkonu v průběhu jednoho měření nemá bez dalšího zpracování velký význam. Protože výsledkem naší práce má být porovnání hlučnosti naší měřené experimentální tratě s jinou experimentální tratí je důležité získat obecně platný výpočtový vztah, díky kterému bude možno výsledky správně porovnat. Jednou z možností je založit popis celkových hladin na předpokladu, že průběh naměřených hodnot vykazuje logaritmický charakter, což je prokázáno platnými předpoklady potvrzenými teoretickými i experimentálními pracemi.

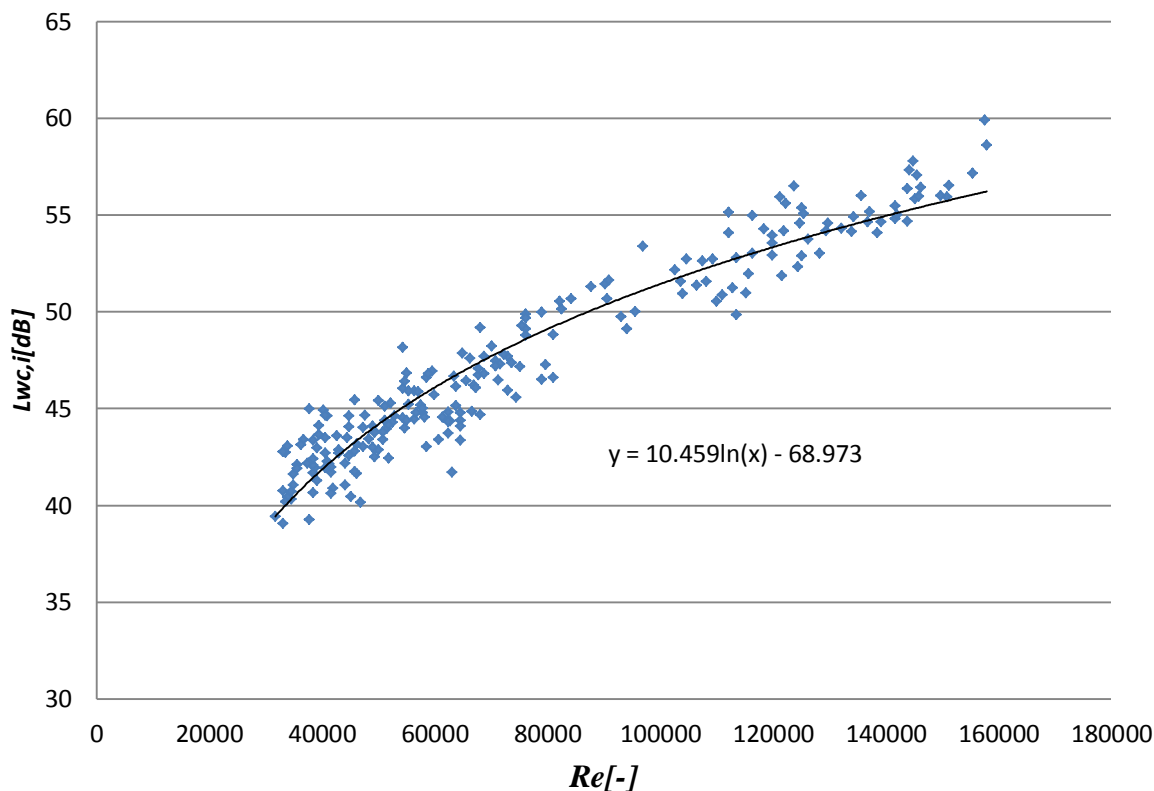
Celý zmíněný postup spočívá v proložení naměřených hodnot logaritmickou funkcí ve tvaru

$$y = K_1^* \cdot \ln(x) + K_2^* \quad (3.3.2) \quad [L5]$$

kde y [dB] je celková hladina akustického výkonu,

x [-] Reynoldsovo číslo,

$K_{1,2}^*$ [-] konstanta polynomu.



Obr. 3-7 Proložení průběhu celkového akustického výkonu logaritmickou funkcí pro měř. č. 1

Takto popsaný průběh naměřených hodnot je nutné transformovat na dekadický logaritmus.

To provedeme vynásobením konstanty polynomu K_1^* hodnotou 2,30245 a tím dostaneme novou konstantu K_1 . Rovnice (3.3.2) přejde na tvar

$$y = K_1 \cdot \log(Re) + K_2^* \quad (3.3.3) \quad [L5]$$

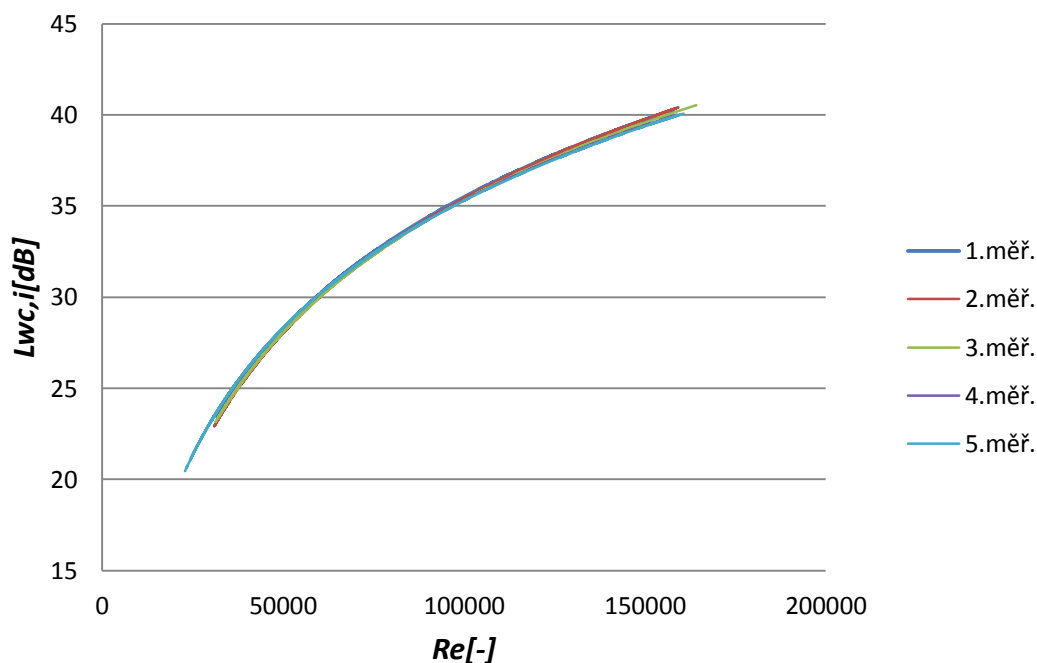
V dalším kroku musíme zavést obecně platnou závislost hladiny akustického výkonu na ploše ve tvaru $10 \log S_p$ tak, v našem případě je průřez volného konce potrubí konstantní v závislosti na Reynoldsově čísle, proto zahrneme tento výraz do konstanty K_2^* ve tvaru

$$K_2^* = K_2 - 10 \log S_p \quad (3.3.4) \quad [L5]$$

Kde K_2 [-] je nově zavedená konstanta.

Po úpravě dostaneme výsledný vztah pro popis celkové hladiny akustického výkonu naší experimentální trati v závislosti na Reynoldsově čísle ploše průřezu volného konce vyústky.

$$L_{wc,i} = K_1 \cdot \log Re + 10 \log S_p + K_2 \quad (3.3.5) \quad [L5]$$



Obr.: 3-8 Hladiny celkového akustického výkonu v závislosti na Reynoldsově čísle popsané rovnicí (3.3.5)

Z uvedeného grafu je vidět výborná shoda průběhu opakovaných měření (rozdíl ± 1 dB) a lze tedy konstatovat, že dané vyhodnocené měření celkem přesně popisují opravdové akustické parametry pozadí měřicí experimentální tratě a z tohoto důvodu bude použit při následném porovnání akustických parametrů měřené tratě s jinou tratí umístěnou také v hlukové laboratoři Ústavu techniky prostředí, avšak odlišné konstrukce a s tím i spojeného celého systému měření a vyhodnocení výsledků. To nám však nebrání, abychom tyto dvě tratě mohli porovnat z hlediska akustických parametrů pozadí a zamysleli se nad vhodností jejich použití při měření vzduchotechnických elementů.

Tab.3-1 Platné konstanty pro jednotlivá měření

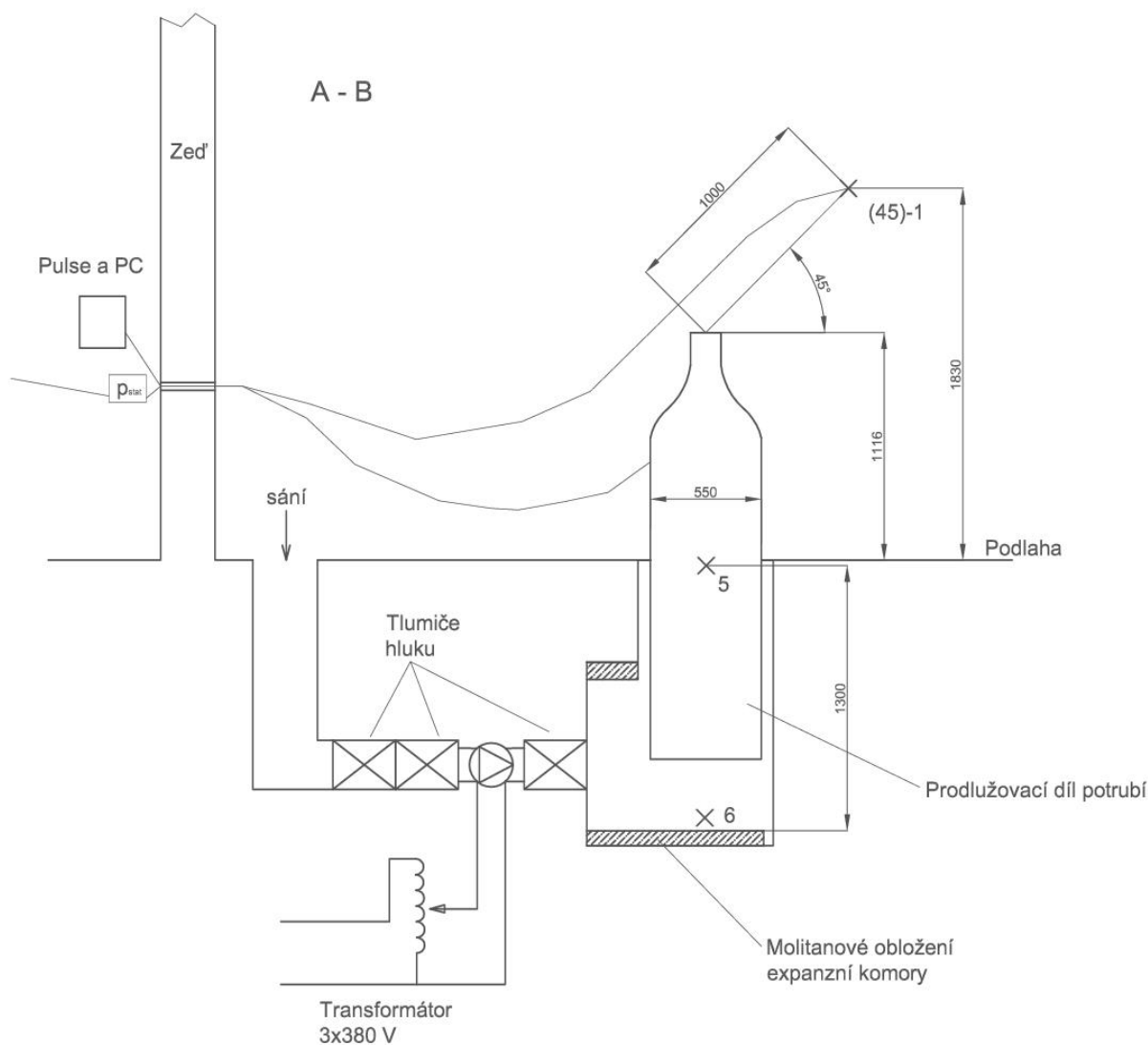
	<i>K1</i>	<i>K2</i>	<i>R²</i>
1.měř.	24.08	-84.918	0.915
2.měř.	24.61	-87.589	0.9154
3.měř.	24.17	-85.516	0.9087
4.měř.	23.29	-81,15	0.9082
5.měř.	23.18	-80,63	0.9263

3.4 Porovnání akustických parametrů dvou tratí

Z důvodu jednoznačnějšího pohledu na akustické parametry měřené experimentální měřicí trati a z důvodu vyvození potřebných závěrů např. o vhodnosti jejího použití, bylo vhodné porovnat získané parametry s parametry jiné tratě podobného charakteru. K porovnání jsme si vybrali, jak již bylo výše zmíněno, experimentální měřicí trať, která je též umístěná v hlukové laboratoři. Aby bylo vůbec možné porovnat akustické parametry dvou odlišných tratí, založených na různě pojatých koncepcích měření daného systému, bylo potřeba se seznámit s druhým měřicím systémem, abychom byli vůbec schopni nejen určit rozdíly mezi parametry daných dvou tratí, ale hlavně také určit možné příčiny a vyvodit závěry.

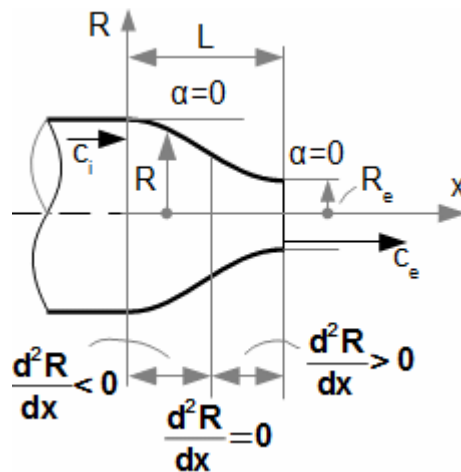
3.4.1 Popis porovnávané trati

Konstrukční řešení této trati je na obr.3-1. Tato trať je založená na koncepci měření akustických vlastností vzduchotechnických elementů umístěných v proudu vzduchu generovaným pomocí ventilátoru. Poněvadž samotný ventilátor je výrazným zdrojem hluku a bylo potřeba tento zdroj co možno nejvíce eliminovat, ale zároveň nebylo žádoucí jeho umístění do velké vzdálenosti z důvodu složitosti dopravy vzduchu, byl tento ventilátor umístěn pod podlahu a na vstupu i výstupu vzduchu opatřen tlumiči hluku. Z ventilátoru vzduch dále proudí do expanzní komory, která je též izolována molitanem a dále do samotného potrubí, které je zakončené dýzou, na které se měří jednotlivé vzduchotechnické prvky podobně jako na trati se zdrojem tzv. „Tichého vzduchu“ pomocí vhodně rozmístěných mikrofónů.



Obr.: 3-9 Schéma experimentální trati s ventilátorem [L9]

Právě zakončení potrubí dýzou specifického tvaru je další důležitá konstrukční vlastnost tohoto systému, kterou je potřeba blíže popsat z důvodu lepšího pochopení akustických parametrů pozadí tratě. Potrubí je zakončené zužující se tryskou (dýzou), jejíž úkolem je transformovat vnitřní a tlakovou energii stlačitelné tekutiny v energii kinetickou. Ideální tvar dýzy, jako např. na obr.:3-10, musí být plynulý rovnoběžný s proudnicemi, jakákoliv prudká změna směru má za následek nerovnoměrný průběh proudnice a vznik turbulentního proudu vlivem nárazu do stěny potrubí.



Obr.: 3-10 Ideální tvar zužující se trysky [L10]

Dále musí tvar dýzy zaručit rovnoměrné rychlostní pole na výstupu, výstupní rychlost musí mít, v celém svém průřezu, směr osy dýzy. Platí i pro proudnice v blízkosti obvodu stěn dýzy.

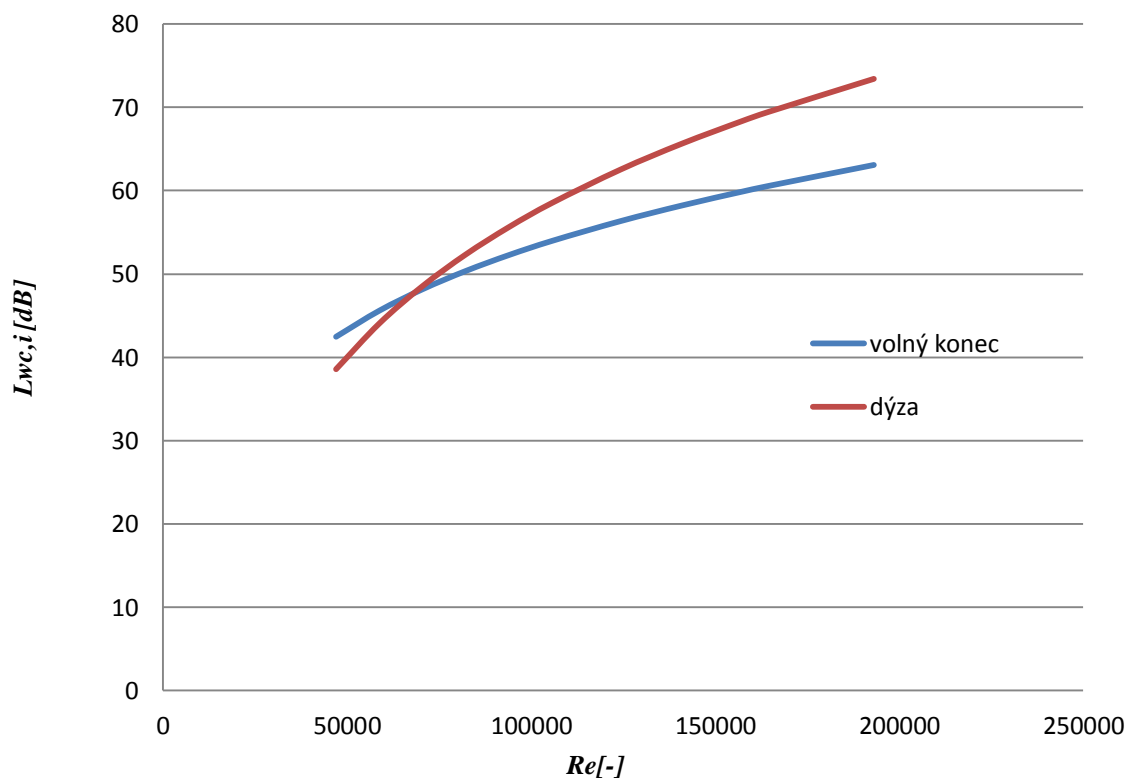
Průchodem vzduchu touto dýzou dochází postupně ke snižování tlaku a naopak rychlost se zvyšuje. To je při měření akustických vlastností vzduchotechnických elementů vložení do vytékajícího proudu vzduchu velice užitečné. Nejen, že se díky plynulému přechodu netvoří turbulence vedoucí ke vzniku hluku, tedy nežádoucího hluku pozadí trati, ale naopak díky vyšší rychlosti vytékajícího vzduchu nastane větší změna akustického výkonu na měřeném elementu umístěném do středu tohoto proudu.

Jako další výhodu systému s použitým ventilátorem jako zdroje proudu vzduchu je časová flexibilita. Můžeme kdykoliv přijít, zapnout ventilátor a hned začít měřit. Odpadá nám tím potřeba čekání na naplnění tlakové nádoby na potřebný tlak 7 bar, jako tomu je u první popisované trati, což v našem případě trvalo zhruba 50minut a s kombinací požadavku měření v nočních hodinách, není zrovna komfortní. Naopak nespornou výhodou systému se zdrojem tzv. „Tichého vzduchu“ je kontinuální sběr dat během jednoho měření, které komplexně obsáhne všechny změny akustického výkonu trati během postupného vyfukování tlakové nádoby a tedy postupnému snižování rychlosti vzduchu od maximální (při náběhu trati) cca.16m/s po minimální, kdy má ještě generovaný akustický výkon vyšší hodnoty hladin než úroveň akustického výkonu pozadí a má tedy ještě smysl provádět měření cca. 3m/s .

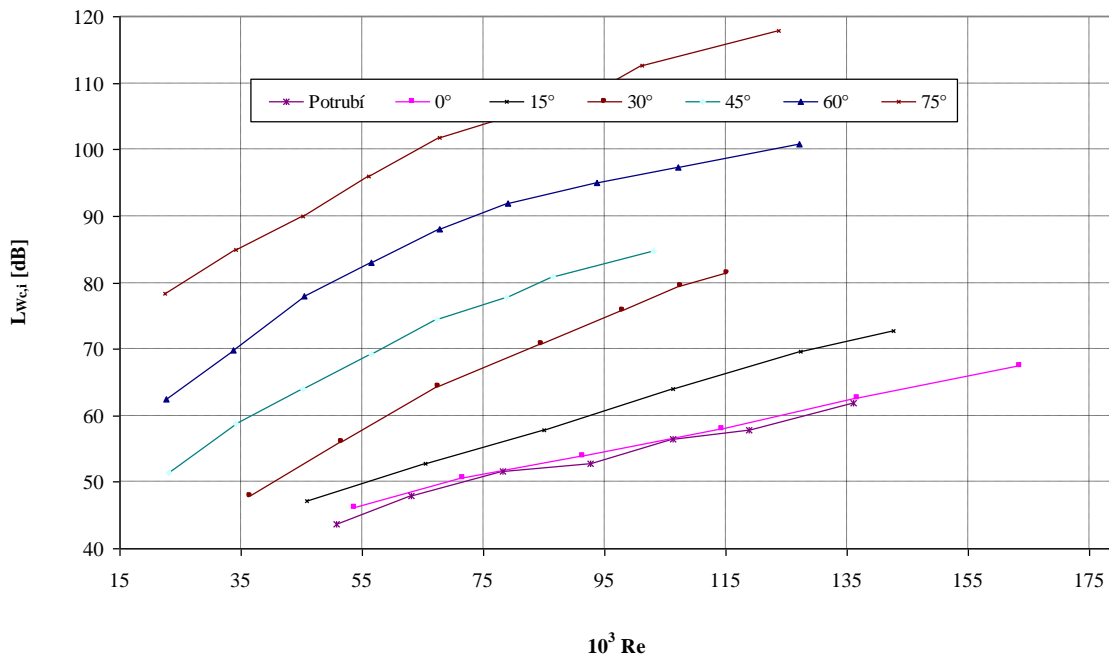
3.4.2 Výsledky

Při porovnání výsledných celkových akustických výkonů daných tratí v závislosti na Reynoldsově číslu, trati se zdrojem tzv. „Tichého vzduchu“ zakončené volným koncem potrubí a trati se zdrojem proudu vzduchu od ventilátoru zakončené dýzou, dostaneme následující graf na obr.:3-11.

Na tomto grafu je vidět, že při výtoku proudu vzduchu z volného konce potrubí při nízkých rychlostech vznikají značné turbulence vlivem nárazu neusměrněného proudu vzduchu do okolního prostředí a tím dochází ke vzniku vyšších úrovní hluku než je tomu při výtoku z dýzy, kde je proud vzduchu usměrňován a v celém průřezu má rovnoměrný charakter. Naopak při vyšších rychlostech nad 7m/s je patrný zřejmý nárůst celkového akustického výkonu u výtoku dýzou, než je tomu u volného konce potrubí. Z toho by bylo možné usuzovat, že trať se s volným koncem potrubí bude výhodnější použít pro měření při vyšších rychlostech, kde nárůst hluku pozadí není tak výrazný a naopak při nižších rychlostech proudění bude výhodnější použití dýzy.



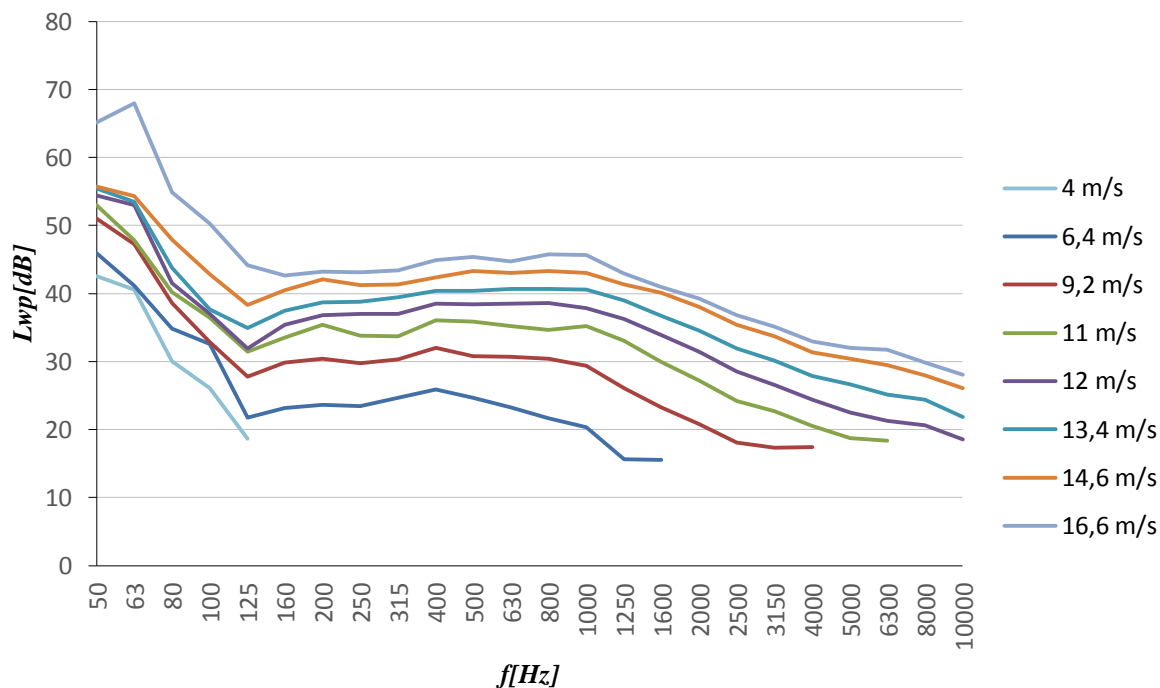
Obrázek 3-11 Porovnání celkových hladin akustického výkonu obou tratí



Obr. 3-12 Celkové hladiny akustického výkonu těsné klapky v závislosti na Re při různých úhlech natočení klapky – výsledky měření [L5]

Na obr.3-12 jsou vidět celkové hladiny akustického výkonu těsné klapky v závislosti na Reynoldsově čísle při různých úhlech natočení klapky, z toho je možné usuzovat, že tato trať je vhodná např. pro zdroje s odstupem hluku od měřicí tratě, kde je vidět při určitém natočení klapky o kolik je hluk samotné klapky vyšší.

Na obrázku je také vidět hluk samotné experimentální tratě označené jako potrubí, který můžu porovnat s mými výsledky na měřenými na stejné trati a zjistím, že se téměř neliší. U obou je vidět průběh celkového akustického výkonu mezi hodnotami 43 až 63 dB.



Obr.: 3-13 Průběhy hladin akustického výkonu v závislosti na kmitočtu 1/3oktávovém pásmu na trati se zdrojem tzv. „Tichého vzduchu“



Obr.: 3-14 Průběhy hladin akustického výkonu v závislosti na kmitočtu 1/3oktávovém pásmu na trati s ventilátorem [L9]

Při porovnání obr.3.13 s obr.3.14 můžeme vidět, že zatímco na trati s volným koncem vyústky můžeme i při různých rychlostech měřit daleko větší rozsah kmitočtů např. pro rychlost 4 m/s naměříme hodnoty akustického výkonu vyšší než hluk pozadí pro kmitočty 125Hz u trati s ventilátorem nikoliv . Toto platí pro všechny rychlosti přes celé 1/3 oktávové pásmo

4. Návrh změn v dosavadním způsobu měření

Jedním z bodů zadání mé bakalářské práce je také navržení změn, které by vedly ke zlepšení ovladatelnosti a zjednodušení postupu zpracování naměřených dat.

V průběhu práce na mé bakalářské práci jsem několikrát provedl samotné měření akustických parametrů pozadí experimentální měřicí tratě, seznámil jsem se s celou její koncepcí, systémem měření a konstrukčním řešením celého systému.

Během mého měření jsem se musel vypořádat s některými skutečnostmi, které podle mého názoru zbytečně práci komplikovaly a dalo se zamyslet nad tím, jak tyto problémy odstranit nebo navrhnout jiné jednodušší řešení, jak tento problém obejít.

Jako první ze zmiňovaných komplikací bych mohl zmínit např. použití daného termoanemometru TA5, který nedisponuje vlastní pamětí a průběh měření musí být zaznamenáván do externí paměti, ze které se teprve až po skončení měření musí stáhnout data do počítače a následně složitě zpracovávat a přiřazovat ke správným hodnotám naměřených akustických parametrů získaných ze čtyř mikrofonů. Dané přiřazování naměřených rychlostí závisí na správném nastavení času na termoanemometru a bezproblémovému chodu během měření, který se bohužel nedá při měření nijak kontrolovat, může se tedy klidně stát, že na začátku měření dojde k přerušení načítání dat z anemometru, my to zjistíme až po provedení celého měření a nezbyde nám nic jiného než celé měření opakovat, což znamená opět dlouhé čekání na naplnění tlakové nádoby na potřebný tlak a následné opakování měření. Jako řešení může připadat v úvahu buď investice do zakoupení nového modernějšího termoanemometru s vlastní dostatečnou pamětí, nebo paralelní zapojení anemometru do počítače spolu se zapojením čtyř mikrofonů do zvukoměrné aparatury PULSE 356. Toto paralelnímu připojení obou měřících zařízení v režimu on-line by vedlo k přesnému sčasování a přiřazení správné rychlosti k měřeným hodnotám. K tomu by bylo potřeba disponovat PC zařízením se dvěma rs232 vstupy. Termoanemometr je navíc napájený čtyřmi tužkovými baterkami, které se mohou kdykoliv při měření vybit a opět to povede ke znehodnocení měření. Proto by bylo vhodnější stávající termoanemometr nahradit např. čidlem od stejné firmy (z důvodu dobré kompatibility) Ahlborn FVAD 35 TH5, které je možné napojit přímo do ústředny Ahlborn, která je užívána pro záznam dat z tlakové nádoby. Toto čidlo se navíc dá zapojit přes USB port čímž by byl odstraněn problém s jedním rs232 vstupem na PC.

Jako další problém se jeví na této trati určení střední rychlosti proudu, jestli jsme vůbec schopni na této trati, tak jak je zkonstruována, určit střední rychlost proudu např. sondáží rychlostního profilu. Anemometr měří principiálně rychlost v jednom bodě a bylo by nutné tuto rychlost přepočítat na střední rychlost. Z tohoto důvodu je pro srovnání v nádobě dýza, která měří střední rychlost, ta se ovšem vyhodnocuje na základě dalších měřených veličin a tudíž je tu možnost vstupu dalších nepřesností do výsledku.

5. Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval akustickými vlastnostmi experimentální měřicí trati používané pro získávání informací o hlučnosti jednotlivých vzduchotechnických elementů běžně používaných ve vzduchotechnice.

Jedním z hlavních bodů mé práce bylo provedení měření na této trati a následné zpracování získaných dat tak, abychom dostali jednoznačnou informaci o parametrech hluku pozadí této soustavy. Nutno dodat, že se jedná o velmi sofistikovaný a poměrně složitý systém vyhodnocování získaných dat a pro pochopení jednotlivých fází daného měření je důležité se s celým systémem, tak jak byl navržený, podrobně seznámit.

K tomuto účelu slouží vytvořený podrobný popis měřicího systému, který se zabývá jak konstrukčním řešením daných částí měřicí tratě, tak i popisem potřebného měřicího zařízení, důležitého pro získávání relevantních informací o průběhu sledovaných veličin.

Samotný měřicí systém je založený na řízené expanzi stlačeného vzduchu z tlakové nádoby umístěné na dvoře halových laboratoří. Tento systém byl vybrán kvůli požadavkům, které jsou kladeny na nízké hodnoty hluku pozadí tj. i na vlastní hluk celého měřicího systému trati.

Pro splnění těchto požadavků bylo potřeba provést měření v nočních hodinách, kdy je v prostorách fakulty největší šance vyhnout se nežádoucím rušivým vlivům, které by celé měření znehodnocovaly a komplikovaly jeho následné zpracování.

Aby získané informace vedly k závěrečnému pohledu na akustické parametry experimentální trati, bylo nasnadě podrobit získané výsledky porovnání s podobnou tratí založenou na odlišné koncepci, která je také umístěná v halových laboratořích. Pro tento účel mi byly poskytnuty potřebná data měření akustických parametrů provedených na této trati. Porovnáním obou tratí jsem došel k závěru, že experimentální měřicí trať založená na zdroji tzv. „Tichého vzduchu“ je vhodnější pro použití měření ve větších rychlostech přes 7m/s, kdy díky nízkému nárůstu hluku pozadí bude zřetelný vznik hluku způsobený případným měřeným vzduchotechnickým elementem vloženým do proudu vzduchu na trati.

Naopak trať se zdrojem proudu vzduchu od ventilátoru umístěným pod podlahou hlukové laboratoře, bude vhodnější použít při nižších výtokových rychlostech díky usměrněnému proudu vzduchu dýzou, bude mít větší vliv na akustický výkon vloženého měřeného elementu než by tomu bylo v prvním případě a navíc hodnoty hluku pozadí tohoto systému jsou při nižších rychlostech pod 6m/s nižší než u systému s řízenou expanzí proudu vzduchu.

Jako poslední bod mé práce, bylo pokusit se ze získaných informací o fungování a principu měření trati, navrhnout změny, které by vedly ke zlepšení ovladatelnosti a zjednodušení postupu. Zde se z mého pohledu dá některými jednoduchými dílčími zásahy, jako např. zakoupení modernějšího anemometru, nebo čidla Ahlborn FVAD 35 TH5, které je možné napojit přímo do ústředny Ahlborn, eliminovat náchylnost systému k chybě při načítání .

6. Použitá literatura

- [L1] Nový, R.: Hluk a chvění. ČVUT, Praha 2009. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [L2] Nový, R., Kučera, M.: Snižování hluku a vibrací. ČVUT, Praha 2009. Dostupný z WWW:
<http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/SHV/Novy_Kucera_Snizovani_hluku_a_vibraci.pdf>
- [L3] Nožička, J.: Termomechanika. ČVUT, Praha 1998. ISBN 80-01-01836-9.
- [L4] Drkal, F., Zmrhal, V.: Větrání. ČVUT, Praha 2013. ISBN 978-80-01-05181-8
- [L5] Kučera, M.: Aerodynamické zdroje hluku při nízkých Machových číslech [Disertační práce]. Praha, 2010. 167s. ČVUT v Praze. Fakulta strojní.
- [L6] Votlučka, J.: Aerodynamické zdroje hluku [Diplomová práce]. Praha: ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Ústav techniky prostředí, 2005.51 s
- [L7] Nový, R., Kučera, M.: Vytápění, Větrání, Instalace. *HLUK*, 2009, roč.18, č.4, s. 175-179. ISSN 1210-1389.
- [L8] Janotková, E.: Technika prostředí. VUT, Brno 2010. [online] Dostupný z WWW: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vyuka/technika_prostredi/SylabyTP6.pdf>
- [L9] Králíček, J.: Hluk koncových element [Diplomová práce]. Praha, 2014. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Ústav techniky prostředí
- [L10] Škorpík, J.: Proudění plynů a par tryskami. VUT, Brno ,2016. [online] Dostupný z WWW:< <http://www.transformacni-technologie.cz/proudeni-plynu-a-par-tryskami.html>>

