

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRY APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Porovnání metod měření akustické intenzity a výkonu

vedoucí práce: Ing. Jan Klasna

2012

autor: Bc. Jiří Šanovec

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKŮNU)

Jméno a příjmení: **Jiří ŠANOVEC**
Osobní číslo: **E10N0166P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektrotechnický inženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Porovnání metod měření akustické intenzity a výkonu**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte metody měření akustického tlaku a akustického výkonu.
2. Vytvořte seznam dostupné literatury týkající se této oblasti.
3. Pomocí různých metod proveďte měření akustického výkonu na modelové situaci.
4. Výsledky měření zhodnoťte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Klasna**
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Klasna**
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato práce se zabývá porovnáním metod měření akustické intenzity a výkonu. Jsou zde popsány základní akustické veličiny a přístroje pro měření těchto akustických veličin. Dále jsou uvedeny principy, na kterých je založeno měření akustické intenzity a výkonu, a shrnuty normativní dokumenty zabývající se problematikou měření akustického výkonu. V poslední části této práce je zaznamenáno měření akustického výkonu, které bylo provedeno pomocí různých metod, a následně jsou tyto metody porovnány.

Klíčová slova

Akustický tlak, akustický výkon, akustická intenzita, zvukoměr, intenzitní sonda, měření akustické intenzity, měření akustického výkonu

Abstract

The thesis deals with comparison of sound intensity and sound power measurement methods. The basic acoustic units and devices for measurement of those units are described in there. Principles of sound intensity and power measurement are mentioned and normative documents dealing with issues of measurement of acoustic power are summarized in the thesis. In the last section of the thesis, measurement of acoustic power, which was performed by different methods, is described and those methods are compared.

Key words

Sound pressure, sound power, sound intensity, sound level meter, intensity probe, measurement of sound intensity, measurement of sound power

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Janu Klasnovi za jeho cenné rady a pomoc při vzniku této diplomové práce. Dále chci také poděkovat svým rodičům a všem, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ	1
ÚVOD	2
1 ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ VELIČINY	3
1.1 AKUSTICKÝ TLAK	3
1.1.1 Hladina akustického tlaku	3
1.2 AKUSTICKÁ INTENZITA	3
1.2.1 Hladina akustické intenzity	4
1.3 AKUSTICKÝ VÝKON	4
1.3.1 Hladina akustického výkonu	5
2 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN	6
2.1 ZVUKOMĚR	6
2.2 INTENZITNÍ SONDA	7
2.3 KALIBRACE ZVUKOMĚRNÉ TECHNIKY	10
3 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN	12
3.1 MĚŘENÍ AKUSTICKÉ INTENZITY	12
3.1.1 Nejistoty při měření akustické intenzity	13
3.1.2 Frekvenční omezení	14
3.2 MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU	16
3.2.1 Metody založené na měření akustického tlaku	16
3.2.2 Metody založené na měření akustické intenzity	18
4 NORMATIVNÍ DOKUMENTY ZABÝVAJÍCÍ SE PROBLEMATIKOU MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU	23
5 MĚŘENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU NA MODELOVÉ SITUACI	26
5.1 MĚŘENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU POMOCÍ AKUSTICKÉHO TLAKU	26
5.1.1 Průběh samotného měření	29
5.2 MĚŘENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU POMOCÍ AKUSTICKÉ INTENZITY V BODECH	33
5.2.1 Průběh samotného měření	33
5.3 MĚŘENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU POMOCÍ AKUSTICKÉ INTENZITY – METODOU SKENOVÁNÍ	39
5.3.1 Průběh samotného měření	40
5.4 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD MĚŘENÍ	43
ZÁVĚR	45

POUŽITÉ ZDROJE:46

PŘÍLOHY48

Seznam symbolů

Značka	Termín	Jednotka
$p(t)$	okamžitý akustický tlak	Pa
p_0	referenční akustický tlak ($p_0=20\mu\text{Pa}$)	Pa
L_p	hladina akustického tlaku	dB
L_{Aeq}	ekvivalentní hladina akustického tlaku	dB
$i(t)$	okamžitá akustická intenzita	W/m^2
\vec{I}	akustická intenzita	W/m^2
L_I	hladina akustické intenzity	dB
I_0	referenční akustická intenzita ($I_0=10^{-12} \text{W}/\text{m}^2$)	W/m^2
I_n	normálová složka akustické intenzity	W/m^2
W	akustický výkon	W
L_w	hladina akustického výkonu	dB
W_0	referenční akustický výkon ($W_0=10^{-12}$)	W
$\vec{v}(t)$	akustická rychlost	m/s
ρ	hustota vzduchu	kg/m^3
c	rychlost zvuku	m/s
θ	teplota vzduchu	$^{\circ}\text{C}$
B	atmosférický tlak	Pa
δ_{p10}	index zbytkové intenzity	dB
L_d	index dynamické schopnosti	dB
K	korekce na zbytkovou intenzitu	dB

Úvod

Měření akustického výkonu je velmi důležité především z důvodu ochrany lidského zdraví, kdy například nadměrná hlučnost některého stroje v průmyslovém či jiném odvětví může způsobit nenávratné poškození sluchu člověka. Z tohoto důvodu jsou také jednotlivá zařízení či různé pracovní nástroje, s kterými člověk přichází do styku, podrobovány různým akustickým měřícím metodám. Výběr metody pro měření akustického výkonu zdroje zvuku může mít zcela zásadní význam na konečnou přesnost měření. Metod pro měření akustického výkonu existuje celá řada: od měření pomocí akustického tlaku, přes měření pomocí akustické intenzity, až po moderní měření pomocí akustických kamer.

Tato práce se zabývá metodou měření akustického výkonu pomocí akustického tlaku a pomocí akustické intenzity. Jsou zde popsány principy, na kterých je založené měření akustické intenzity a výkonu. Při provádění akustických měření je třeba postupovat na základě platných norem, protože jediné tak lze dosáhnout správných a vzájemně porovnatelných výsledků. Z tohoto důvodu je v práci uveden přehled norem zabývajících se problematikou měření akustického výkonu.

V praktické části této práce je provedeno měření akustického výkonu pomocí různých metod na zvolené modelové situaci. Všechna měření jsou prováděna na základě platných norem. V závěru práce jsou výsledky jednotlivých měření shrnuty a vzájemně porovnány.

1 Základní akustické veličiny

1.1 Akustický tlak

V důsledku šíření zvukové vlny v pružném prostředí dochází k vychylování částic ze své rovnovážné polohy. Částice se vychylují buď příčně ke směru šíření, nebo se vychylují podélně ve směru šíření, a tak se v určitých částech homogenního pružného prostředí zvětšuje hustota částic a v jiných snižuje. Tím se ve vzduchu mění tlak plynu oproti své statické hodnotě atmosférického (barometrického) tlaku. Tato proměnná složka, superponovaná k atmosférickému tlaku, se nazývá akustický tlak [1]. Vzhledem k tomu, že akustický tlak je určen pouze velikostí jedná se o skalární veličinu. Jeho hodnota je udávána v pascálech [Pa].

1.1.1 Hladina akustického tlaku

Hladinu akustického tlaku L_p vypočítáme podle vztahu:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB] \quad (1.1)$$

kde

p sledovaný akustický tlak

p_0 referenční hodnota akustického tlaku ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa /1kHz)

Hladina akustického tlaku se také často označuje jako SPL (z anglického Sound Pressure Level) [2].

1.2 Akustická intenzita

Součin akustického tlaku a akustické rychlosti představuje měrný tok akustické energie a definuje okamžitou akustickou intenzitu, kterou značíme:

$$\vec{i}(t) = p(t) \cdot \vec{v}(t) \quad (1.2)$$

V praktické akustice se využívá veličina akustická intenzita, která je střední hodnotou okamžité akustické intenzity:

$$\vec{I} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{i}(t) dt \quad (1.3)$$

Tato veličina představuje tok akustické energie jednotkou plochy [5]. Důležité je zdůraznit, že se jedná o vektorovou veličinu, takže popisuje velikost i směr toku energie v uvažovaném místě [2].

1.2.1 Hladina akustické intenzity

Hladi

nu akustické intenzity vypočítáme podle vztahu:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} [dB] \quad (1.4)$$

kde

I [W/m^2] sledovaná akustická intenzita

I_0 [W/m^2] referenční hodnota akustické intenzity ($I_0 = 1 \cdot 10^{-12} W/m^2$) [2]

1.3 Akustický výkon

Protože hodnocení zdroje podle akustického tlaku může být zkresleno orientací a vzdáleností posluchače od zdroje nebo teplotou a rychlostí proudění prostředí apod., používá se jako veličina charakterizující zdroj zvuku akustický výkon, který nezávisí na vnějších podmínkách, ani na vlivech, které souvisí s pozorovatelem [2].

Výkon kmitavého děje W je v ustáleném stavu definován jako práce vykonaná za jednotku času, kde práce je součinem síly a dráhy. Pro diferenciálně malé časové úseky je okamžitý výkon dán součinem působící síly a rychlosti. Vzhledem k tomu, že akustický tlak je definován silou působící na jednotkovou plochu, tak lze akustický výkon vyjádřit vztahem:

$$W = p \cdot \vec{v} \cdot S = \vec{I} \cdot S [W] \quad (1.5)$$

kde

S [m^2] je sledovaná plocha [1]

Akustický výkon je s akustickou intenzitou, která charakterizuje tok akustické energie ve zvukovém poli svázán vztahem:

$$W = \oiint_S \vec{I} \cdot d\vec{S} \quad (1.6)$$

Na tomto vztahu je založen princip měření akustického výkonu pomocí akustické intenzity. Tento vztah říká, že akustický výkon vyzařený uvnitř uzavřené plochy S se získá integrací přes tuto plochu, bez ohledu na uspořádání a typ zdrojů, které se nacházejí uvnitř objemu. Zdroje, které se nacházejí mimo zvolenou plochu S , k výslednému výkonu nepřispívají [1].

1.3.1 Hladina akustického výkonu

Hladinu akustického výkonu vypočítáme podle vztahu:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} [dB] \quad (1.7)$$

kde

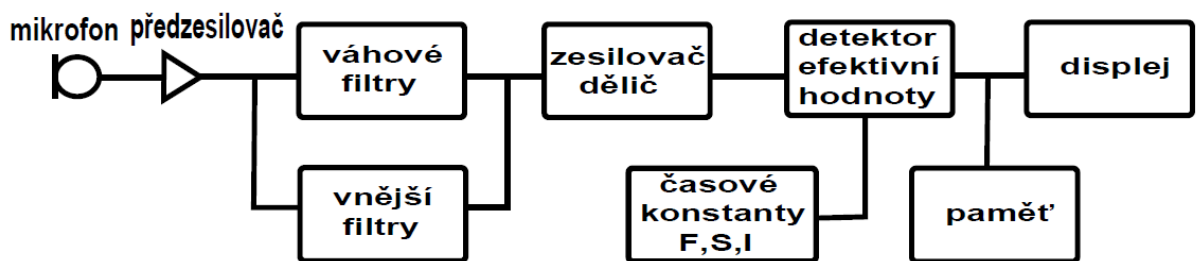
W [W] sledovaný akustický výkon

W_0 [W] referenční hodnota akustického výkonu ($W_0 = 1 \cdot 10^{-12} W$)

2 Přístroje pro měření akustických veličin

2.1 Zvukoměr

Pro měření akustického tlaku se využívá zvukoměr. Na Obr. 2-1 je zobrazeno blokové schéma běžného zvukoměru. Pro převod akustického signálu na elektrický se užívá kondenzátorového mikrofону. Kondenzátorový mikrofón se používá z důvodu jeho dobrých vlastností. První rozhodující vlastností je lineární frekvenční charakteristika v celém slyšitelném pásmu a druhou důležitou vlastností je velmi dobrá časová stabilita, kdy jeho citlivost se nemění ani po několika letech správného užívání.



Obr. 2-1: Blokové schéma zvukoměru

Další důležitou částí zvukoměrného řetězce jsou váhové filtry, které upravují lineární frekvenční charakteristiku mikrofónu tak, aby výsledná charakteristika soustavy odpovídala citlivosti lidského ucha. Váhových filtrů je více druhů, které se liší svými frekvenčními vlastnostmi, přičemž dnešní zvukoměry jsou nejčastěji vybaveny váhovacím filtrem A a popřípadě filtrem C. Další možností je připojit ke zvukoměru vnější filtry, které umožňují například oktávovou nebo třetinooktávovou filtraci. Dále je do zvukoměrného řetězce zařazen zesilovač a dělič pro změnu rozsahu zvukoměru. Aby byl zvukoměr schopen určit efektivní hodnotu měřeného signálu je do obvodu zařazen efektovací obvod. Z důvodu setrvačnosti výstupního měřidla není možné sledovat dostatečně rychle změny akustického tlaku, proto jsou do výstupních obvodů zařazeny integrační obvody, které stanovují průměrnou hodnotu akustického tlaku za určitý čas. Tento čas je určen podle zvolené časové konstanty zvukoměru kdy:

- S (slow) vyhodnocuje průměrnou hodnotu měřeného signálu za uplynulou 1 s
- F (fast) vyhodnocuje průměrnou hodnotu měřeného signálu za posledních 200 ms

- I (impuls) je nesymetrická časová konstanta s náběhovou dobou 35 ms a dobou poklesu 2 s

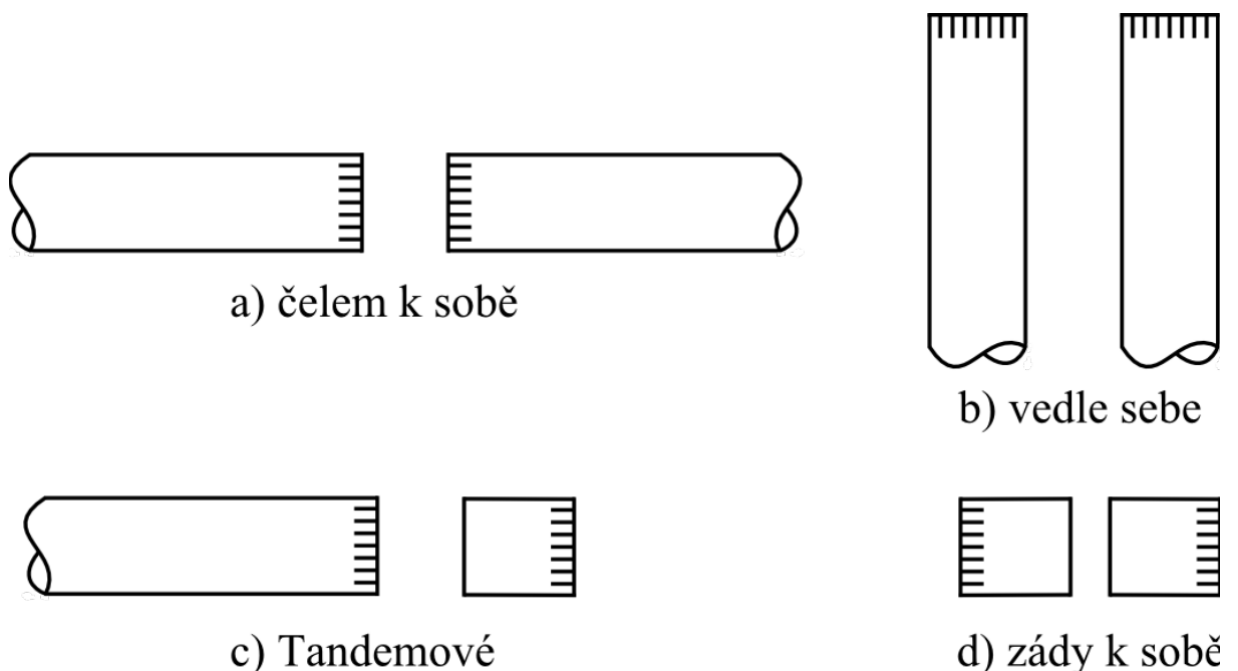
Dnešní zvukoměry mají již výhradně jako výstupní zobrazovací jednotku displej. Umožňují například FFT analýzu v reálném čase, záznam měřeného signálu, komunikaci s PC skrze speciální výstupy (USB, LAN atd.) a mnoho dalších funkcí. Jednotlivé zvukoměry se dělí podle přesnosti měření na kategorie:

- S třídou přesnosti 0 – laboratorní zvukoměry
- S třídou přesnosti 1 – přesné zvukoměry
- S třídou přesnosti 2 – provozní zvukoměry

[1], [2], [5]

2.2 Intenzitní sonda

Pro měření akustické intenzity se využívají intenzitní sondy. První typ sondy je složen ze dvou velmi kvalitních kondenzátorových snímacích mikrofonů, které mohou být uspořádány různými způsoby (viz Obr. 2-2). Nejčastěji se však volí uspořádání čely k sobě z důvodu lepší frekvenční odezvy a směrové charakteristiky, než u ostatních typů uspořádání.



Obr. 2-2: Různá uspořádání kondenzátorových mikrofonů v intenzitní sondě [10].

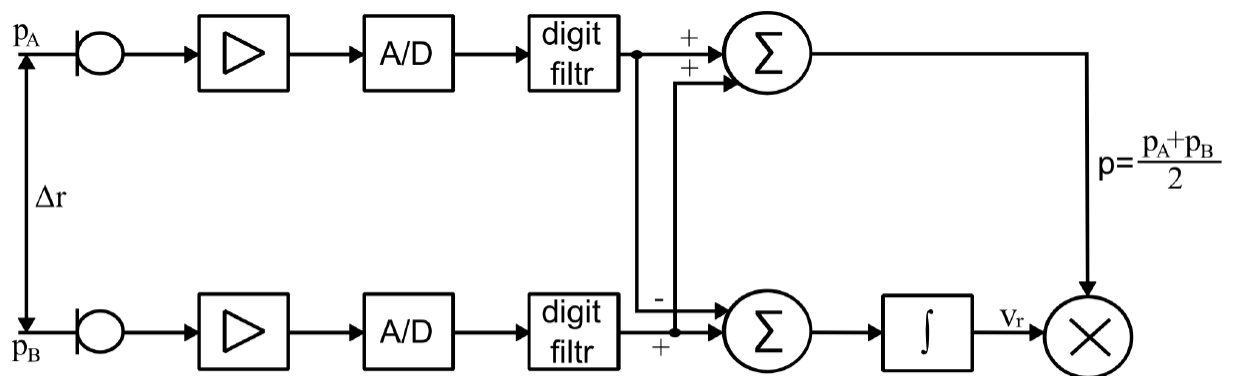
Mezi těmito snímacími mikrofony je přesně definovaná vzdálenost, která je zajištěna pomocí

distanční vložky. Velikost jednotlivých vložek se pohybuje v rozmezí od 6 do 50 mm, přičemž volba velikosti této vložky závisí na měřeném frekvenčním rozsahu. Intenzitní sondy mají také různé velikosti snímacích mikrofonů, kde volba velikosti mikrofonu závisí opět na měřeném frekvenčním rozsahu. Pro měření nižších frekvencí se používají půlpalcové mikrofony a pro měření vyšších frekvencí se používají čtvrtpalcové, protože redukují interferenční efekt [2]. Na Obr. 2-3 je ukázka intenzitní sondy od firmy Brüel&Kjær. Tomuto typu intenzitní sondy se také říká p-p sonda, protože princip měření akustické intenzity spočívá v měření akustického tlaku ve dvou blízkých bodech. Podrobnější princip intenzitní sondy bude uveden v odstavci měření akustické intenzity.



Obr. 2-3: Intenzitní sonda typu p-p od firmy Brüel&Kjær. Převzato z [6]

Na Obr. 2-4 je zobrazeno uspořádání měřicího řetězce pro zpracování signálu z intenzitní sondy.



Obr. 2-4: Blokové uspořádání intenzitní sondy. Převzato z [7]

Intenzitní sonda typu p-u

Vedle výše zmíněného principu intenzitní sondy typu p-p ještě existuje intenzitní sonda, kde akustický tlak je snímán přesným kondenzátorovým mikrofonem a akustická rychlost je měřena přímo pomocí speciálních snímačů akustické rychlosti. Principů, na kterých pracují snímače akustické rychlosti, existuje více, například založených na dvojici ultrazvukových paprsků vysílaných v opačných směrech a Dopplerově jevu nebo na vhodném uspořádání žhavených drátů. Pro intenzitní sondu tohoto typu se užívá označení p-u sonda (popřípadě p-v sonda) [5]. Příklad intenzitní sondy typu p-u od firmy Microflown je zobrazen na Obr. 2-5.



Obr. 2-5: Intenzitní sonda typu p-u od firmy Microflown. Převzato z [11]

V intenzitní sondě typu p-u od firmy Microflown je u snímače akustické rychlosti využíván právě princip vhodného uspořádání žhavených drátů. Tento princip říká, že pokud jsou dva blízko sebe umístěné zahřáté dráty vystaveny proudy vzduchu, pak drát umístěný proti proudy vzduchu bude ochlazován vzduchem více než drát umístěný po proudy. Teplotní změny ovlivňují odpor vodičů a výsledný rozdíl elektrických odporů je měřen elektrickým obvodem, který zajišťuje signál úměrný akustické rychlosti [11]. Vzhledem k rozsahu této práce zde však bude řešena pouze intenzitní sonda typu p-p.

2.3 Kalibrace zvukoměrné techniky

Pokud chceme provádět skutečně přesné měření, měla by být před měřením v jeho průběhu a po jeho skončení provedena kalibrace zvukoměrné techniky. Tato kalibrace se provádí pomocí akustických kalibrátorů, které musí splňovat požadavky dle normy ČSN EN 60942 [8]. Důvodem kalibrace je ověření zda dostáváme z měření platné výsledky. V případě, že dochází k velkým změnám při kalibrování oproti výchozímu stavu, pak je třeba provést nové měření.

Mezi nejpoužívanější zařízení pro cejchování kondenzátorových mikrofonů patří tónové a pistonfonové kalibrátory. Tónové kalibrátory obsahují generátory s výstupem na piezoelektrický reproduktor, který vyzařuje do měřicí komůrky. Výhodou kalibrátorů tohoto typu je, že pracují s kmitočtem 1 kHz, kde mají všechny váhové filtry nulový útlum a tak nezáleží na tom, který filtr je v hlukoměru při kalibraci nastaven. Pistonfonové kalibrátory pracují na principu pístu kmitajícího do definovaného objemu, který je uzavřen membránou mikrofonu. U pistonfonových kalibrátorů je třeba provádět kalibraci bez zařazených váhovacích filtrů, protože pracují s nižšími kmitočty (kolem 250 Hz) a výsledná kalibrace by tak mohla být zařazeným váhovacím filtrem ovlivněna. Přesná hodnota akustického tlaku v komůrce se u pistonfonového kalibrátoru koriguje podle barometru na okamžitý atmosférický tlak. Podmínkou správné kalibrace je u obou typů těchto kalibračních metod správné nasazení a doražení mikrofonu na kalibrátor, protože jakákoliv změna objemu kalibrační komůrky vede na změnu předávaného akustického tlaku a výsledná kalibrace tak není korektní [1].

U intenzitních sond se kalibrace provádí pomocí kalibrátoru se speciální komůrkou, která umožňuje kalibraci obou snímacích mikrofonů současně stejným akustickým signálem. V kalibrační soustavě pro cejchování sondy akustické intenzity se obvykle nalézá pistonfon,

zdroj růžového šumu pro měření zbytkové intenzity a výše zmiňovaná speciální komůrka, která simuluje rovinnou akustickou vlnu ve volném poli [9]. Pro představu, jak taková kalibrační soustava pro intenzitní sondu vypadá, je na Obr. 2-6 ukázána kalibrační soustava od firmy Brüel&Kjær typ 3541-A.



Obr. 2-6: Kalibrační soustava pro intenzitní sondu od firmy Brüel&Kjær typ 3541-A.

Převzato z [9]

3 Měření akustických veličin

3.1 Měření akustické intenzity

Princip měření akustické intenzity vychází ze vztahu:

$$\vec{I} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot \vec{v}(t) dt \quad (3.1)$$

Limita je v praxi nahrazena dostatečně dlouhým časovým intervalem, nebo v případě periodických veličin se užívá integrace přes celistvý počet period.

Nejrozšířenější metodou měření akustické intenzity je pomocí intenzitní sondy, která je založená na měření akustického tlaku ve dvou blízkých bodech (viz kapitola 2.2). Při určení akustické rychlosti se vychází z Eulerovy rovnice, kde se tlakový gradient vyšetřuje pouze ve směru šíření zvuku, tedy ve směru r . Eulerova rovnice pro tento jednorozměrný případ pak bude vypadat takto:

$$\rho_0 \cdot \frac{\partial v_r}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3.2)$$

Po časové integraci této rovnice se získá vztah pro akustickou rychlost v_r

$$v_r = - \frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{\partial p}{\partial r} dt \quad (3.3)$$

Pro zjednodušení tohoto vztahu se gradient akustického tlaku nahrazuje diferenciálem (viz Obr. 3-1), kde měřicí mikrofony snímají akustický tlak v bodě A a B. Gradient tlaku ve směru r se pak odhaduje jako podíl rozdílu tlaků ke vzdálenosti mezi akustickými středy mikrofonů Δr .

Odhad akustické rychlosti je pak určen vztahem:

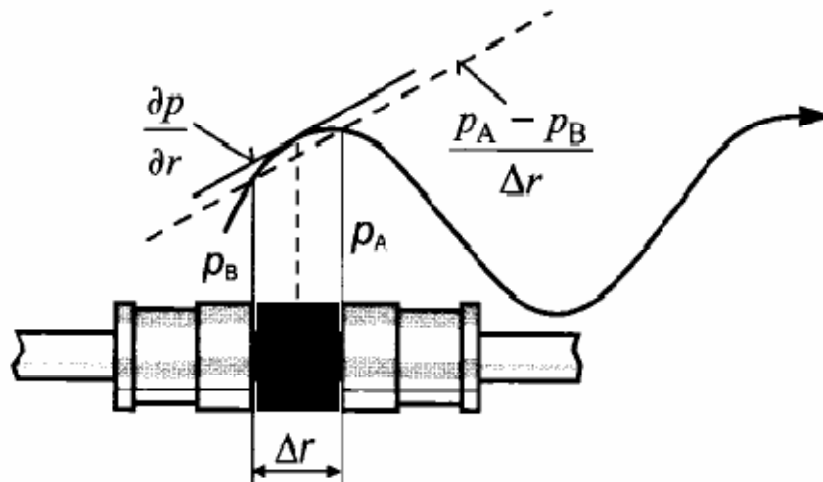
$$v_r \approx - \frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t \frac{p_A - p_B}{\Delta r} dt \quad (3.4)$$

Akustický tlak se bere jako aritmetický průměr z obou tlaků:

$$p \approx \frac{p_A + p_B}{2} \quad (3.5)$$

Výsledný odhad akustické intenzity se získá dosazením vztahů (3.4) a (3.5) do (3.1) [5]:

$$I_n \approx \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left[- \frac{p_A - p_B}{2\rho_0\Delta r} \int_{-\infty}^t (p_A - p_B) dt \right] dt \quad (3.6)$$



Obr. 3-1: Náhrada gradientu tlaku diferencíálem. Převzato z [7].

Je třeba si uvědomit, že intenzita je vektorová veličina a intenzitní sondou lze měřit pouze jednotlivé složky vektoru intenzity. V případě, že je potřeba získat popis celého vektoru intenzity, provede se měření ve třech na sebe kolmých směrech.

V dnešní době se pro měření akustické intenzity využívají vícekanálové analyzátoři, které umožňují toto měření na základě rychlé Fourierovy transformace (FFT), kde využívají imaginární složky křížového spektra $\text{Im } G_{p_A p_B}$ dvou signálů z dvojice mikrofonů intenzitní sondy [2]. Vztah pro určení akustické intenzity pak vypadá takto:

$$I_r(f) = -\frac{1}{\rho_0 \omega \Delta r} \cdot \text{Im } G_{p_A p_B}(f) \quad (3.7)$$

3.1.1 Nejistoty při měření akustické intenzity

V důsledku toho, že v Eulerově rovnici byl gradient akustického tlaku nahrazen podílem $\Delta p / \Delta r$ je na dvoumikrofonní sondu kladen důležitý požadavek, kterým je maximální shoda mezi přenosovými funkcemi obou mikrofonních kanálů. Pokud je dvoumikrofonní sonda umístěna do zvukového pole tvořeného rovinnou postupnou vlnou tak, že osa sondy bude rovnoběžná se směrem šíření zvuku, bude hladina akustické intenzity L_{In} rovna hladině akustického tlaku L_p . Případný rozdíl mezi naměřenými hladinami charakterizuje právě rozdíl mezi kanály, který je nazýván index tlak – intenzita (zkráceně p-I index) nebo také index reaktivity:

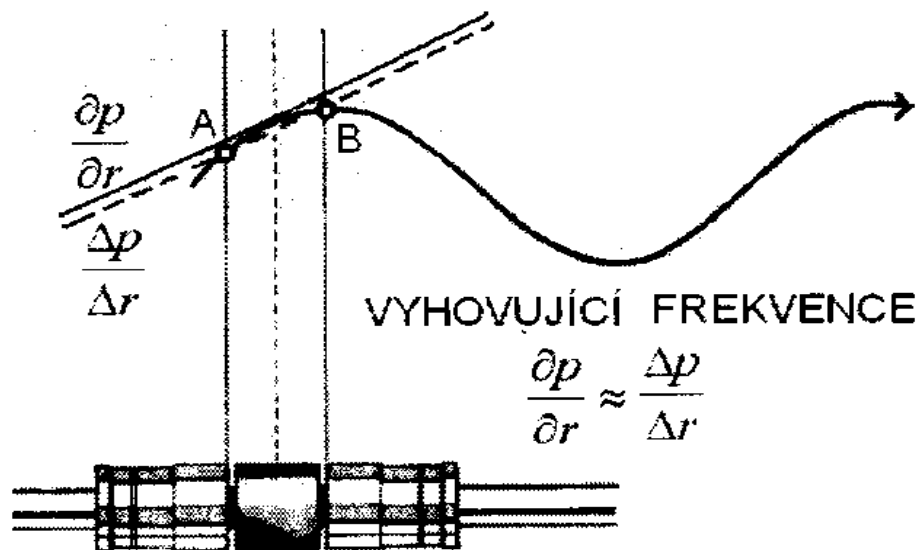
$$\delta_{pI} = L_p - L_{In} [dB] \quad (3.8)$$

Pokud by se sonda umístila do stejného zvukového pole tak, že její směr bude kolmý na směr

šíření, bude složka intenzity v tomto směru nulová. V reálné situaci se však nedokáže zajistit úplná shoda mezi přenosovými funkcemi obou mikrofonních kanálů a měřicí systém to vyhodnotí jako nenulový gradient tlaku. V důsledku toho je naměřena hladina, která se bude lišit o jednotky až několik desítek dB. Tento výsledek je nazýván jako „zbytková intenzita“. Rozdíl mezi hladinami akustického tlaku a intenzity se v tomto případě značí δ_{p10} a je nazývá index zbytkové intenzity, který charakterizuje dynamické možnosti systému [5]. Pro správné určení gradientu je důležitá jak amplitudová tak fázová shoda, kterou je technicky složitější zajistit.

3.1.2 Frekvenční omezení

Vzhledem k použitým aproximacím, při náhradě gradientu akustického tlaku podílem $\Delta p/\Delta r$, má metoda s použitím dvou mikrofonů svá omezení. Mezi nejvýznamnější patří omezení frekvenční, které se projevuje jak na nízkých, tak na vysokých frekvencích. Na Obr. 3-2 je ukázán případ, kdy zvuková vlna má vyhovující frekvenci. V tomto případě je směr tečny shodný se směrem spojnice bodů A a B, ve kterých je měřen tlak p_A a p_B a náhrada gradientu tlaku diferencíálem tak přibližně platí.

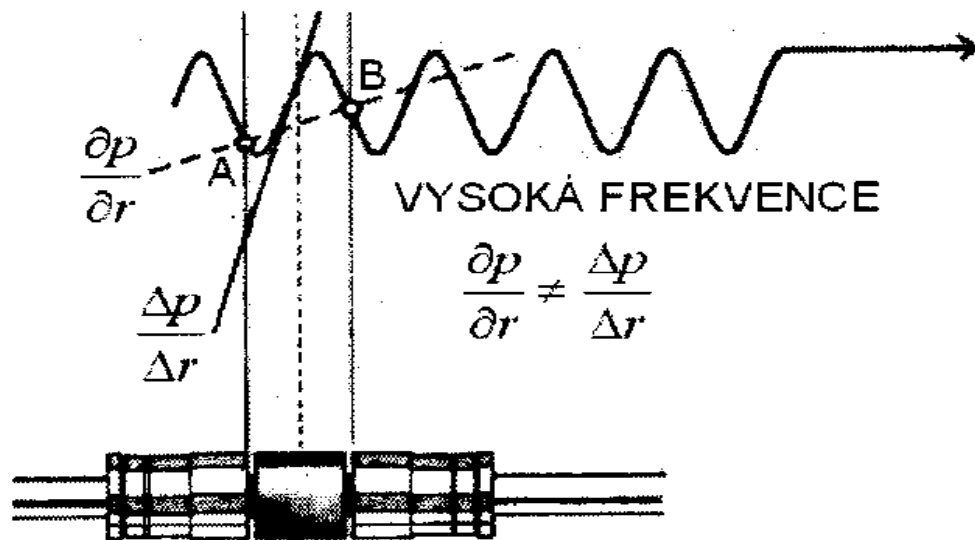


Obr. 3-2: Vyhovující náhrada gradientu tlaku. Převzato z [2].

Omezení na vysokých frekvencích

Na Obr. 3-3 je zobrazena situace, kde dochází k poklesu délky vlny se zvyšující se frekvencí, avšak vzdálenost mezi jednotlivými aproximačními body, která je dána velikostí

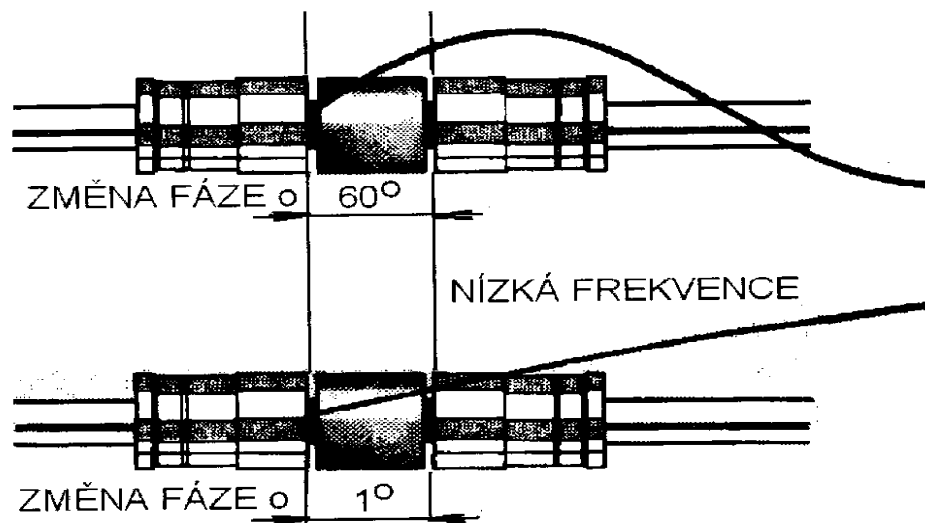
distanční vložky, zůstává konstantní. Směr spojnice bodů A a B, která představuje náhradu gradientu, nesouhlasí se směrnici tečny a dochází tak k výrazné chybě. Velikost této chyby lze korigovat vhodnou volbou distanční vložky. Přičemž v praxi obecně platí, že pro chybu menší jak 1 dB je požadováno, aby délka vlny byla minimálně 6x větší než vzdálenost mezi měřícími mikrofony. Menší vzdáleností mezi mikrofony lze měřit vyšší frekvence.



Obr. 3-3: Frekvenční omezení při vysoké frekvenci. Převzato z [2].

Omezení na nízkých frekvencích

Toto omezení vzniká v případě, kdy narůstá délka vlny se snižující se frekvencí, a dochází tak k poklesu fázového rozdílu tlaků, které jsou snímány oběma měřícími mikrofony. Takto naměřený signál je dále zpracován na elektrické napětí a to je přiváděno na dva kanály analyzátoru, který je schopen zpracovávat dva rozdílné signály. Avšak v případě nízké frekvence dopadající tlakové vlny je na obou měřících mikrofonech vyvolána téměř stejná odezva a signály, které jsou přiváděny na kanály analyzátoru, jsou pak také téměř shodné. Případ tohoto omezení je zobrazen na Obr. 3-4 a je nazýván fázovou chybou. Tuto chybu lze do jisté míry ovlivnit vhodnou volbou kvalitní sondy. Na dvojici mikrofonů by měla být fázová změna alespoň pětinašobek fázové chyby pro dosažení přesnosti 1 dB [2].



Obr. 3-4: Frekvenční omezení při nízké frekvenci. Převzato z [2].

3.2 Měření akustického výkonu

Nejpoužívanější veličinou, která se používá pro charakteristiku jednotlivých zdrojů zvuku, je bezesporu akustický výkon. Důvodem je, že tato veličina nezávisí na vnějších podmínkách, ani na vlivech, které souvisí s pozorovatelem. Akustický výkon tak poskytuje možnost srovnávání jednotlivých zdrojů zvuku mezi sebou, jejich hodnocení pro potřeby technické akustiky a také pro hodnocení z hlediska vlivu na člověka. Měření akustického výkonu se tak stává jedním ze základních měření v akustice.

Akustický výkon lze stanovit několika možnostmi:

- 1) Metodou založenou na měření akustického tlaku
 - a) Ve volném poli
 - b) V difúzním poli
- 2) Metodou založenou na měření akustické intenzity
 - a) Metoda měření v bodech
 - b) Metoda měření skenováním

3.2.1 Metody založené na měření akustického tlaku

Měření ve volném poli

Tato metoda je podmíněna prostředím, ve kterém se měření provádí. Tímto prostředím je volné pole, které je simulováno bezodrazovou, nebo v případě pevné podlahy

polobezodrazovou komorou. Ve volném poli platí pro akustickou rychlost vztah:

$$\vec{v} = \frac{\mathbf{p}}{\rho_0 c_0} \quad (3.9)$$

kde

ρ_0 hustota prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

c_0 rychlost šíření zvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Akustickou intenzitu lze pak vyjádřit jako:

$$\vec{I} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} p(t) \cdot \vec{v}(t) dt = \frac{1}{\rho_0 c_0} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} p^2(t) dt = \frac{p_{\text{ef}}^2}{\rho_0 c_0} \quad (3.10)$$

Dále je zde uvažováno, že vektor akustické intenzity má ve volném poli směr vnější normály ke kulové (nebo polokulové) měřicí ploše, v jejímž středu se nachází zkoušený zdroj zvuku. Kulová plocha se rozdělí na jednotlivé části o plochách S_i a uprostřed každé se změří akustický tlak p_i . Výsledný akustický výkon dle vzorce (1.6) je pak aproximován vztahem:

$$W \approx \sum_{i=1}^N \frac{p_i^2}{\rho_0 c_0} S_i \quad (3.11)$$

kde N představuje počet částí, na který je měřicí plocha rozdělena [5].

V praxi se však spíše pracuje s hladinovým vyjádřením akustického tlaku a výkonu. Výsledný vztah pro určení hladiny akustického výkonu z veličin měřených ve volném zvukovém poli pak vypadá takto:

$$L_w = L_{pr} + 10 \log \frac{S}{S_0} \text{ [dB]} \quad (3.12)$$

kde

L_{pr} průměrná hladina akustického tlaku na měřicí ploše v [dB]

$S_0 = 1 \text{ m}^2$

Měření v difúzním poli

U tohoto typu měření je difúzní pole simulováno dozvukovou komorou. V dozvukové komoře se při měření akustického výkonu vychází z toho, že výkon vyzařovaný zdrojem musí být roven výkonu, který je pohlcován stěnami komory, ve které se měření provádí. Velikost akustického výkonu je zde vyjádřena vztahem:

$$W = \frac{\overline{p^2} a}{4\rho_0 c_0} \quad (3.13)$$

kde

$\overline{p^2}$ je časová střední hodnota kvadrátu akustického tlaku zprůměrovaného přes celý objem komory

a je pohltivost stěn dozvukové komory pro náhodný dopad zvukových vln

Průměr akustického tlaku je možné získat buď pomocí pole vhodně rozmístěných mikrofonů, nebo pouze jediným mikrofonem, který je obvykle pomocí nějakého nosného přípravku přemísťován prostorem komory postupně tak, aby byl získán co nejlepší odhad průměrného akustického tlaku. Celková zvuková pohltivost stěn místnosti se před měřením akustického výkonu určuje například pomocí doby dozvuku na základě Sabinova dozvukového vztahu:

$$a = \frac{0,164V}{T_{60}} \quad (3.14)$$

kde T_{60} představuje dobu dozvuku určenou jako pokles o 60 dB po vypnutí zdroje zvuku, respektive jako pokles akustické energie v prostoru 10^6 krát [5].

3.2.2 Metody založené na měření akustické intenzity

Tato metoda založená na měření akustické intenzity má oproti metodě založené na měření akustického tlaku několik výhod. Umožňuje například určovat hluk u zdrojů zvuku, které jsou zabudovány na svém stálém pracovním místě i přes přítomnost zvýšeného hlukového pozadí od sousedních zdrojů zvuku. Další předností je možnost měřit zdroje hluku i v jejich těsné blízkosti a získat tak lepší poměr signál/šum.

Princip tohoto měření vychází z vektorově uvažovaného zjednodušeného vztahu (1.6)

$$W = \int_S \vec{I} \cdot \vec{n} \cdot dS = \int_S I_n \cdot dS \quad (3.15)$$

kde

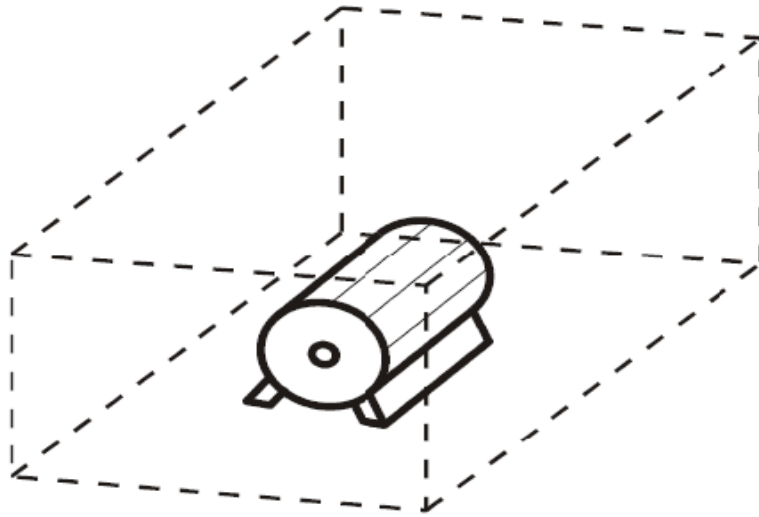
\vec{n} je jednotkový vektor kolmý k ploše S

I_n je orientovaná velikost normálové složky vektoru intenzity

Tato úprava vztahu je provedena z důvodu, že běžná intenzitní sonda je schopna měřit složku akustické intenzity pouze v jednom směru a v případě měření výkonu je zvolena právě

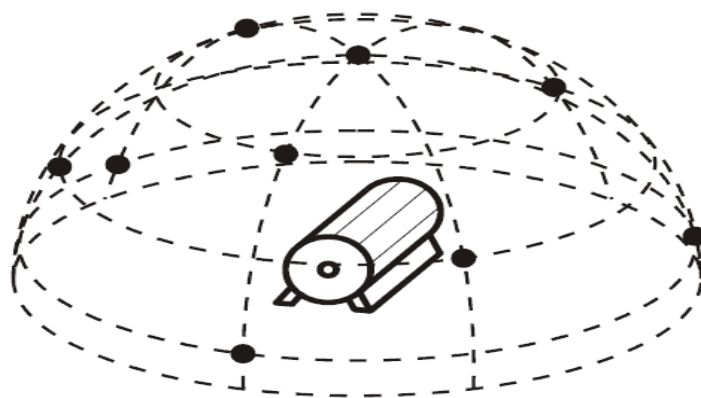
normálová složka vzhledem k měřicí ploše.

Kolem měřeného zdroje se volí vhodná měřicí plocha, kde mezi nejčastěji používané povrchy, patří kvádry či krychle viz Obr. 3-5. Důvodem je, že pro tyto povrchy lze snadno definovat a jednoduše určit průměrnou hodnotu kolmé složky intenzity. Výsledný celkový výkon je udáván jako součet jednotlivých částí výkonu z každé stěny krabice.



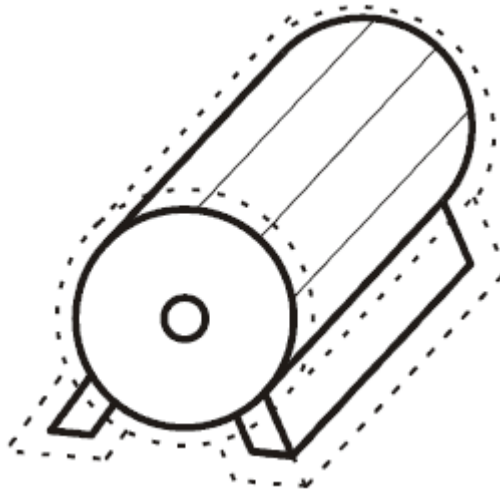
Obr. 3-5: Měřicí povrch - Kvádr

Mezi další velmi často používaný měřicí povrch patří polokoule, kde všechny měřicí body jsou ve stejné vzdálenosti od středu měřeného zdroje zvuku (viz Obr. 3-6). Pokud zdroj zvuku vyzařuje svůj akustický výkon do všech směrů přibližně stejně, pak se vyznačuje ve volném zvukovém poli konstantní akustickou intenzitou na povrchu polokoule. V případě, že dochází k velkým změnám hodnot intenzity, je třeba zvýšit počet měřících míst, pro zvýšení přesnosti měření.



Obr. 3-6: Měřicí povrch – Polokoule

Jednou z možností je také zvolit konformní měřící povrch (Obr. 3-7), který umožňuje měření akustické intenzity v těsné blízkosti zdroje akustického výkonu. Tento typ povrchu je volen zejména při měření s vysokou hladinou hluku pozadí.



Obr. 3-7: Měřící povrch - Konformní

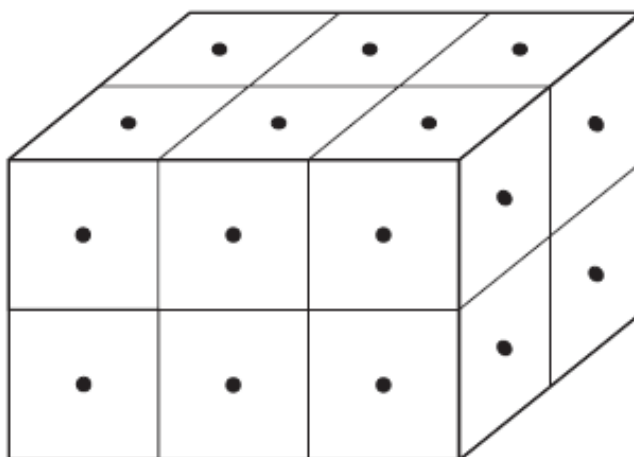
Metoda měření v bodech

Při této metodě měření je nutné měřící plochu rozdělit na jednotlivé části a v jejich středu měřit intenzitu. Plošný integrál ze vztahu (3.15) je zde nahrazen sumou

$$W \approx \sum_{i=1}^N I_{ni} \cdot S_i \quad (3.16)$$

kde I_{ni} je normálová intenzita měřená intenzitní sondou uprostřed elementu plochy S_i a N je počet elementů, na které je měřící plocha rozdělena [5].

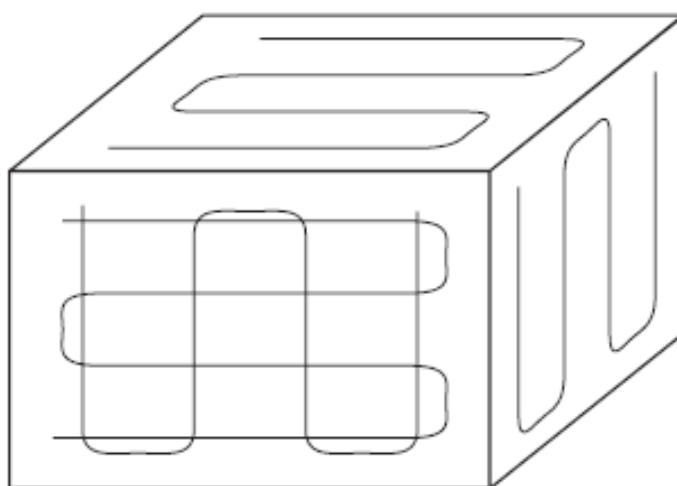
Na Obr. 3-8 je zobrazena rozdělená měřící plocha s vyznačenými měřícími body. Jednotlivé měřící body mohou být určeny pevnou mříží s napnutými strunami nebo dráty, nebo se stanovují jednoduše pomocí metru [2].



Obr. 3-8: Aproximace plošného integrálu při měření akustického výkonu pomocí intenzity v bodech. Převzato z [5].

Metoda měření skenováním

Tato metoda je založena na prostorovém průměrování kolmé složky měřené intenzity, které se provádí spojitým pohybem sondy po dráze umístěné na měřící ploše, která obklopuje zdroj zvuku. Pro rovnoměrné pokrytí měřícími dráhami se volí měřící plochy složené z čtvercových nebo obdélníkových ploch. Nejčastěji používané dráhy pohybu sondy po měřící ploše při metodě skenování jsou zobrazeny na Obr. 3-9. Skenování je možné provádět buď ručně, nebo pomocí speciálního mechanického systému, který zajišťuje plynulý pohyb sondy.



Obr. 3-9: Aproximace plošného integrálu při měření akustického výkonu pomocí intenzity metodou skenování. Převzato z [5].

V případě stacionárního zvukového pole lze vztah (3.15) vyjádřit tímto integrálem:

$$W = b \int_l I_n dl \quad (3.17)$$

kde b je šířka pásu odpovídající dráze l ($dS \approx b \cdot dl$), po které se pohybuje sonda. Měřicí plocha S se tedy rozdělí na jednotlivé pásy s konstantní šířkou a v případě, že bude konstantní i rychlost pohybu sondy lze vztah (3.17) dále upravit na tvar:

$$W = b \int_0^L I_n dl = b \int_0^T I_n(l) \frac{dl}{dt} dt = S \frac{1}{T} \int_0^T I_n(t) dt \quad (3.18)$$

kde $I_n(t)$ je normálová složka akustické intenzity, která je funkcí času díky pohybu sondy prostorem [1].

4 Normativní dokumenty zabývající se problematikou měření akustického výkonu

Pokud jsou prováděna akustická měření, je třeba postupovat na základě mezinárodních norem, protože jedině tak lze dosáhnout správných a vzájemně porovnatelných výsledků těchto měření. Norem, které se zabývají měřením akustického výkonu, je celá řada a je nezbytné zvolit nejvhodnější metodu pro dané podmínky a účel zkoušky. Vhodná norma se vybírá podle prostředí, ve kterém je dané měření prováděno a podle požadavku na třídu přesnosti. Základní normou, ve které je uveden přehled jednotlivých norem pro jednotlivé případy, v závislosti na rozměrech a přemístitelnosti zkoušeného zdroje, jeho časové stálosti a především na prostředí, ve kterém se měří je norma: ČSN EN ISO 3740 Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku - Směrnice pro užití základních norem. Dále se jednotlivé třídy norem dělí podle toho, zda se hladina akustického výkonu určuje pomocí akustického tlaku nebo intenzity.

Normy určující hladinu akustického výkonu na základě akustického tlaku:

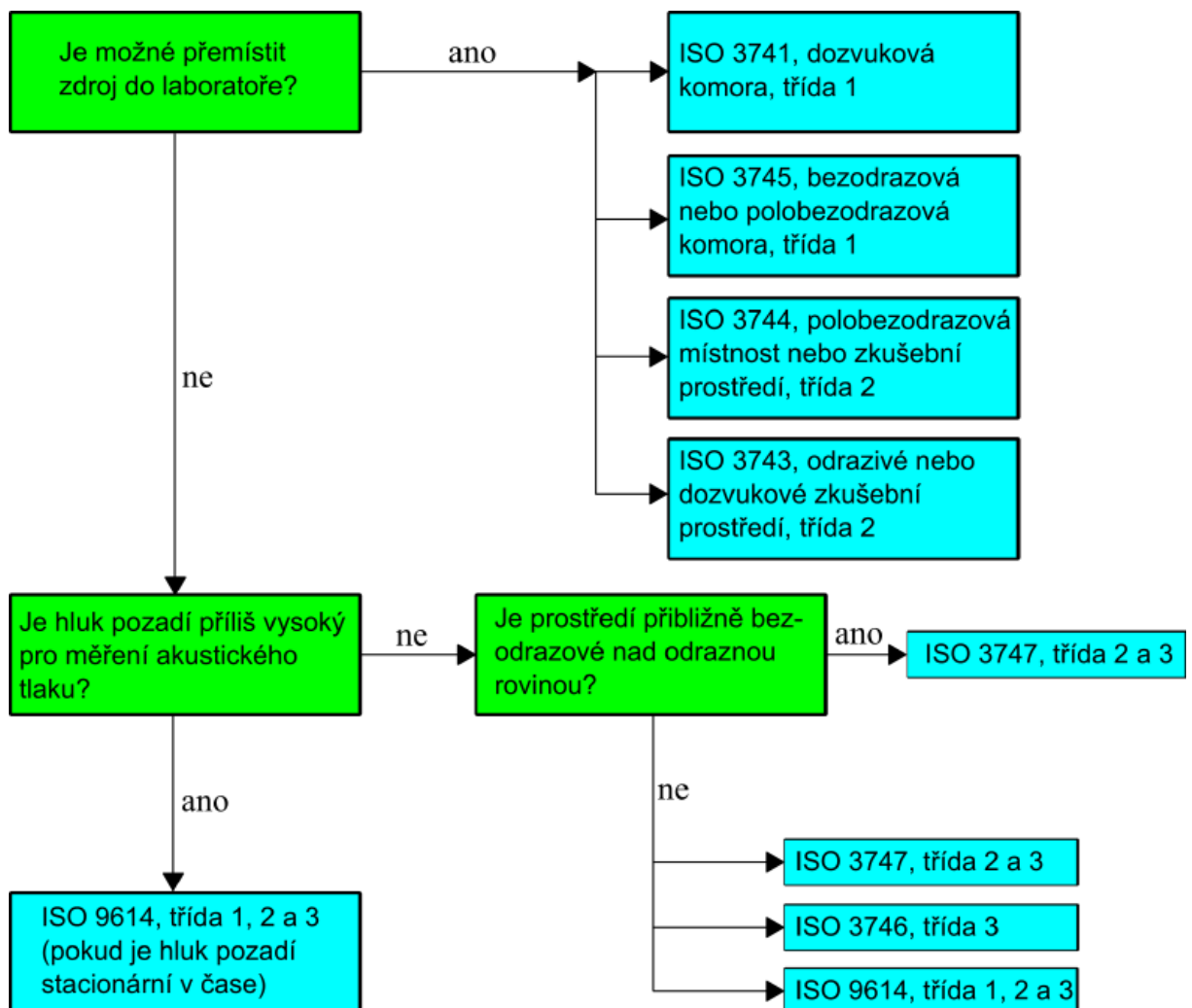
- **ČSN EN ISO 3741** Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro dozvukové zkušební místnosti
- **ČSN EN ISO 3743-1** Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Technické metody pro malé přemístitelné zdroje v dozvukovém poli - Část 1: Srovnávací metoda pro zkušební místnosti s tuhými stěnami
- **ČSN EN ISO 3743-2** Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Technické metody pro malé přemístitelné zdroje v dozvukovém poli - Část 2: Metody pro speciální dozvukové zkušební místnosti
- **ČSN EN ISO 3744** Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Technická metoda pro přibližně volné pole nad odrazivou rovinou
- **ČSN EN ISO 3745** Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti

- **ČSN EN ISO 3746** Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Provozní metoda s měřicí obalovou plochou nad odrazivou rovinou
- **ČSN EN ISO 3747** Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Technické/provozní metody pro použití in situ v dozvukovém prostředí

Normy určující hladinu akustického výkonu na základě akustické intenzity:

- **ČSN EN ISO 9614-1** Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity - Část 1: Měření v bodech
- **ČSN ISO 9614-2** Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity - Část 2 : Měření skenováním
- **ČSN EN ISO 9614-3** Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity - Část 3: Přesná metoda měření skenováním

Vhodnou normu pro určitý druh měření lze vybrat na základě následujícího schématu:



Obr. 4-1: Volba vhodné měřící metody pro stanovení akustického výkonu [5].

5 Měření akustického výkonu na modelové situaci

Akustický výkon byl změřen pomocí tří různých metod, kterými jsou:

- Metoda založená na měření akustického tlaku
- Metoda založená na měření akustické intenzity v bodech
- Metoda založená na měření akustické intenzity skenováním

Měření bylo prováděno podle platných norem, které jsou uvedeny v normativních dokumentech zabývajících se problematikou měření akustického výkonu (viz výše). Všechna měření se prováděna ve volném poli, které bylo simulováno bezodrazovou komorou na fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Měření se provádělo pomocí multianalizátoru PULSE typ 3560 C od firmy Brüel&Kjær, který se skládá ze dvou modulů. Prvním z nich je LAN interface a druhým je Input/Output Module, který obsahuje 4 vstupní a dva výstupní kanály. Jednotlivá měření byla zpracována 1/3 oktávovou CPB analýzou prostřednictvím programu PULSE Labshop na počítači, který je s analyzátozem propojen.

Volba modelové situace

Jako zkoušený zdroj zvuku pro proměření všech tří metod se zvolil reproduktor o průměru 25 cm, který byl umístěn v dřevěné ozvučnici. Tento zdroj zvuku byl položen reproduktorem vzhůru na otočný podstavec, jehož otáčením vždy o určitý úhel se docílilo celkové požadované měřicí plochy. Jako zkušební signál, který z reproduktoru vycházel, byl zvolen bílý šum. Měření pro všechny tři metody bylo prováděno ve frekvenčním pásmu od 1 kHz do 5 kHz.

5.1 Měření hladiny akustického výkonu pomocí akustického tlaku

Toto měření bylo provedeno na základě platné normy ČSN EN ISO 3745. Jako měřicí plocha, která obklopuje měřený zdroj zvuku, se pro toto měření zvolila polokoule. Poloměr této polokoule byl stanoven na základě rozměru měřeného zdroje zvuku a podle požadavků uvedených v normě. Norma říká, že poloměr zkušební koule musí být roven, nebo větší než každý z následujících:

- dvojnásobek největšího rozměru zdroje
- $\lambda/4$ nejnižší sledované frekvence

- 1 m

V souladu s těmito podmínkami byl poloměr zkušební polokoule stanoven na 1 m. K získání hladiny akustického tlaku na ploše zkušební polokoule bylo dle normy použito 20 pevných poloh měřících mikrofonů, přičemž souřadnice jednotlivých měřících bodů jsou normou přesně stanoveny (viz Tabulka 5-1).

Číslo	x/r	y/r	z/r
1	-1	0	0,025
2	0,5	-0,86	0,075
3	0,5	0,86	0,125
4	-0,49	0,85	0,175
5	-0,49	-0,84	0,225
6	0,96	0	0,275
7	0,47	0,82	0,325
8	-0,93	0	0,375
9	0,45	-0,78	0,425
10	0,88	0	0,475
11	-0,43	0,74	0,525
12	-0,41	-0,71	0,575
13	0,39	-0,68	0,625
14	0,37	0,64	0,675
15	-0,69	0	0,725
16	-0,32	-0,55	0,775
17	0,57	0	0,825
18	-0,24	0,42	0,875
19	-0,38	0	0,925
20	0,11	-0,19	0,975

Tab. 5-1: Jednotlivé polohy měřících mikrofonů [13]

K měření akustického tlaku se používaly ½" mikrofony pro volné pole od značky Brüel&Kjær typ 4190-C s předzesilovači typu 2669-C (viz Obr. 5-1). Vzhledem k tomu, že k dispozici byly v laboratoři pouze čtyři měřící mikrofony, byl třeba vymyslet systém, kterým by se dalo naměřit všech 20 bodů s dostatečnou přesností. Na základě tohoto požadavku byl navrhnout měřící přípravek, který umožnil nastavit jednotlivé mikrofony do definovaných poloh.

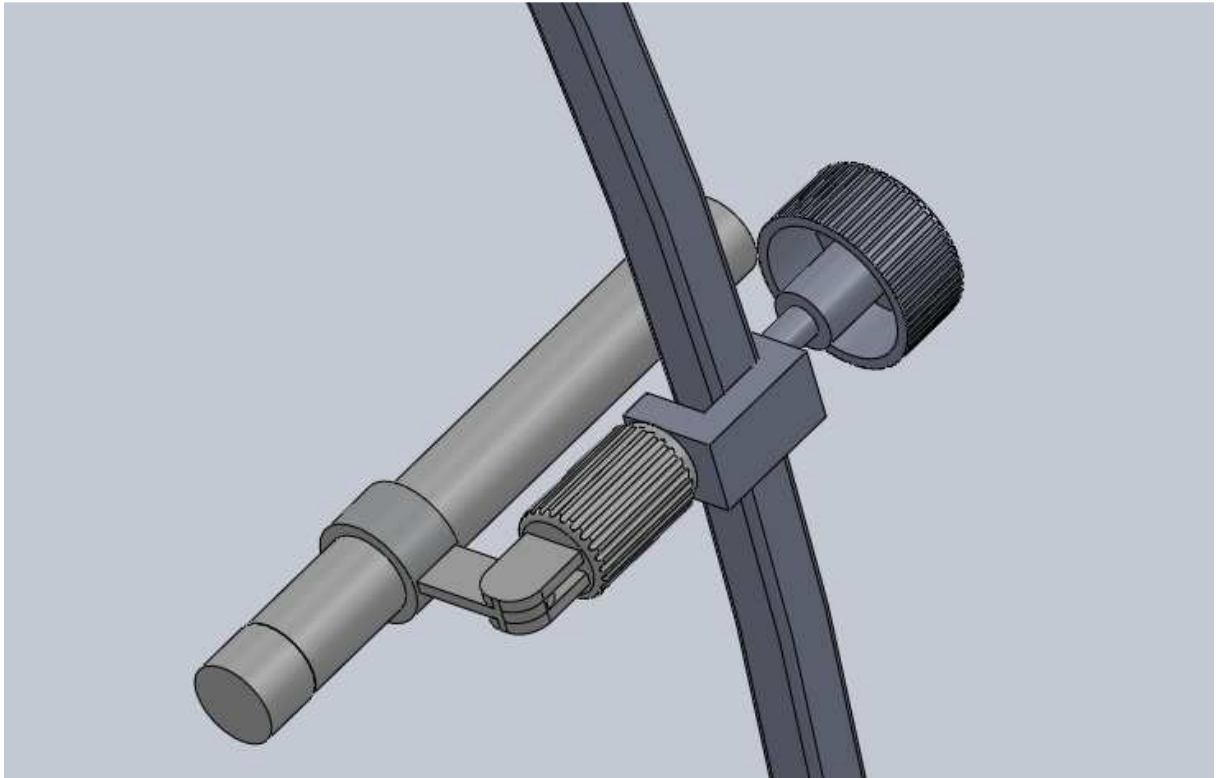


Obr. 5-1 Měřicí mikrofon typ 4190-C s předzesilovačem typu 2669-C. Převzato z [12].

Měřicí přípravek byl vymodelován v návrhovém CAD programu SolidWorks, ze kterého se poté vygenerovaly technické výkresy nezbytné pro výrobu přípravku. Na Obr. 5-2 je vidět vymodelovaná konstrukce pro pojezd měřících mikrofonů. Tento oblouk byl vyroben z hranového profilu o rozměrech 15 x 15 mm. Poloměr ohybu byl stanoven podle požadavku měřící polokoule. Na obrázku Obr. 5-3 je zobrazen detail navrhnutého uchycení měřícího mikrofonu.



Obr. 5-2. Základní konstrukce měřícího přípravku



Obr. 5-3: Detail uchycení měřícího mikrofону

Podle souřadnic měřících bodů uvedených v tabulce 5-1, byl vypočítán úhel 60° , o který musel být zdroj zvuku vždy natočen, aby se ve výsledku docílilo celé plochy polokoule. Ke zlepšení orientace v polohách měřících bodů bylo využíváno grafické znázornění uvedené v normě ČSN EN ISO 3745 (viz příloha 1).

5.1.1 Průběh samotného měření

Nejprve bylo nutné provést přípravu samotného měřícího prostředí. Z bezodrazové komory se odstranily všechny předměty, které by mohly způsobovat odrazy zvuku a znehodnotit tak výsledky prováděného měření. Měřící přípravek byl zavěšen ke stropu pomocí ocelových lanek a následně ustaven do přesné polohy vůči zdroji zvuku. Situace umístění měřeného zdroje zvuku a měřícího přípravku s upevněnými měřícími mikrofony je zobrazena na Obr. 5-4.



Obr. 5-4: Situace umístění měřeného zdroje zvuku a měřícího přípravku

V PULSE byla nastavena citlivost všech měřících mikrofonů na hodnotu 707,1mV. Pro měření se nastavila doba průměrování 32 s. Poté byla provedena kalibrace akustickým kalibrátorem všech měřících mikrofonů. Kalibrační data z jednotlivých mikrofonů se zaznamenala a na jejich základě se po měření upravily výsledky naměřených hodnot. Dále se ověřovaly atmosférické podmínky, podle kterých se ve vyhodnocení měření počítaly korekční hodnoty.

- Teplota - 20,3°
- Tlak - 975 hPa

Následně se provedlo první nastavení poloh mikrofonů na měřícím přípravku podle souřadnic uvedených v tabulce 5-1 a změřil se akustický tlak hluku pozadí při vypnutém zdroji zvuku. Výsledky naměřených hodnot hlukového pozadí jsou vyobrazeny v tabulce 5-2. Vzhledem k tomu, že hladina hluku pozadí byla ve všech pásmech sledovaného frekvenčního rozsahu a ve všech polohách mikrofonů o více než 20dB nižší než při provozu zdroje zvuku, nebylo

třeba provádět korekci na hluk pozadí.

f [Hz]	Pozadí [dB]
1000	1,34
1250	1,92
1600	2,94
2000	3,53
2500	4,36
3150	5,22
4000	5,65
5000	6,23

Tab. 5-2: Naměřené hladiny akustického tlaku hluku pozadí

Zdroj zvuku byl v průběhu měření natáčen celkem 6x aby se docílilo celé plochy polokoule a v každé poloze natočení se prováděla 3 měření. Po změření všech poloh mikrofonu se provedl výpočet průměrné hodnoty akustického tlaku na měřící ploše podle vzorce:

$$\overline{L_{pf}} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}} \right] [dB] \quad (5.1)$$

kde

$\overline{L_{pf}}$ [dB] je hladina akustického tlaku na ploše polokoule

L_{pi} [dB] je hladina akustického tlaku odečtená v i-té poloze mikrofonu

N je počet poloh mikrofonů

[13]

Nakonec se provedl výpočet celkové hladiny akustického výkonu měřeného zdroje zvuku s korekcemi na meteorologické podmínky podle vztahu:

$$L_W = \overline{L_{pf}} + 10 \log \left(\frac{S_1}{S_0} \right) + C_1 + C_2 [dB] \quad (5.2)$$

kde

$$C_1 = -10 \log \left[\frac{B}{B_0} \sqrt{\left(\frac{313.15}{273.15 + \theta} \right)} \right] dB \quad (5.3)$$

$$C_2 = -15 \log \left[\frac{B}{B_0} \left(\frac{296.15}{273.15 + \theta} \right) \right] \text{ [dB]} \quad (5.4)$$

kde

$S_1 = 2\pi r^2$, je plocha povrchu zkušební polokoule s poloměrem r

$S_0 = 1 \text{ m}^2$, je referenční plocha

B [Pa] atmosférický tlak v průběhu měření

B_0 referenční atmosférický tlak ($B_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$)

θ [°C] teplota vzduchu během měření

[13]

V tabulce 5-3 jsou zobrazeny výsledné vypočtené hodnoty hladiny akustického výkonu v třetinooktávovém pásmu měřeného zdroje zvuku pro všechna 3 měření. Pro každé měření je vždy uvedena hladina akustického tlaku před a po zvážení váhovací křivkou A.

f [Hz]	L_{w1} [dB]	L_{wA1} [dB]	L_{w2} [dB]	L_{wA2} [dB]	L_{w3} [dB]	L_{wA3} [dB]
1000	86,02	86,02	86,02	86,02	86,02	86,02
1250	82,81	83,41	82,76	83,36	82,74	83,34
1600	83,87	84,87	83,87	84,87	83,84	84,84
2000	85,27	86,47	85,25	86,45	85,24	86,44
2500	84,02	85,32	84,01	85,31	84,00	85,30
3150	82,92	84,12	82,92	84,12	82,91	84,11
4000	81,97	82,97	81,97	82,97	81,95	82,95
5000	78,19	78,69	78,19	78,69	78,18	78,68

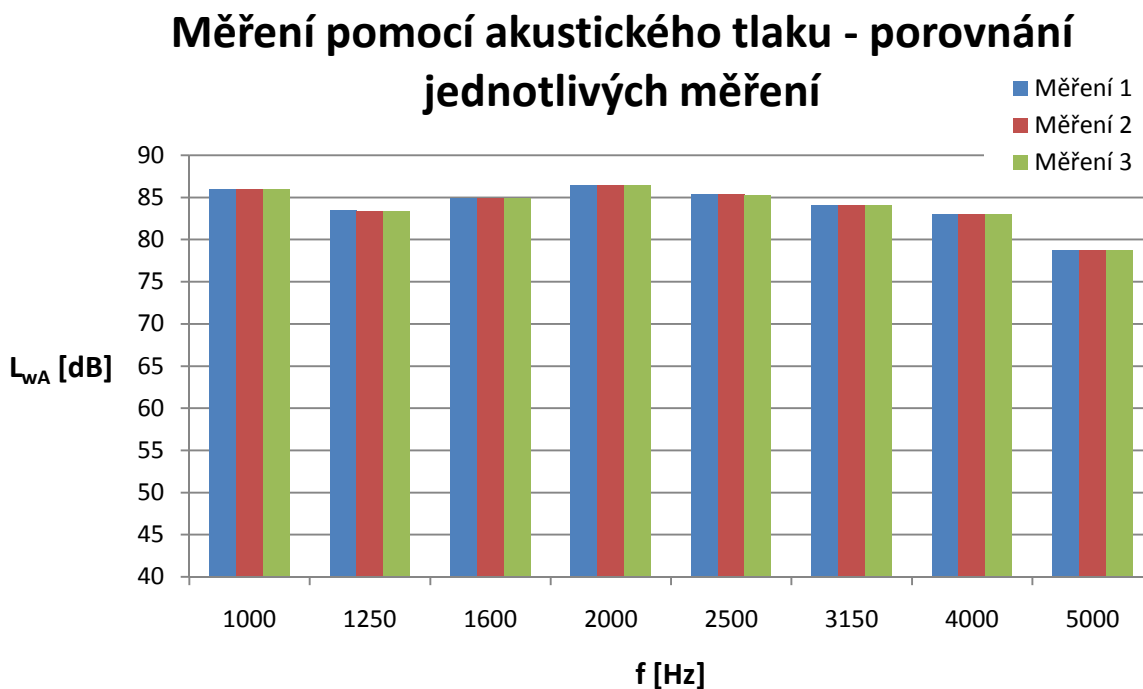
Tab. 5-3: Výsledné hladiny akustického výkonu v třetinooktávových pásmech

Celková hladina akustického výkonu A pro všechna 3 měření je zobrazena v tabulce 5-4.

	L_{wA} [dB]
Měření 1	93,50
Měření 2	93,49
Měření 3	93,48

Tab. 5-4: Celková hladina akustického výkonu A

Z vypočtených hodnot v tabulce 5-3 a grafu na Obr. 5-5 je patrné, že naměřené hodnoty hladiny akustického výkonu A, metodou pomocí měření akustického tlaku, se pro jednotlivá měření téměř shodují ve všech třetinooktávových pásmech.



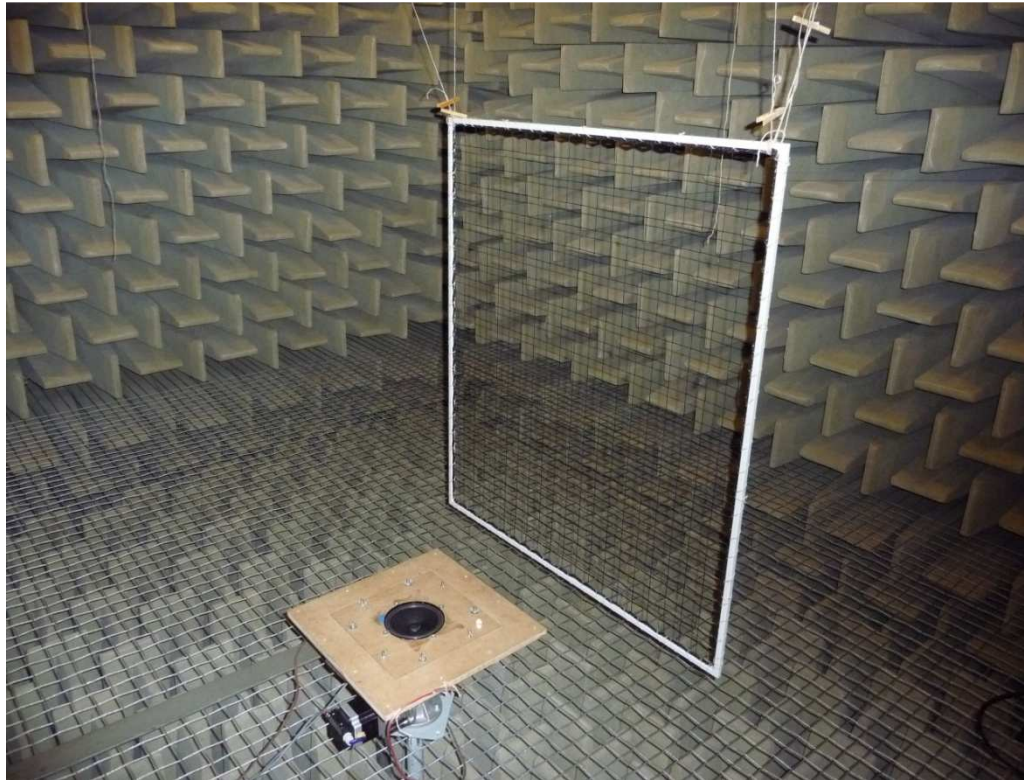
Obr. 5-5: Výsledné naměřené hodnoty při měření hladiny akustického výkonu pomocí akustického tlaku

5.2 Měření hladiny akustického výkonu pomocí akustické intenzity v bodech

Toto měření bylo provedeno na základě platné normy ČSN ISO 9614-1. Jako měřicí plocha, která obklopuje měřený zdroj zvuku, byla pro toto měření zvolena krychle, z důvodu snadné realizace rozmístění jednotlivých měřících bodů na měřicí ploše. V normě je podmínka, že průměrná vzdálenost mezi měřicí plochou a povrchem zkoušeného zdroje musí být větší než 0,5 m. Na základě rozměru zkoušeného zdroje zvuku a podle požadavku uvedeného v normě, byla velikost této krychle stanovena na 1 m². Tato plocha byla dále rozdělena na 5 dílčích ploch, přičemž na každé dílčí ploše se rovnoměrně rozmístilo 16 měřících bodů. Pro rozdělení dílčí měřicí plochy na 16 jednotlivých segmentů se použila pomocná síť s oky o rozměrech 5x5 cm, která byla napnuta na ocelovou konstrukci.

5.2.1 Průběh samotného měření

Nejprve se opět provedla příprava samotného měřicího prostředí. Pomocná konstrukce s měřicí sítí byla opět zavěšena ke stropu pomocí ocelových lanek a následně ustavena do přesné polohy vůči zdroji zvuku. Situace zavěšení pomocné ocelové konstrukce a umístění zdroje zvuku je zobrazena na Obr. 5-6.



Obr. 5-6: Situace zavěšení pomocné ocelové konstrukce a umístění zdroje zvuku

Pro měření se využívala intenzitní sonda od značky Brüel&Kjær typ 2683 (viz Obr. 2-3). Vzhledem k frekvenčnímu rozsahu měření, které se provádělo od 1kHz do 5kHz, se v intenzitní sondě zvolila 12 mm rozpěrka. Pro měření byla v PULSE nastavena doba průměrování 16 s. Poté se změřila teplota a na barometru se odečetl aktuální atmosférický tlak v místnosti.

- Teplota - 22,3°C
- Tlak - 972hPa

Na základě těchto hodnot byla provedena kalibrace intenzitní sondy intenzitním kalibrátorem od značky Brüel&Kjær typu 4297. Z kalibrace se zaznamenaly hodnoty indexu zbytkové intenzity, které se poté využívaly pro část vyhodnocení prováděného měření.

Dále se provedl test akustické sondy následujícím způsobem: Sonda byla umístěna na měřící ploše do zvoleného bodu a změřila se hladina normálové složky akustické intenzity. Pak se sonda otočila o 180° a opět se změřila hladina normálové složky akustické intenzity. Rozdíl mezi hladinami akustické intenzity musel být dle normy pro všechna třetinookávová pásma menší než 1,5 dB. Tato podmínka byla splněna a mohlo se začít s měřením.

Nejprve bylo třeba ověřit, zda je zvukové pole stacionární. To se provedlo změřením normálové složky akustické intenzity ve vybraném bodě na měřicí ploše. Měření se v tomto bodě provedlo celkem 9 x a z naměřených hodnot se vypočítal indikátor variability zvukového pole v čase F_1 dle vzorce:

$$F_1 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - \bar{I}_n)^2} \quad (5.5)$$

kde

\bar{I}_n je střední hodnota z 9 naměřených hodnot I_n

[14]

Podmínka stanovená v normě byla, aby výsledek indikátoru byl $\leq 0,6$ pro všechna uvažovaná kmitočtová pásma. Z tabulky 5-5 je vidět, že tato podmínka byla splněna a mohlo se tak přistoupit k měření jednotlivých bodů na měřicí ploše.

f [Hz]	F_1
1000	0,02
1250	0,01
1600	0,01
2000	0,01
2500	0,01
3150	0,02
4000	0,01
5000	0,01

Tab. 5-5: Výpočet indikátoru variability zvukového pole F_1

Zdroj zvuku byl vždy natočen o 90° a změřilo se všech 16 bodů na dané dílčí ploše. V každém bodě se měřila jak normálová složka akustické intenzity, tak akustický tlak což sonda umožňuje z principu její funkce současně. Pro změření poslední dílčí plochy se musela pomocná konstrukce s měřicí sítí umístit nad zdroj zvuku. Na každé z 5 ploch se vždy prováděla dvě měření. Z naměřených hodnot se vypočítaly indikátory zvukového pole F_2 , F_3 a F_4 pro všechna změřená kmitočtová pásma a všechny dílčí plochy. Indikátor akustický tlak-akustická intenzita F_2 sloužil pro kontrolu, zda je použitá intenzitní sonda vhodná pro dané měření a byl vypočten ze vztahu (5.6).

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|} \quad (5.6)$$

kde

$\overline{L_p}$ střední hladina akustického tlaku na měřicí ploše

$\overline{L_{|I_n|}}$ střední hladina akustické intenzity na měřicí ploše

[14]

Tento indikátor byl porovnán s indexem dynamické schopnosti měřícího přístroje L_d , který byl vypočítán na základě indexu zbytkové intenzity zaznamenané při kalibraci akustické sondy podle následujícího vztahu:

$$L_d = \delta_{p10} - K \quad (5.7)$$

Kde K je korekce na zbytkovou intenzitu určená podle požadované třídy přesnosti. Pro třídu přesnosti 1 a 2 je tato korekce normou stanovena na 10dB. Norma říká, že index dynamické schopnosti L_d musí být větší než indikátor F_2 pro každé kmitočtové pásmo. Z tabulky 5-6 a tabulky 5-7 je patrné, že tato podmínka byla splněna pro všechny měřicí plochy.

f[Hz]	L_d [dB]
1000	6,37
1250	7,31
1600	7,64
2000	8,33
2500	7,97
3150	7,89
4000	7,51
5000	7,11

Tab. 5-6: Hodnoty indexu dynamické schopnosti pro třídu přesnosti 1

f [Hz]	Plocha1	Plocha2	Plocha3	Plocha4	Plocha5
1000	3,00	3,13	3,16	3,13	2,66
1250	3,25	3,09	2,99	3,14	2,38
1600	3,14	3,15	3,05	3,25	1,91
2000	3,39	3,22	3,17	3,34	1,82
2500	3,39	3,29	3,28	3,40	1,38
3150	3,46	3,13	3,05	3,34	1,69
4000	3,30	3,03	2,97	3,10	2,27
5000	3,70	3,67	3,75	3,68	2,90

Tab. 5-7: Vypočítané hodnoty indikátoru akustický tlak - akustická intenzita na měřicí ploše

Jako další se uvažoval indikátor záporného dílčího akustického výkonu F_3 , který se vypočítal podle vztahu (5.6) s tím rozdílem, že střední hladina normálové složky akustické intenzity

byla uvažovaná včetně znaménka podle směru šíření zvuku. Rozdíl indikátorů F_3 a F_2 musel být dle normy ≤ 3 dB. Vzhledem k tomu, že měření bylo prováděno v bezodrazové komoře, kde nebyly žádné významné zdroje vnějších zvuků, které by způsobovaly záporný dílčí akustický výkon, byla tato podmínka splněna. Jako poslední se vyhodnotil indikátor nerovnoměrnosti zvukového pole F_4 , díky kterému bylo zjištěno, zda je na měřicí ploše dostatečný počet měřících bodů pro splnění požadované třídy přesnosti. Tento indikátor byl vypočten na základě následujícího vztahu:

$$F_4 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{ni} - \bar{I}_n)^2} \quad (5.8)$$

kde

\bar{I}_n je střední hodnota normálové složky

[14]

Kontrola přiměřeného počtu měřících míst se vyhodnocovala podle následujícího kritéria, které je normou určeno: $N > CF_4^2$, kde N znamená počet měřících míst a C je činitel, který se stanovil na základě požadované třídy přesnosti.

f [Hz]	CF_4^2									
	Plocha 1		Plocha 2		Plocha 3		Plocha 4		Plocha 5	
	třída 1	třída 2	třída 1	třída 2	třída 1	třída 2	třída 1	třída 2	třída 1	třída 2
1000	21,05	10,71	18,02	9,17	18,40	9,36	22,23	11,31	1,63	0,83
1250	15,36	7,81	14,95	7,61	15,95	8,12	15,56	7,92	0,38	0,19
1600	16,27	8,28	13,60	6,92	15,25	7,76	13,94	7,09	3,43	1,74
2000	17,66	8,99	16,10	8,19	14,20	7,22	15,68	7,98	6,30	3,20
2500	8,99	4,58	8,66	4,41	6,21	3,16	5,72	2,91	3,39	1,72
3150	6,82	3,47	7,87	4,00	9,52	4,85	9,54	4,85	6,14	3,12
4000	5,96	3,03	43,26	22,01	28,17	14,33	10,25	5,21	13,76	7,00
5000	9,75	4,96	15,86	8,07	9,13	4,64	6,30	3,20	7,17	3,65

Tab. 5-8: Vypočítané hodnoty pro zhodnocení zda byl použit dostatečný počet měřících míst

Z Tab. 5-8 je patrné, že při počtu 16 ti měřících bodů je kritérium pro třídu přesnosti 1 splněno pouze pro měřicí plochu 5 a na ostatních plochách přesahuje povolenou mez. Pro všechny měřicí plochy však byla splněna třída přesnosti 2 ve všech kmitočtových pásmech.

Po zhodnocení všech indikátorů zvukového pole se provedl výpočet dílčích akustických výkonů pro každou část měřicí plochy a celkový výpočet akustického výkonu

podle rovnice (3.16). Výsledná hladina akustického výkonu zdroje zvuku byla stanovena podle vztahu (1.7). V tabulce 5-9 jsou zobrazeny výsledné vypočtené hladiny akustického výkonu v třetinooktávovém pásmu měřeného zdroje zvuku pro obě prováděná měření. Pro každé měření je vždy uvedena hladina akustického tlaku před a po zvážení váhovací křivkou A. Celková hladina akustického výkonu A pro obě měření je zobrazena v tabulce 5-10.

f [Hz]	Měření 1		Měření 2	
	L_{w1} [dB]	L_{WA1} [dB]	L_{w2} [dB]	L_{WA2} [dB]
1000	84,00	84,00	83,88	83,88
1250	80,81	81,41	80,71	81,31
1600	81,75	82,75	81,68	82,68
2000	82,54	83,74	82,47	83,67
2500	81,37	82,67	81,29	82,59
3150	80,19	81,39	80,07	81,27
4000	79,31	80,31	79,24	80,24
5000	75,04	75,54	74,98	75,48

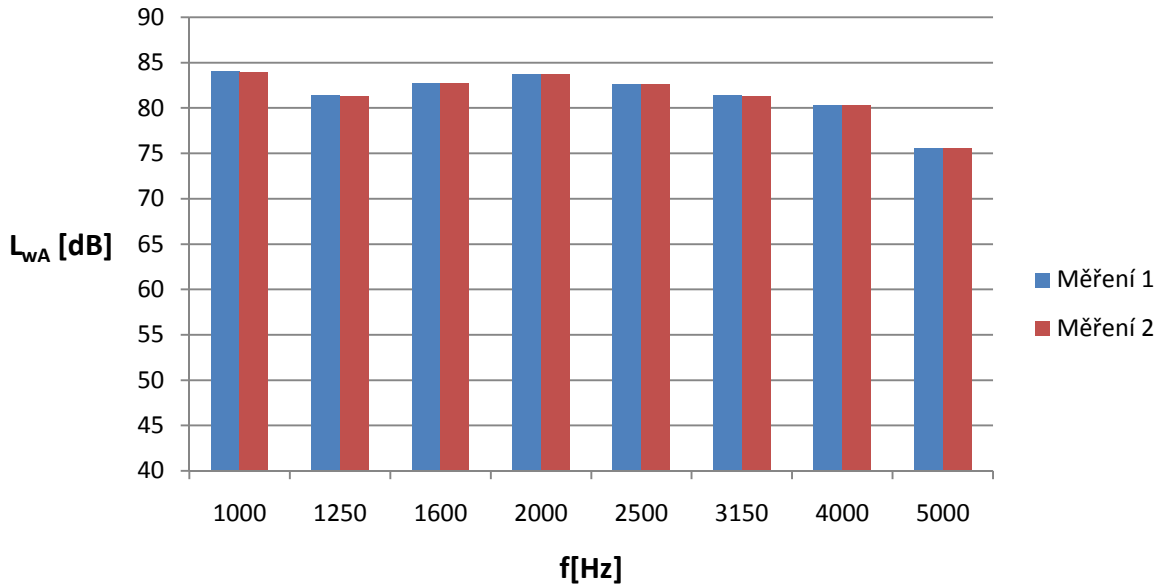
Tab. 5-9: Výsledné hladiny akustického výkonu

	L_{WA} [dB]
Měření 1	91,07
Měření 2	90,99

Tab. 5-10: Celková hladina akustického výkonu A

Z vypočtených hodnot v tabulce 5-9 a grafu na Obr. 5-7 je patrné, že naměřené hodnoty hladiny akustického výkonu A, metodou měření akustické intenzity v bodech, se pro jednotlivá měření téměř shodují ve všech třetinooktávových pásmech. Některé nepřesnosti mohly být způsobeny z důvodu, že intenzitní sonda byla v jednotlivých měřících bodech držena v ruce a nebylo tak možné zajistit dostatečnou stabilitu sondy.

Měření v bodech - porovnání jednotlivých měření



Obr. 5-7: Výsledné naměřené hodnoty při měření hladiny akustického výkonu pomocí akustické intenzity v bodech

5.3 Měření hladiny akustického výkonu pomocí akustické intenzity – metodou skenování

Toto měření bylo provedeno na základě platné normy ČSN ISO 9614-2. Jako měřicí plocha byla zvolena opět krychle se stejnými rozměry a stejným umístěním jako při měření v bodech (viz Obr. 5-6). Skenování se provádělo ručně ve dvou na sebe kolmých drahách zobrazených na Obr. 3-9. Díky pomocné síti napnuté na ocelové konstrukci, byla skenovací dráha navržena tak, aby stejnoměrně pokryla dílčí měřicí plochu. Vzhledem k tomu, že u metody skenování se měřená data ukládala do multibufferu PULSE, bylo třeba navrhnout jeho velikost. Tato velikost se stanovila podle celkového času jedné skenovací dráhy. Vycházelo se z celkové vzdálenosti ujeté sondou na měřicí ploše, která byla spočítána na 10,9 m a rychlosti pohybu sondy, kde se předpokládala rychlost 0,2 m/s. Z těchto hodnot se vypočítala doba pohybu sondy 54,5 s. Doba průměrování byla pro toto měření zvolena 1/1024 s a do multibufferu se ukládalo každých 50 ms. Výsledná velikost multibufferu se stanovila s rezervou na 2500 vzorků, protože se předpokládalo s tím, že se nedokáže dodržet konstantní rychlost sondy a tak může trvat skenování delší čas.

5.3.1 Průběh samotného měření

Pro měření se využívala stejná intenzitní sonda jako při měření v bodech. Nejprve se změřila aktuální teplota a tlak v místnosti.

- Teplota – 20,3 °C
- Tlak – 969 hPa

Na základě těchto hodnot byla opět provedena kalibrace intenzitní sondy stejným kalibrátorem jako u měření v bodech. Z kalibrace se opět zaznamenaly hodnoty indexu zbytkové intenzity, které byly nezbytné pro část vyhodnocení měření. Poté se začaly proměřovat jednotlivé dílčí měřící plochy, stejným způsobem natáčení zdroje, jako při měření v bodech. Nejprve se provádělo měření v horizontálním a poté ve vertikálním směru, přičemž byla opět měřena jak hladina akustického tlaku, tak normálová složka akustické intenzity. Po změření všech pěti ploch se začaly vyhodnocovat indikátory zvukového pole F_{pl} a $F_{+/-}$ pro všechna kmitočtová pásma a všechny dílčí plochy. Indikátor akustický tlak – akustická intenzita F_{pl} sloužil opět pro kontrolu, zda je použitá intenzitní sonda vhodná pro dané měření. Vzhledem ke stejným obsahům dílčích ploch je dle normy indikátor F_{pl} ekvivalentní s indikátorem $F3$ pro měření v bodech a jeho vyhodnocení se tedy provedlo stejným způsobem. Index dynamické schopnosti L_d byl vypočítán podle vztahu (5.7), kde korekce na zbytkovou intenzitu byla pro třídu přesnosti 2 10dB. V normě je uvedeno, že index dynamické schopnosti musí být větší než indikátor F_{pl} pro každé kmitočtové pásmo. Z tabulky 5-11 a tabulky 5-12 je patrné, že tato podmínka byla splněna pro všechny měřící plochy.

f[Hz]	L_d [dB]
1000	6,44
1250	7,09
1600	7,82
2000	7,72
2500	7,76
3150	7,71
4000	7,26
5000	6,82

Tab. 5-11: Hodnoty indexu dynamické schopnosti pro třídu přesnosti 2

f [Hz]	F_{pl}				
	Plocha1	Plocha2	Plocha3	Plocha4	Plocha5
1000	3,44	3,44	3,28	3,36	2,03
1250	3,32	3,30	3,20	3,22	2,10
1600	3,40	3,41	3,24	3,34	1,97
2000	3,25	3,23	3,13	3,21	1,81
2500	3,04	2,89	2,93	2,99	1,42
3150	3,16	2,96	2,67	3,11	1,64
4000	3,56	3,28	3,58	3,41	2,27
5000	4,51	4,36	4,28	4,50	3,03

Tab. 5-12: Vypočítané hodnoty indikátoru akustický tlak - akustická intenzita na měřící ploše

Jako další se uvažoval indikátor záporného dílčího akustického výkonu $F_{+/-}$, který se vypočítal podle vztahu:

$$F_{+/-} = 10 \log \left[\frac{\sum |P_i|}{\sum P_i} \right] \text{ dB} \quad (5.9)$$

kde

P_i je dílčí akustický výkon

[15]

Vypočtená velikost indikátoru $F_{+/-}$ musela být dle normy ≤ 3 dB. Vzhledem k tomu, že měření bylo prováděno v bezodrazové komoře, kde nebyly žádné významné zdroje vnějších zvuků, které by způsobovaly záporný akustický výkon, byla tato podmínka splněna. Poslední prováděnou zkouškou byla kontrola opakovatelnosti určení dílčího výkonu vypočítána podle vztahu:

$$|L_{wi}(1) - L_{wi}(2)| \leq s \quad (5.10)$$

kde

$L_{wi}(1)$ je hladina akustického výkonu při skenování na dílčí ploše v horizontálním směru

$L_{wi}(2)$ je hladina akustického výkonu při skenování na dílčí ploše ve vertikálním směru

s je směrodatná odchylka stanovená na základě požadované třídy přesnosti.

[15]

Pro třídu přesnosti 2 byla odchylka s 1,5 dB. Z vypočtených hodnot uvedených v tabulce 5-13

je patrné, že tato podmínka pro požadovanou třídu přesnosti splněna nebyla. Chyba vznikla při provádění měření na ploše 5, kde bylo velice obtížné dodržet konstantní rychlost a požadovanou dráhu sondy.

f[Hz]	Plocha1	Plocha2	Plocha3	Plocha4	Plocha5
1000	0,21	0,08	0,40	0,06	4,81
1250	0,10	0,08	0,33	0,26	2,65
1600	0,04	0,23	0,12	0,19	0,56
2000	0,06	0,17	0,35	0,23	0,07
2500	0,14	0,16	0,06	0,08	0,31
3150	0,09	0,08	0,19	0,31	0,41
4000	0,07	0,63	0,15	0,04	0,25
5000	0,16	0,27	0,27	0,11	0,21

Tab. 5-13: Vypočtené hodnoty pro kontrolu opakovatelnosti

Po zhodnocení všech indikátorů zvukového pole se provedl výpočet dílčích akustických výkonů pro každou část měřicí plochy a celkový výpočet akustického výkonu podle rovnice (3.18). Výsledná hladina akustického výkonu zdroje zvuku byla stanovena podle vztahu (1.7). V tabulce 5-14 jsou zobrazeny vypočtené hladiny akustického výkonu v třetinooktávovém pásmu měřeného zdroje zvuku. V levé části tabulky jsou uvedeny hodnoty akustického výkonu před zvážením váhovací křivkou A a v pravé části jsou uvedeny hodnoty po jejich zvážení. Celková hladina akustického výkonu A pro toto měření je zobrazena v tabulce 5-15. Výsledné hladiny akustického výkonu A jsou zobrazeny v grafu na Obr. 5-8.

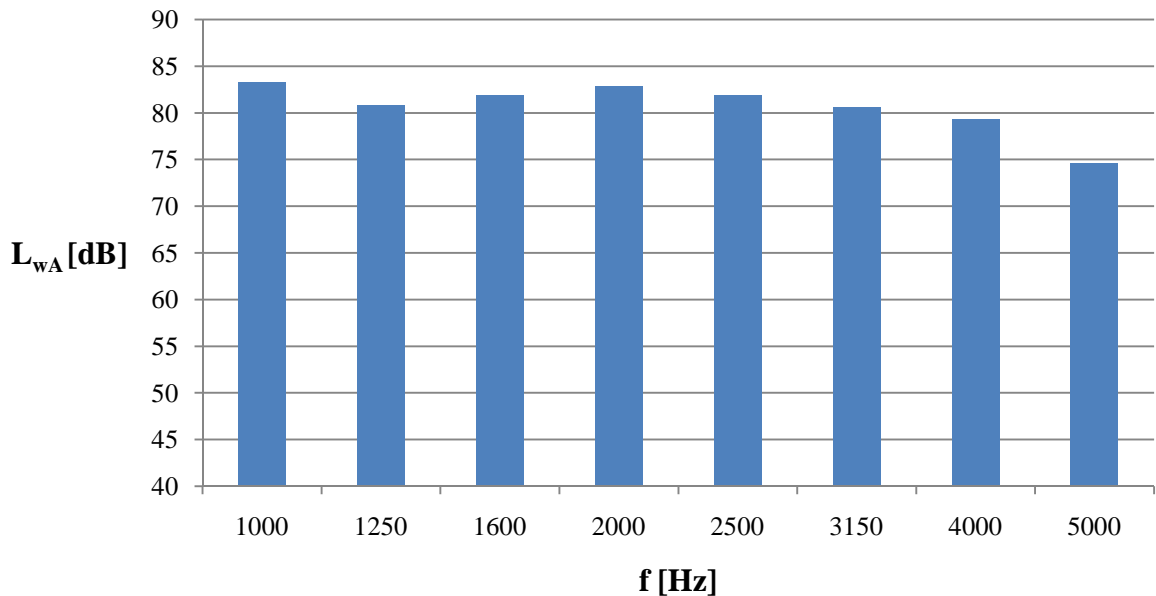
f[Hz]	L_w [dB]	L_{wA} [dB]
1000	83,31	83,31
1250	80,20	80,80
1600	80,83	81,83
2000	81,63	82,83
2500	80,51	81,81
3150	79,40	80,60
4000	78,32	79,32
5000	74,10	74,60

Tab. 5-14: Vypočtené hladiny akustického výkonu

L_{wA} [dB]
90,25

Tab. 5-15: Celková hladina akustického výkonu A

Měření akustického výkonu metodou skenování



Obr. 5-8: Výsledné naměřené hodnoty při měření hladiny akustického výkonu metodou skenování

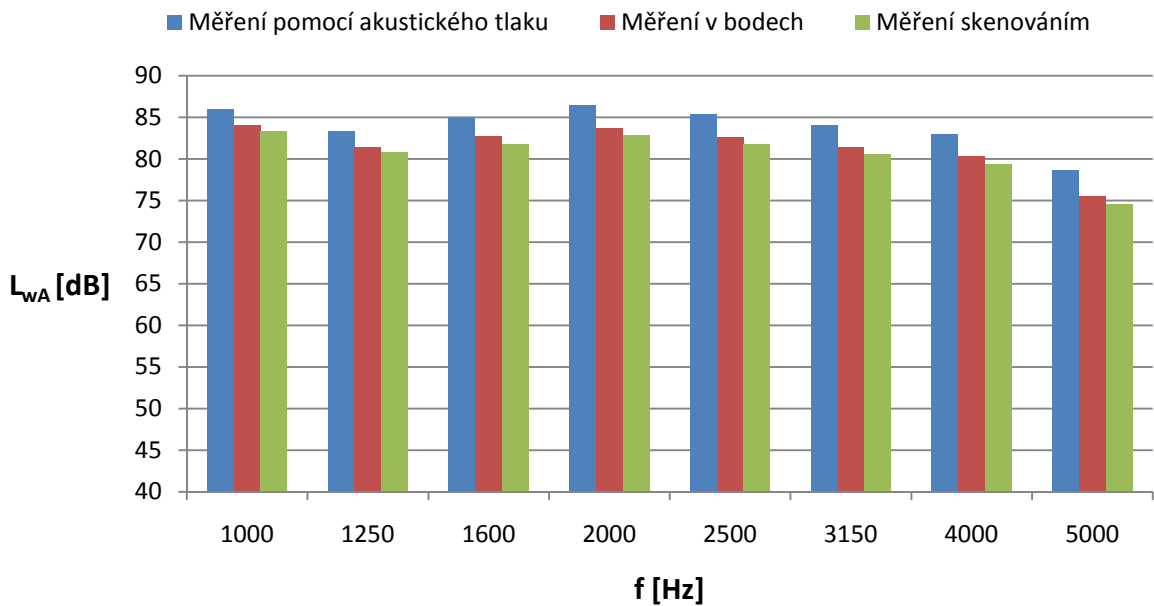
5.4 Porovnání jednotlivých metod měření

Výsledné naměřené hodnoty hladin akustického výkonu A v třetinooktávovém pásmu jsou pro všechny prováděné metody měření shrnuty v tabulce 5-16. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v grafu na Obr. 5-9. Celková hladina akustického výkonu A pro všechny prováděné metody je uvedena v tabulce 5-17.

f [Hz]	Měření pomocí tlaku	Měření v bodech	Měření skenováním
	L_{wA} [dB]	L_{wA} [dB]	L_{wA} [dB]
1000	86,02	84,00	83,31
1250	83,34	81,41	80,80
1600	84,84	82,75	81,83
2000	86,44	83,74	82,83
2500	85,30	82,66	81,81
3150	84,11	81,39	80,60
4000	82,95	80,31	79,32
5000	78,68	75,54	74,60

Tab. 5-16: Naměřené hladiny akustického výkonu A pro všechny provedené metody měření

Porovnání jednotlivých měřících metod



Obr. 5-9: Hladiny akustického výkonu A měřeného zdroje zvuku - porovnání jednotlivých měřících metod

Měření pomocí tlaku	Měření v bodech	Měření skenováním
L_{WA} [dB]	L_{WA} [dB]	L_{WA} [dB]
93,48	91,07	90,25

Tab. 5-17: Celková hladina akustického výkonu A pro všechny provedené metody měření

Z tabulky 5-16 a grafu na Obr. 5-9 je vidět, že největší rozdíl v naměřených hladinách akustického výkonu A je mezi metodou založenou na měření akustického tlaku a metodou založenou na měření akustické intenzity skenováním. Problém vznikl u metody skenování, kde nebyla splněna požadovaná třída přesnosti. Tato chyba nastala z důvodu, že skenování bylo prováděno ručně a tak nebyla dodržena rovnoměrná rychlost při pohybu sondy. Ani metoda měření v bodech neproběhla zcela optimálně, protože byla splněna pouze třída přesnosti 2. Návrhy na zpřesnění intenzitních metod jsou uvedeny v závěru této práce.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo porovnat různé metody měření akustické intenzity a výkonu. V první části byly popsány měřicí přístroje a principy, na kterých je měření akustické intenzity a výkonu založeno. Dále bylo provedeno shrnutí normativních dokumentů zabývajících se měřením akustického výkonu. Měření akustického výkonu bylo provedeno metodou založenou na měření akustického tlaku, na měření akustické intenzity v bodech a na měření akustické intenzity skenováním.

Při měření pomocí akustického tlaku byl navrhnout pomocný systém, který umožňoval nastavit měřicí mikrofony do definovaných poloh. V praxi se ukázalo, že tento systém svou funkci splnil a hladiny akustického tlaku byly bez větších problémů naměřeny. U metody měření akustické intenzity v bodech bylo dosaženo pouze přesnosti třídy 2. Pro zvýšení přesnosti měření by bylo vhodné zvolit větší počet měřících bodů na měřící ploše. Některé nepřesnosti mohly být způsobeny z důvodu, že měření bylo prováděno ručně a chvění ruky mohlo být dalším zdrojem chyb. Ideální by bylo provádět měření s mechanickou konstrukcí, která by zajistila dostatečnou stabilitu sondy v daném měřícím bodě. Při metodě skenování nebylo dosaženo požadované třídy přesnosti z důvodu nesplnění požadavku na konstantní rychlost pohybu sondy. Pro zvýšení přesnosti měření by bylo vhodné zvolit větší počet skenovacích čar na měřící ploše. Dalším řešením je provádět měření pomocí mechanické konstrukce, která zajišťuje konstantní rychlost pohybu sondy.

Obecně výhodou intenzitních metod je možnost provádět měření jak v provozních, tak laboratorních podmínkách. Metodu pomocí akustického tlaku lze provádět pouze v laboratorních podmínkách, a tak nastává problém u větších zdrojů hluku, které by bylo složité do akustických komor přemístit.

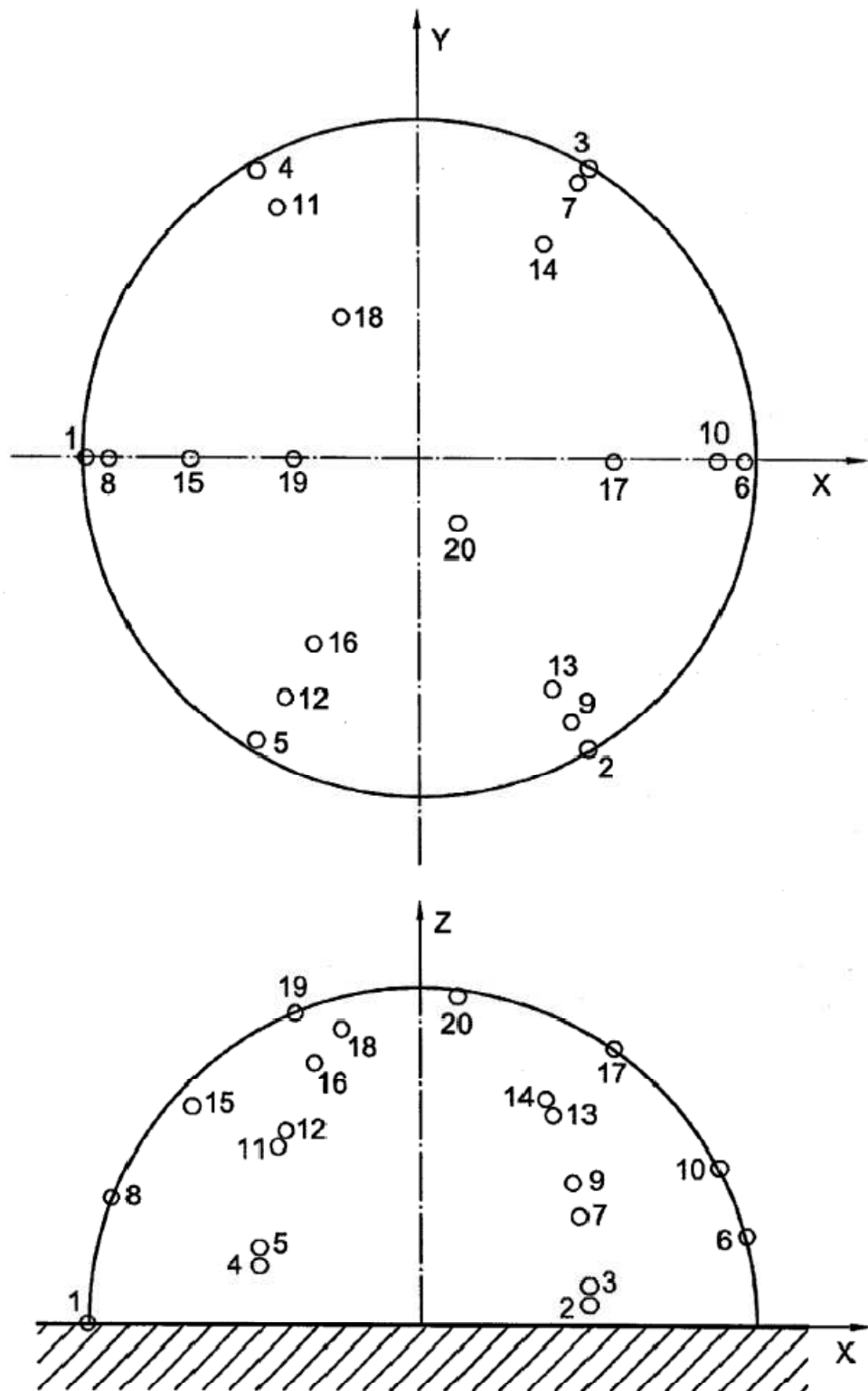
Použité zdroje:

- [1] SMETANA, Ctirad a kol. Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [2] BERAN, Vlastimil. Chvění a hluk. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [3] NOVÝ, R.: Hluk a chvění, vyd. 1., CVUT Praha 1995. ISBN 80-01-01306-5.
- [4] ČSN ISO 1996-1 (011621). Akustika - Popis, měření a hodnocení hluku prostředí - Část 1: Základní veličiny a postupy pro hodnocení. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [5] JIŘÍČEK, Ondřej. Úvod do akustiky. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02460-1.
- [6] Sound Intensity Probe Kit - Brüel & Kjær [online]. [cit. 2012-04-21]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/TransducersConditioning/acoustic-transducers/sound-intensity-probes/3599.aspx>
- [7] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. ISBN 80-730-0158-6.
- [8] ČSN EN 60942. Elektroakustika: Akustické kalibrátory. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [9] Type 3541 - Sound intensity calibrator Type 3541-A - Brüel & Kjær. [online]. [cit. 2012-04-03]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/TransducersConditioning/Calibration/acoustic-calibrators/3541A.aspx?tab=overview>
- [10] FAHY, F.J. Sound intensity. 2nd ed. London: E & FN SPON, 1995. ISBN 04-191-9810-5.
- [11] JACOBSEN, F. Measurement of sound intensity: p-u probes versus p-p probes. In: *2005_finn_novem_calibration* [online]. [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: http://www.microflown.com/files/media/library/Publications/Intensity/2005_finn_novem_calibration.pdf
- [12] ½" free-field microphone with Type 2669-C preamplifier, 3 Hz to 20 kHz, 200 V polarization - Brüel & Kjær. [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/TransducersConditioning/acoustictransducers/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4190-C-1.aspx>
- [13] ČSN EN ISO 3745. Akustika - určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci

[14] ČSN ISO 9614-1. Akustika - Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity - Část 1: Měření v bodech. Praha: Český normalizační institut, Srpen 1995.

[15] ČSN ISO 9614-2. Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity - Část 2 : Měření skenováním. Praha: Český normalizační institut, Prosinec 1997.

Přílohy



Obr. 0-1 Polohy jednotlivých měřících mikrofónů. Převzato z [13]