

# **Návrh zkoušení akustických parametrů zařízení techniky prostředí v kalorimetrické komoře**

Testing Acoustics Parameters for Devices of Technical  
Environment in Calorimetric Chamber

Bc. Pavel Drábek

---

Diplomová práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Drábek**  
Osobní číslo: **A12433**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Integrované systémy v budovách**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Kalorimetrická komora – Návrh zkoušení akustických parametrů zařízení techniky prostředí v kalorimetrické komoře**

Zásady pro vypracování:

- 1. Prostudujte problematiku akustiky technologií techniky prostředí.**
- 2. Stanovte možnosti teoretického a experimentálního určení akustických parametrů technologií techniky prostředí (tepelného čerpadla, split jednotky).**
- 3. Rozeberte možnosti určení parametrů v kalorimetrické komoře.**
- 4. Navrhněte způsob zkoušek v kalorimetrické komoře se zvážením možnosti měření parametrů pro různé třídy stanovení.**
- 5. Navrhněte potřebné přístrojového vybavení.**
- 6. Zhodnoťte postup zkoušení a vyhodnoťte měření.**
- 7. Napište závěry hodnocení.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **AMERICAN SOCIETY OF HEATING, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2005 ASHRAE handbook fundamentals. I-P and SI eds. Atlanta, Ga: ASHRAE. ISBN 19-318-6273-7.**
2. **SCHRAMEK, Recknagel ... Hrsg. von Ernst-Rudolf. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließylich Warmwasser- und Kältetechnik ; [07/08]. 73. Aufl. München [u.a.]: Oldenbourg-Industrieverl. ISBN 38-356-3104-7.**
3. **NOVÝ, Richard. Hluk a chvění: einschliesslich Warmwasser- und Kältetechnik. 07/08. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04347-9.**
4. **Platné ČSN řada 06, 07, 34, 35, 36, 37, 38, 73, 74, 83, 91.**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Martin Zálešák, CSc.**

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

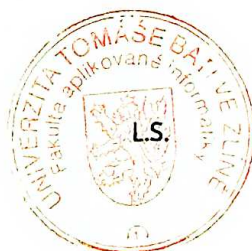
**7. března 2014**

Termín odevzdání diplomové práce:

**11. června 2014**

Ve Zlíně dne 7. března 2014

  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*Koředitel ústavu*

## ABSTRAKT

Diplomová práce je orientována do problematiky stanovení akustických parametrů strojních zařízení v kalorimetrické komoře. Text práce zahrnuje popis základních akustických veličin a příčin vzniku nežádoucího hluku u zařízení techniky prostředí a jejich prvků. Všeobecně zmiňuje teoretické i experimentální možnosti stanovení akustických parametrů v různých zvukových polích. Práce prakticky řeší návrh jednotlivých prvků kalorimetrické komory s přihlédnutím na požadavky univerzálnosti této stavby. Návrh se snaží předejít různým komplikacím při realizaci a navrhuje takové prvky, které se shodují se směrnici daných norem. Součástí práce je i návrh přístrojového vybavení a postup měření a vyhodnocování akustických parametrů zařízení techniky prostředí.

Klíčová slova: dozvuková komora, hluk, difúzní pole, mikrofon, referenční zdroj zvuku, zvuková pohltivost, zařízení techniky prostředí

## ABSTRACT

This diploma work is orientated towards the issues of determination acoustic parameters of equipment environmental engineering in the calorimetric chamber. The theoretical part includes basic acoustic parameters and describes causes of undesirable noise of technology devices and specific elements. In general, this thesis refers theoretical and experimental possibilities of acoustic parameters in different sound fields. The analytical part deals with the proposal of individual elements of calorimetric chamber with regard to possibility of another use. The proposal is trying to avoid various complications during implementation and it suggests such elements which correspond with regulations of given norms. The thesis also includes a proposal of instrumentation and process of measurement and evaluation of acoustic parameters of equipment environmental engineering.

Keywords: reverberation chamber, noise, diffuse field, reference sound source, microphone, sound absorption, equipment of environmental engineering

Mé poděkování patří především vedoucímu diplomové práce Ing. Martinovi Zálešákovi, CSc. za odborné vedení, ochotu, cenné rady, připomínky a za čas, který mi věnoval.

V neposlední řadě také děkuji své rodině za všestrannou podporu po celou dobu studia.

„Nejpošetilejším ze všech omylů je, když si mladé dobré hlavy myslí, že ztratí originalitu, jestliže uznají pravdy, které uznal již někdo před nimi.“

Johann Wolfgang von Goethe

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 VLIV VIBRACÍ A HLUKU NA LIDSKÝ ORGANISMUS</b> .....	<b>13</b>
<b>2 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY V AKUSTICE</b> .....	<b>15</b>
2.1 AKUSTICKÉ VLNĚNÍ .....	15
2.2 ZÁKLADNÍ VELIČINY .....	17
2.2.1 Kmitočet .....	17
2.2.2 Vlnová délka .....	17
2.2.3 Akustická rychlost .....	18
2.2.4 Akustický tlak .....	18
2.2.5 Akustický výkon.....	19
2.2.6 Intenzita zvuku .....	20
2.3 INTERFERENCE AKUSTICKÝCH VLN .....	21
2.3.1 Interference vlnění stejných frekvencí .....	21
2.3.2 Stojaté vlnění.....	22
2.4 OKTÁVOVÁ KMITOČTOVÁ PÁSMA .....	23
<b>3 HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN</b> .....	<b>25</b>
3.1 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU .....	25
3.2 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU.....	26
3.3 HLADINA INTENZITY ZVUKU .....	27
3.4 VZÁJEMNÁ SOUVISLOST AKUSTICKÝCH VELIČIN.....	27
<b>4 POŽADAVKY NA AKUSTICKÉ VLASTNOSTI</b> .....	<b>29</b>
4.1 VÝROBNÍ POŽADAVKY .....	29
4.2 NÁVRHOVÉ POŽADAVKY .....	29
<b>5 AKUSTICKÉ PARAMETRY TECHNOLOGICKÉHO ZAŘÍZENÍ TECHNIKY PROSTŘEDÍ</b> .....	<b>32</b>
5.1 HLUK TEPELNÉHO ČERPADLA .....	32
5.2 HLUK VZDUCHOTECHNIKY .....	33
5.3 HLUK DÍLČÍCH SOUČÁSTÍ MECHANICKÉHO RÁZU .....	34
5.3.1 Hlučnost valivých ložisek .....	34
5.3.2 Hluk pístových strojů .....	34
5.3.3 Hluk elektromotorů .....	35
5.3.4 Hluk cirkulačních čerpadel.....	35
5.4 HLUK DÍLČÍCH SOUČÁSTÍ AERODYNAMICKÉHO RÁZU .....	36
5.4.1 Hluk při obtékání těles .....	36
5.4.2 Hluk ventilátorů .....	36
5.4.3 Vlastní hluk elementů potrubní sítě .....	38

<b>6</b>	<b>TEORETICKÉ MOŽNOSTI STANOVENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MOŽNOSTI STANOVENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>41</b>
7.1	AKUSTICKÉ VLASTNOSTI UZAVŘENÝCH PROSTOR .....	41
7.1.1	Typy akustických polí .....	41
7.1.2	Volné zvukové pole.....	43
7.1.3	Difúzní zvukové pole .....	43
7.2	ZVUKOVÁ POLE UZAVŘENÝCH PROSTORŮ .....	44
7.3	DOZVUK .....	45
7.4	AKUSTICKÉ KOMORY .....	46
7.4.1	Bezdozvukové komory.....	47
7.4.1.1	Plně bezdozvukové komory .....	47
7.4.1.2	Polobezdozvukové komory.....	48
7.4.2	Dozvukové komory .....	49
7.5	MĚŘENÍ VE VOLNÉM ZVUKOVÉM POLI .....	51
7.6	MĚŘENÍ V DIFÚZNÍM POLI .....	52
7.7	MĚŘENÍ V MÍSTECH POBYTU OSOB .....	52
<b>8</b>	<b>PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ AKUSTICKÝCH MĚŘENÍ.....</b>	<b>53</b>
8.1	ZVUKOMĚRY .....	53
8.2	MIKROFONY .....	54
8.2.1	Kapacitní mikrofon .....	56
8.2.2	Tlakový mikrofon.....	56
8.3	ANALYZÁTORY ZVUKU .....	57
8.4	HLUKOVÝ DOZIMETR.....	57
8.5	REFERENČNÍ ZDROJ ZVUKU .....	58
<b>II</b>	<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>59</b>
<b>9</b>	<b>CHARAKTERISTIKA LABORATOŘE TECHNIKY PROSTŘEDÍ .....</b>	<b>60</b>
9.1	POPIS PRACOVIŠTĚ LABORATOŘE TECHNIKY PROSTŘEDÍ.....	60
9.2	UNIVERZÁLNÍ KALORIMETRICKÁ KOMORA .....	61
9.2.1	Geometrické a konstrukční řešení univerzální kalorimetrické komory .....	62
9.3	ZÁKLADNÍ ZKOUŠENÁ ZAŘÍZENÍ A JEJICH PARAMETRY .....	64
9.3.1	Chladicí a vytápěcí zdroje .....	64
9.3.2	Koncové prvky chladících a vytápěcích systémů.....	65
9.3.3	Prvky vzduchotechnických systémů.....	66
<b>10</b>	<b>NÁVRH DOZVUKOVÉ KOMORY .....</b>	<b>67</b>
10.1	OBJEM A TVAR .....	68
10.2	KONSTRUKČNÍ PRVKY A ÚPRAVA POVRCHU .....	71
10.2.1	Chladírenské sendvičové panely .....	73



10.3	DIFÚZNÍ PRVKY .....	74
10.4	KOMPLIKACE A MOŽNÉ ŘEŠENÍ.....	76
10.4.1	Návrh rezonančních absorberů.....	76
10.4.2	Pružné uložení zařízení .....	78
10.4.3	Automatický posuv mikrofonu.....	81
10.4.4	Vizuální monitoring měřicího procesu.....	82
<b>11</b>	<b>UMÍSTĚNÍ MĚŘÍCÍCH PRVKŮ V DOZVUKOVÉ KOMOŘE.....</b>	<b>83</b>
11.1	UMÍSTĚNÍ ZKOUŠENÉHO ZAŘÍZENÍ TECHNIKY PROSTŘEDÍ .....	84
11.2	UMÍSTĚNÍ REFERENČNÍHO ZDROJE ZVUKU .....	84
11.3	UMÍSTĚNÍ MĚŘÍCÍCH MIKROFONŮ .....	85
11.4	NÁVRH KONKRÉTNÍHO UMÍSTĚNÍ.....	86
<b>12</b>	<b>MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ V DOZVUKOVÉ KOMOŘE.....</b>	<b>88</b>
12.1	KRITÉRIA MĚŘENÉHO PROSTŘEDÍ .....	89
12.1.1	Kritéria hluku pozadí.....	89
12.1.2	Kritéria mikroklimatických podmínek .....	89
12.2	PROVOZ ZKOUŠENÉHO ZAŘÍZENÍ BĚHEM ZKOUŠKY .....	90
12.3	MĚŘENÍ HLADIN AKUSTICKÉHO TLAKU.....	91
12.3.1	Předběžné ověření vhodnosti rozmístění měřicích prvků .....	91
12.3.2	Korekce na hluk pozadí.....	92
12.3.3	Výpočet hladin akustického výkonu pomocí referenčního zdroje zvuku.....	92
12.4	NEJISTOTA MĚŘENÍ.....	93
<b>13</b>	<b>POSTUP MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ ZAŘÍZENÍ TECHNIKY PROSTŘEDÍ A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>95</b>
13.1	PROTOKOL O MĚŘENÍ.....	99
<b>14</b>	<b>NÁVRH PŘÍSTROJOVÉHO VYBAVENÍ .....</b>	<b>101</b>
14.1	MIKROFON S PŘEDZESILOVAČEM.....	101
14.2	MODULY LAN-XI.....	103
14.3	REFERENČNÍ ZDROJ ZVUKU .....	106
14.4	ZVUKOVÝ KALIBRÁTOR.....	107
14.5	SOFTWARE PULSE.....	108
14.6	ZHODNOCENÍ ZVOLENÉHO PŘÍSTROJOVÉHO VYBAVENÍ.....	109
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>110</b>
	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>112</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>114</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>117</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>118</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>120</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>121</b>

## ÚVOD

V posledních několika desetiletích, za účelem zvýšení komfortu osob a snahy minimalizace energetické náročnosti budov, se stalo téměř pravidlem či nutností, že stále více do prostředí budovy instalujeme větrací a klimatizační zařízení, čerpadla, elektromotory, výtahové stroje, vytápěcí zařízení a jiné různé hlučné zařízení. Z hlediska národní legislativy patří tyto zařízení mezi stavební výrobky a musí tedy při uvedení na trh splnit požadavky zákona č. 22/1997 Sb., „o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů“. Tyto požadavky jsou konkretizovány v Nařízení vlády č. 163/2002 Sb. ve znění NV č. 312/2005 Sb., kde jedním ze základních požadavků na výrobky je **ochrana proti hluku a vibracím**.

Jednou z nejzávažnějších vlastností hluku a vibrací je, že se šíří na poměrně velké vzdálenosti a to stejně dobře vzduchem, vodou nebo např. konstrukcí budovy. Za určitých podmínek se může akustické vlnění odrážet, lomit a ohýbat. Na základě těchto podmínek může akustická energie, i když např. působí pouze jeden zdroj hluku, obklopit naše pracoviště nebo místo pobytu tak, že není možno předem určit, kde je zdroj hluku umístěn. V důsledku této skutečnosti působí hluk a vibrace na každého, kdo je v dosahu akustické energie. Nežádoucí vibrace však nepůsobí jen na lidi, ale také na budovy samotné, včetně všech předmětů a zařízení v nich umístěných a tak ovlivňuje jejich životnost a spolehlivost.

Obtěžující účinky hluku jak v pracovním, tak i obytném prostředí, vedly mnoho vyspělých zemí k legislativním opatřením, jejichž výsledkem je řada zákonů, norem a jiných právních předpisů, zajišťující ochranu lidí před nadměrným hlukem a vibracemi. Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., „o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací“ je v ČR platnou legislativní normou, která stanovuje maximální limity na hlučnost použitých stacionárních zdrojů techniky prostředí, jejich umístění a uložení. [1]

Neustálý vývoj techniky je z největší části směřován ke zvyšování výkonu strojů a technologických zařízení. Platí ovšem, že s rostoucím mechanickým výkonem roste i ten akustický, což je jeden z důvodů růstu hlučnosti. Konstrukteři, respektující ekonomické aspekty, sestavují stroje ze stále lehčích konstrukčních prvků, aby stroj vykazoval lepší poměr mezi výkonem a vlastní hmotností, což je významným měřítkem kvality výrobku. Takto vylehčené konstrukce ovšem ztrácejí zvukoizolační schopnosti a způsobují prudké zvýšení vyzářovaného akustického výkonu. [2]

Akustická kvalita strojů se zásadním způsobem promítá i do oblasti ekonomické. Hlučné stroje se totiž obtížně prodávají a to ještě za podstatně nižší ceny než stroje protihlukově upravené, splňující hygienické limity s velkou rezervou. [2]

Aby bylo možné provést opatření co nejefektivněji, je nutno velikost vyzařované akustické energie nejdříve změřit, získaná data vyhodnotit a popsat. A právě možnostmi experimentálního a teoretického stanovení akustických parametrů technologií techniky prostředí se zabývá tato práce. Některé poznatky této práce by také mohli posloužit při praktickém testování zařízení techniky prostředí v připravované kalorimetrické komoře ve Vědeckotechnickém parku ve Zlíně. Tato komora bude sloužit k akreditovaným zkouškám a certifikacím tepelných a chladících zařízení techniky prostředí.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 VLIV VIBRACÍ A HLUKU NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Vnímání vibrací je ovlivněno celou řadou faktorů. Jedná se o komplexní fyziologický a psychologický vjem zprostředkovaný celou řadou receptorů. Dané vzruchy se přenášejí centrální nervovou soustavou do mozku, kde se integrují a kde také vzniká subjektivní vjem. Velikost vjemu je určena nejen kmitočtem, ale i zrychlením kmitavého pohybu.

Vjem vibrací na kmitočtech nižších než 15Hz je dán funkcí vestibulárního aparátu. Ten určuje odezvu člověka na lineární nebo úhlové zrychlení hlavy, celkové vibrace těla a jeho polohu. Vjem vibrací na nízkých kmitočtech je zprostředkován také receptory, které jsou v kloubech, šlachách a svalech. Vibrace o kmitočtech vyšších než 15Hz jsou vnímány pomocí receptorů na tlak, které se nacházejí v měkkých tkáních na kůži.

Expozice intenzivním vibracím je spojena s nepříjemným subjektivním vjemem nepohody, který může být posuzován jak z fyziologického tak i psychologického hlediska. Při dlouhodobé expozici může dojít k trvalému poškození lidského organismu. Největší zdravotní riziko představují v současnosti vibrace přenášené na horní končetiny. Dlouhodobý provoz převážné většiny ručního nářadí je spojen s rizikem onemocnění periferních cév, nervů horních končetin a svalově kloubního aparátu. [4]

Fyziologicky se vibrace, působící na organismus, mohou projevit ztrátou rovnováhy, snížením zrakové ostrosti, obtížemi při soustředění, kinetózou<sup>1</sup>, vázoneurózou<sup>2</sup> a potížemi při dýchání. [4]

Vedle vibrací působí nepříznivě na člověka i doprovodný hluk. Základním parametrem hluku, určujícím jeho účinek, je jeho intenzita, případně akustický tlak. Pro hodnocení hlukové expozice se používá hladina akustického tlaku korigovaná filtrem A, jehož útlumová charakteristika přibližně odpovídá citlivosti zdravého lidského sluchového orgánu. Lidské ucho vnímá zvuk v rozsahu kmitočtů 20Hz až 20kHz. Aby byl zvuk slyšitelný, musí jeho intenzita, resp. akustický tlak, překročit určitou prahovou hodnotu, která je frekvenčně závislá. Při zvyšování intenzity zvuku se dospěje k takovým hodnotám akustické intenzity zvuku, při nichž dochází k pocitu bolesti. Tím je určen tzv. práh bolesti. Všechny slyšitelné zvuky leží mezi prahem slyšení a prahem bolesti.

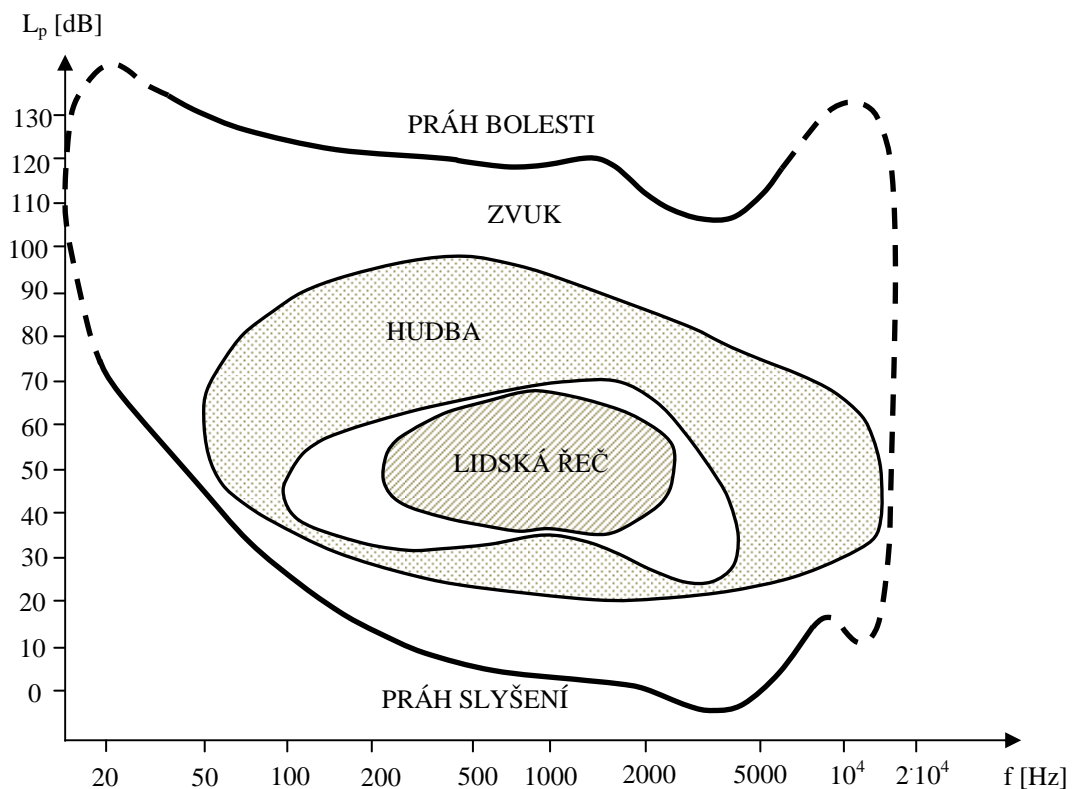
---

<sup>1</sup> *Stav organismu vzniklý působením rychlosti*

<sup>2</sup> *Cévohybné funkční onemocnění z poruchy nervové činnosti*

Při hladině akustického tlaku nad 130dB(A) se účinky hluku zpravidla mění na bolest sluchového orgánu a při hladinách hluku nad 160dB(A) dochází již k nevratné poruše sluchového orgánu. Nejčastějším projevem poškození sluchového orgánu je trvalý posun sluchového prahu slyšitelnosti. Dalšími riziky účinků hluku jsou tzv. mimosluchové poruchy, které se mohou projevit podrážděním vegetativního a nervového systému, poruchami spánku, psychickými poruchami (předrážděnost, nervozita) či snižováním výkonnosti a pozornosti. [3]

Jak již bylo naznačeno v úvodu, problém ochrany sluchu není pouze v technickém řešení, ale také v ekonomické oblasti, neboť výrobek, u kterého je nutné aplikovat protihluková opatření se může stát několikanásobně dražší. Je proto nutné zvolit optimální kompromis mezi technickými a ekonomickými možnostmi, přičemž hygienické předpisy jsou kritériem.



Obr. 1 – Prahové křivky slyšitelnosti [2]

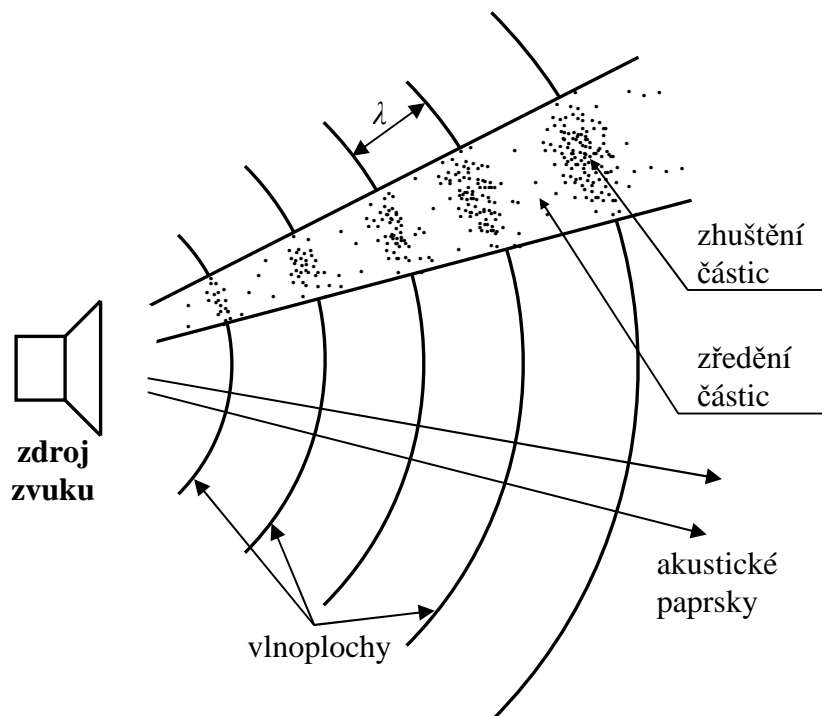
## 2 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY V AKUSTICE

### 2.1 Akustické vlnění

Podstatou slyšitelného zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu (20 až 20000) Hz, které se šíří konečnou rychlostí určitým prostředím. Právě tímto frekvenčním rozsahem se zabývá technická akustika.

Zvuk se může šířit v plynech, kapalinách i pevných látkách ve formě akustického vlnění. Podle toho, zda částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu, dělíme vlnění na **podélné** a **příčné**. Zatímco u podélného vlnění je směr kmitů jednoznačně dán směrem šíření vlnění, tak u příčného vlnění se udává rovina, ve které dochází k příčným kmitům. U plynů a kapalin se vyskytuje pouze podélné akustické vlnění, neboť tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. Elastické materiály, které vykazují pružnost nejen v tahu a tlaku, ale i smyku, umožňují výskyt vlnění podélného i příčného.

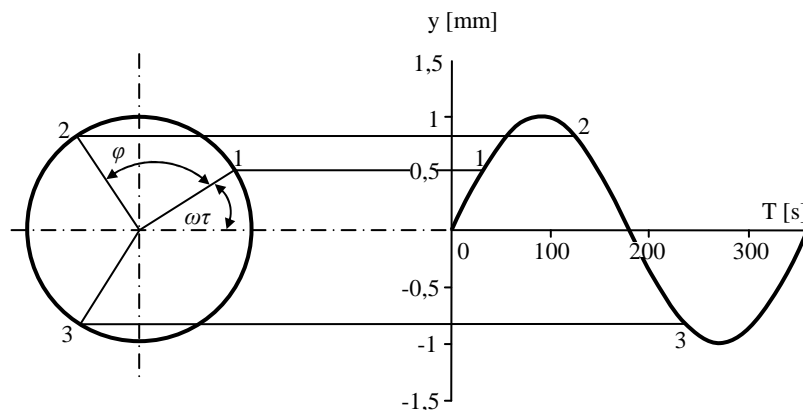
Akustickým vlněním pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic ve směru od zdroje prostřednictvím tzv. **vlnoploch** (Obr. 2). Vlnoplocha se vyznačuje tím, že v jejích všech bodech je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Kolmice na vlnoplochu je nazývána **akustickým paprskem**. [3]



Obr. 2 – Šíření zvuku od zdroje ve formě vlnoploch [3]

Je třeba ještě zdůraznit, že ani při podélném ani při příčném vlnění se částice v prostředí nepřemísťují, ale pouze kmitají kolem rovnovážných poloh. Částice přitom kmitají se stejnou amplitudou (pokud neuvažujeme útlum), ale s různou fází.

Pravidelným periodickým vychýlením částice z klidové polohy je vyvoláno tzv. **harmonickým kmitáním**, kde okamžité hodnoty výchylky částice odpovídají časovému rozložení průběhu sinusové funkce (Obr. 3).



Obr. 3 – Časový průběh harmonického kmitání [2]

V technické akustice se výchylka hmotného bodu značí písmenem  $u$  [m], a vztah je pro ni definován následovně

$$u = u_0 \sin(\omega\tau + \varphi_0) \quad (2.1.1)$$

kde  $\omega$  je úhlový kmitočet [Hz],

$\varphi_0$  fázový úhel [-],

$u_0$  amplituda fázové výchylky [m],

$\tau$  čas [s].

V případě nutnosti stanovení okamžité akustické výchylky v určité vzdálenosti od počátku je nutné respektovat ve výpočtu, že se rozruch šíří v bodové řadě konstantní rychlostí zvuku a proto bude děj v určité vzdálenosti od počátku opožděn o čas  $\Delta\tau$ , který je nutný k uražení potřebné vzdálenosti. [2]

$$\Delta\tau = \frac{x}{c} \quad (2.1.2)$$

kde  $x$  je vzdálenost od počátku [m],



$c$  rychlost šíření akustické vlny [m/s].

Výchylka kmitajícího bodu je poté dána vztahem

$$u = u_0 \sin \omega \left( \tau \pm \frac{x}{c} \right) \quad (2.1.3)$$

Záporné znaménko platí pro šíření vlny v kladném směru osy  $x$ . Při šíření zvuku v opačném směru je nutné použít kladné znaménko. [2]

## 2.2 Základní veličiny

### 2.2.1 Kmitočet

Kmitočet  $f$  [Hz] (frekvence) určuje počet kmitů za sekundu, které vykonává kmitající hmotný bod. Mezi dobou kmitu a frekvencí platí jednoduchý vztah

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2.1.1)$$

Pro popis kmitání a vlnění se také používá tzv. úhlová frekvence  $\omega$  [Hz], kterou lze vyjádřit pomocí následujícího vztahu

$$\omega = 2\pi f \quad (2.2.1.2)$$

### 2.2.2 Vlnová délka

Na Obr. 2 je vyznačena veličina  $\lambda$  [m], která se nazývá vlnovou délkou. Tato veličina udává vzdálenost mezi nejbližšími vlnoplochami se stejnými akustickými stavy kmitajících částic. Obecně se dá říci, že vlnová délka je vzdálenost, kterou urazí zvuková vlna za dobu jednoho kmitu, tedy periody  $T$  [s]. Jestliže se akustická vlna od zdroje šíří rychlostí zvuku  $c$  a vlnění s frekvencí  $f$ , pak pro vlnovou délku platí vztah

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2.2.1)$$

Vlnová délka je důležitým akustickým parametrem, který umožňuje modelování v akustice.

### 2.2.3 Akustická rychlost

Rychlost s jakou kmitají jednotlivé částičky prostředí, kterým se šíří akustická vlna, je nazývána akustickou rychlostí  $v$  [m/s]. Výraz pro výpočet je možno získat z provedení první parciální derivace akustické výchylky (2.1.3) podle času.

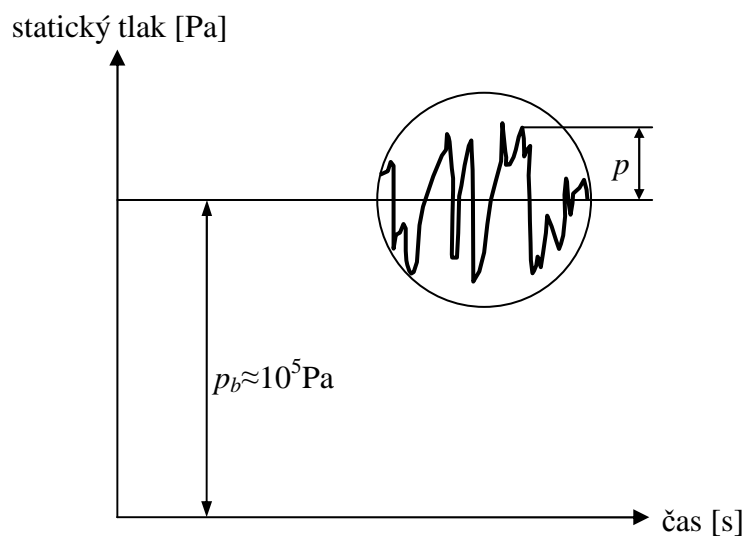
$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = \omega u_0 \cos \left[ \omega \left( \tau \pm \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.2.3.1)$$

Akustická rychlost je jednou z nejdůležitějších akustických veličin a je jí nutno přísně odlišovat od rychlosti šíření zvuku. Její velikost je o mnoho řádů menší než rychlost šíření zvuku. [2]

### 2.2.4 Akustický tlak

Při šíření vlnění prostředím, lze v daném časovém okamžiku najít místa s menší hustotou molekul a stejně tak i místa s větší hustotou molekul. Tomu odpovídají v plynech a kapalinách místa přetlaku a místa podtlaku. S tímto zhuštěním a zředěním částic souvisí změny celkového statického tlaku vzduchu.

Z Obr. 4 lze odvodit celkový statický tlak, který je dán součtem středního barometrického tlaku  $p_b$  a akustického tlaku  $p$ . Jinými slovy lze říci, že na barometrickém tlaku je nasuperponován tlak akustický. Celkový tlak v daném prostředí se při šíření akustického vlnění mění, neboť neustále kolísá okolo barometrického tlaku v ovzduší. [3]



Obr. 4 - Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu [2]

Z Obr. 4 je vidět, že akustický tlak je o mnoho řádů nižší než tlak barometrický. Zdravé lidské ucho začíná vnímat akustické tlaky od hodnot  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa, což je hodnota v porovnání s barometrickým tlakem téměř zanedbatelná.

Pro harmonický signál je možné psát výraz vyjadřující průběh akustického tlaku ve tvaru

$$p = p_0 \cos \left[ \omega \left( \tau \pm \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.2.4.1)$$

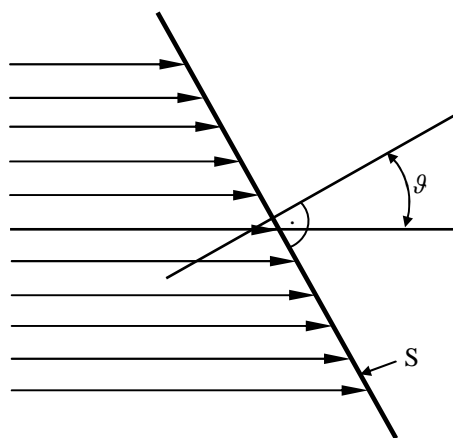
kde  $p_0$  je amplituda akustického tlaku [Pa].

### 2.2.5 Akustický výkon

Mechanickými kmity pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic od zdroje prostřednictvím akustických vln. Množství akustické energie, procházející za jednotku času myšlenou prostorovou plochou se nazývá akustickým výkonem  $W$  [W]. Ze základů mechaniky plyne, že výkon je dán součinem síly a rychlosti. Ve chvíli kdy za sílu  $F$  dosadíme součin akustického tlaku a plochy  $S$  na kterou působí, získáme následující vztah

$$W = Fv = p v S \quad (2.2.5.1)$$

Na Obr. 5 je zobrazen zvukový paprsek, který s měřicí plochou  $S$  svírá úhel  $\vartheta$ . Vztáhne-li se tento výkon na jednotku plochy, kterou je přenášen, tak se zavádí nový pojem, a to **měrný akustický výkon** značený  $N$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. [2]



Obr. 5 – Schéma rovinné vlny [2]

Za předpokladu, že ve všech bodech uvažované roviny vlny je stejný akustický stav, je měrný akustický výkon vyjádřen jako

$$N = \frac{W}{S \cos \vartheta} \quad (2.2.5.2)$$

Každý zdroj hluku je definován akustickým výkonem jakožto základním parametrem akustického výstupu. Definovat zdroj hluku pomocí akustického výkonu je výhodnější, než definovat jej pomocí akustického tlaku. Akustický tlak totiž závisí na vnějších faktorech, jako je např. vzdálenost od zdroje, teplotní a rychlostní gradient prostředí apod. [3]

### 2.2.6 Intenzita zvuku

Pro vektorovou veličinu, popisující množství a směr toku akustické energie v daném místě prostředí, je zaveden pojem intenzita zvuku  $I$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], která je střední hodnotou měrného akustického výkonu

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T N d\tau \quad (2.2.6.1)$$

kde  $T$  je doba integrace [s].

Pro harmonické signály je tato doba rovna době jedné periody. Intenzitu zvuku je možné vyjádřit také jako součin efektivního akustického tlaku

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}} \quad (2.2.6.2)$$

a efektivní akustické rychlosti

$$v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \quad (2.2.6.3)$$

Jelikož v technické akustice lze spolehlivě měřit běžnými přístroji pouze akustický tlak a nikoliv akustickou rychlost, tak se využívá u rovinné vlny skutečnosti, že poměr mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí je konstantní. [2]

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (2.2.6.4)$$

kde  $Z$  je měrný vlnový odpor prostředí, kterým se šíří akustická vlna [ $\text{Ns}/\text{m}^3$ ].

Aplikací těchto skutečností lze docílit konečného vzorce, který je ve tvaru

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c}. \quad (2.2.6.5)$$

Tento výraz má v technické akustice zásadní význam, protože na jeho platnosti je založeno nejenom měření hluku, ale i ostatní akustické výpočty. [2]

## 2.3 Interference akustických vln

### 2.3.1 Interference vlnění stejných frekvencí

Šíří-li se prostředím dvě nebo více vlnění, lze je skládat na výsledné vlnění podle principu superpozice. Pokud se jedná o vlnění v různých směrech, skládá se vektorově. Jde-li o vlnění navzájem polarizovaná, jež mají stejnou polarizační rovinu, přechází vektorový součet v algebraický součet okamžitých výchylek. [2]

Jedním z případů interference je vlnění o stejných frekvencích. Podle vztahu (2.2.2.1) je jasné, že i vlnové délky jsou stejné. Při skládání vlnění je možné vycházet např. z průběhu akustické výchylky (2.1.3), ovšem nesmí se zapomenout na skutečnost, že jednotlivá vlnění mohou být od sebe navzájem fázově posunuta.

$$u_1 = u_{01} \sin \left[ \omega \left( \tau - \frac{x}{c} \right) + \varphi_1 \right] \quad (2.3.1.1)$$

$$u_2 = u_{02} \sin \left[ \omega \left( \tau - \frac{x}{c} \right) + \varphi_2 \right] \quad (2.3.1.2)$$

Sečtením obou rovnic, se získá výraz pro výsledné vlnění ve tvaru

$$u = u_0 \sin \left[ \omega \left( \tau - \frac{x}{c} \right) + \varphi \right] \quad (2.3.1.3)$$

kde se nová amplituda  $u_0$  získá následovně, pomocí vztahu

$$u_0 = \sqrt{u_{01}^2 + u_{02}^2 + 2u_{01}u_{02} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (2.3.1.4)$$

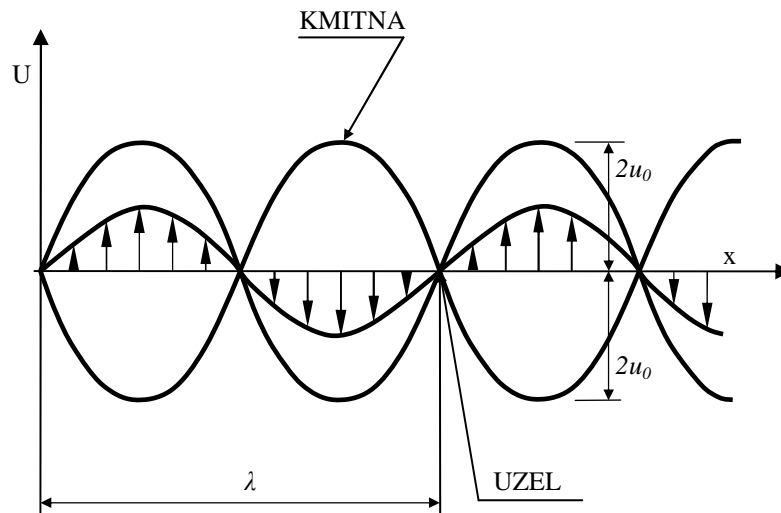
a nový fázový posuv výsledného vlnění

$$\tan \varphi = \frac{u_{01} \sin \varphi_1 + u_{02} \sin \varphi_2}{u_{01} \cos \varphi_1 + u_{02} \cos \varphi_2}. \quad (2.3.1.5)$$

### 2.3.2 Stojaté vlnění

Šíří-li se proti sobě dvě vlnění se stejnými kruhovými frekvencemi a stejnou amplitudou, nastane zvláštní případ interference tzv. **úplné stojaté vlnění**. Jsou-li amplitudy proti sobě postupujících vlnění různé, vznikne pouze **částečné stojaté vlnění**.

Úplné stojaté vlnění se vyznačuje tím, že všechny částice kmitají se stejnou fází, ale s různou amplitudou (Obr. 6).



Obr. 6 – Úplné stojaté vlnění [2]

Při vyjádření obou postupujících vlnění průběhem akustických výchylek vztahy

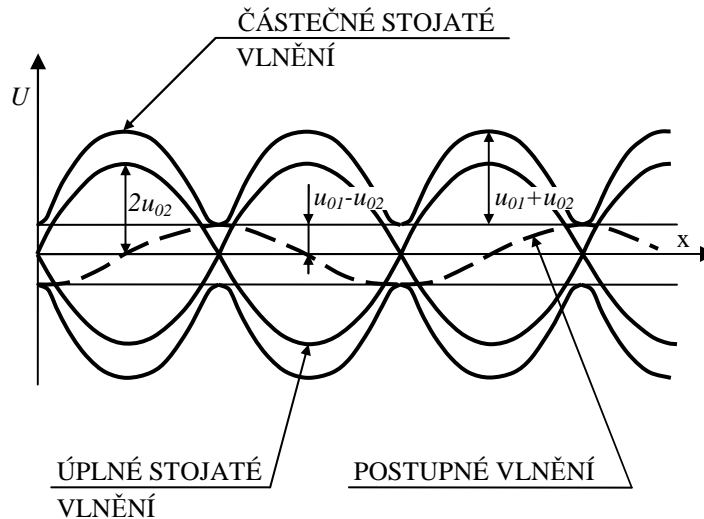
$$u_1 = u_0 \sin \left[ \omega \left( \tau - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.3.2.1)$$

$$u_2 = u_0 \sin \left[ \omega \left( \tau + \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.3.2.2)$$

a jejich sečtením se získá vztah popisující úplné stojaté vlnění

$$u = 2u_0 \cos \left( \omega \frac{x}{c} \right) \sin \omega \tau . \quad (2.3.2.3)$$

Druhým zmiňovaným případem interference je částečné stojaté vlnění. Grafické znázornění průběhu částečného stojatého vlnění je na Obr. 7.



Obr. 7 – Částečné stojaté vlnění

Vztah pro částečné stojaté vlnění, který je níže uveden, se skládá ze dvou členů. První popisuje úplné stojaté vlnění a druhý určuje postupné vlnění o amplitudě dané rozdílem ( $u_{01}-u_{02}$ ).

$$u = 2u_{02} \cos\left(\omega \frac{x}{c}\right) \sin \omega \tau + (u_{01} - u_{02}) \sin \left[ \omega \left( \tau - \frac{x}{c} \right) \right] \quad (2.3.2.4)$$

Úplné stojaté vlnění se v praxi vyskytuje při odrazu zvukových vln od stěn, kde odrážející plocha je akusticky tvrdá tzn., že dochází k bezztrátovému odrazu. Běžně ale dochází k určitému pohlcení akustické energie na odrážející ploše. V tomto případě dochází k částečnému stojatému vlnění. [2]

## 2.4 Oktávová kmitočtová pásma

Při měření hluku je v určitých situacích potřeba zjistit určitou velikost akustických veličin na daném kmitočtu či kmitočtovém pásmu. Výsledkem jsou frekvenční spektra příslušných akustických veličin. Ovšem pokud by se měřila frekvenční spektra s krokem  $\Delta f=1\text{Hz}$ , tak by jejich zhotovení bylo příliš pracné. Proto z důvodu zjednodušení frekvenčních spekter akustických veličin se zavádí **oktávová (resp. třetinooktávová) pásma**.

Frekvenční pásmo o šířce jednoho oktávového pásma je charakterizováno poměrem krajních frekvencí vymežujících každou oktávu

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (2.4.1)$$

kde  $f_1$  je dolní frekvence a  $f_2$  horní frekvence oktávového pásma. Každá oktáva je značena pomocí střední frekvence  $f_{stř}$ , pro kterou platí

$$f_{stř} = \sqrt{f_1 \cdot f_2} \quad (2.4.2)$$

Střední frekvence jsou standardně zaokrouhlovány. Pomocí matematických úprav předchozích dvou vztahů lze určit i dolní a horní frekvenci.

$$f_1 = \frac{f_{stř}}{\sqrt{2}} \quad (2.4.3)$$

$$f_2 = f_{stř} \cdot \sqrt{2} \quad (2.4.4)$$

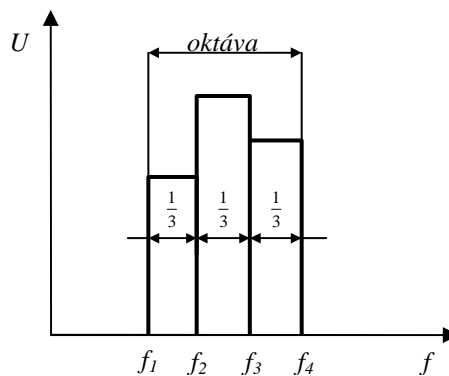
Pokud je nutno stanovit velikost akustických veličin z většího počtu pásem, rozdělí se oktávové pásmo na tři nestejná pásma, tím se získá třetinooktávové pásmo (viz. Obr. 7). Pokud frekvence  $f_1$  a  $f_4$  ohraničují pásmo jedné oktávy, tak frekvence  $f_2$  a  $f_3$  jsou krajními frekvencemi vnitřní třetiny oktávy, tak platí následující vztah

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} \quad (2.4.5)$$

Ze vztahu plyne, že poměr krajních kmitočtů v libovolné třetině oktávy je konstantní. Pro určení krajních frekvencí třetinooktávového pásma platí následující závislost na střední frekvenci tohoto pásma.

$$f_1 = \frac{f_{stř}}{\sqrt[3]{2}} \quad (2.4.6)$$

$$f_2 = f_{stř} \cdot \sqrt[3]{2} \quad (2.4.7)$$



Obr. 8 – Třetinooktávové pásmo



### 3 HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN

Lidské ucho je schopno registrovat akustický tlak, jakožto základní akustickou veličinu ve značně širokém rozsahu. Průměrně je jako spodní prahová hodnota slyšení uváděna hodnota akustického tlaku  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa při frekvenci 1000 Hz. Tato hodnota také byla použita jako referenční hodnota, od které byly odvozovány referenční hodnoty dalších akustických veličin. Nejvyšší hodnota akustického tlaku, při kterém člověk začíná pociťovat bolest sluchového orgánu je okolo 100 Pa. Na základě těchto dvou mezních hodnot je vidět značně velké rozmezí, na které lidské ucho reaguje. Navíc podle Weber-Fechnerova zákona, lze prokázat logaritmickou závislost mezi objektivními akustickými veličinami a subjektivním vjemem člověka. Z těchto důvodů byl v technické akustice zaveden pojem „**hladin**“ jednotlivých akustických veličin, jejichž jednotkou je „**decibel**“ [dB]. [3]

#### 3.1 Hladina akustického výkonu

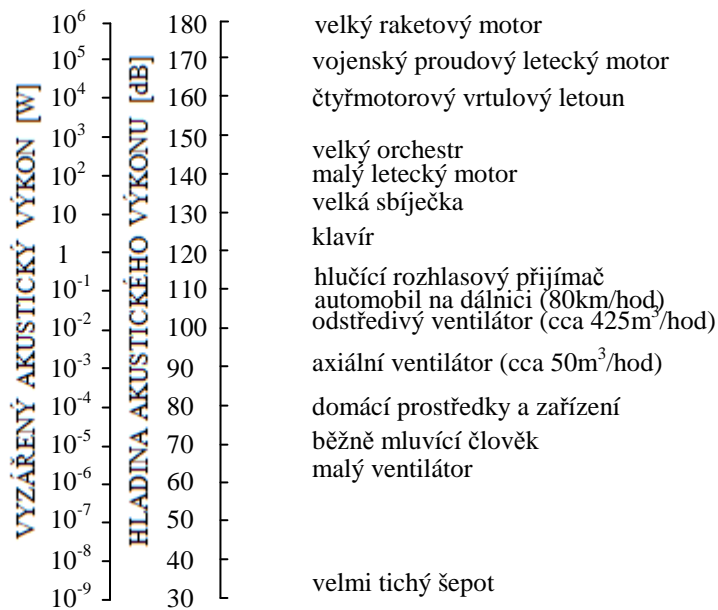
Hladina akustického výkonu  $L_w$  [dB] je definována vztahem

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (3.1.1)$$

kde  $W$  je sledovaný akustický výkon [W],

$W_0$  referenční akustický výkon,  $W_0 = 10^{-12}$  W.

Akustický výkon se zpravidla vyznačuje na štítku základních parametrů stroje. Pro některé vybrané zdroje zvuku jsou uvedeny akustické výkony v lineární i decibelové stupnici na Obr. 9.



Obr. 9 – Lineární a decibelová stupnice pro akustický výkon

### 3.2 Hladina akustického tlaku

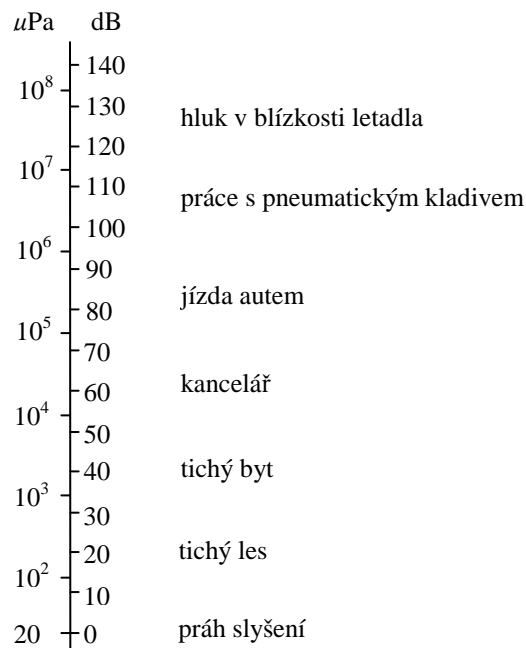
Stejně jako u výkonu, tak i pro akustický tlak byla zavedena příslušná hladina, kterou je nutno vztahovat vždy k určitému kmitočtu nebo pásmu kmitočtů. Hladina akustického tlaku  $L_p$  [dB] je definována vztahem

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (3.2.1)$$

kde  $p$  je sledovaný akustický tlak [Pa],

$p_0$  referenční akustický tlak,  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

Tomuto referenčnímu akustickému tlaku odpovídá na decibelové stupnici hodnota 0 dB. Je vhodné poznamenat, že nejmenší možnou změnu, kterou je lidský sluchový orgán schopen zaznamenat je 1 dB. Zvýšení hladiny akustického tlaku o 6 dB odpovídá zdvojnásobení akustického tlaku. Obr. 10 znázorňuje některé běžné zdroje zvuku, vyjádřených ve formě akustického tlaku v lineární i decibelové stupnici.



Obr. 10 – Hladiny akustického tlaku v různém prostředí

### 3.3 Hladina intenzity zvuku

Hladina intenzity zvuku  $L_I$  [dB] je definována pomocí vztahu

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (3.3.1)$$

kde  $I$  je intenzita zvuku sledovaného akustického signálu [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],

$I_0$  referenční hodnota intenzity zvuku,  $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Z rovnice (3.3.1) je zřejmé, že ke každému zvýšení intenzity zvuku o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny intenzity zvuku o 10 dB.

### 3.4 Vzájemná souvislost akustických veličin

Základním předpokladem, ze kterého lze vycházet, je vzorec (2.2.6.5) popisující vztah mezi intenzitou zvuku a akustickým tlakem. Dosadí-li se tento výraz do vzorce intenzity zvuku (3.3.1) je možné psát

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{p^2}{\rho_0 c_0}}{\frac{p_0^2}{\rho_0 c_0}} = 20 \log \frac{p}{p_0} + 10 \log \frac{\rho_0 c_0}{\rho c} \quad (3.4.1)$$

Poslední člen rovnice má při běžných klimatických podmínkách hodnotu -0,2 dB, tudíž je možné vztah zjednodušit na tvar

$$L_I = L_p - 0,2 \quad (3.4.2)$$

Tento vzorec umožňuje na základě měření hladiny akustického tlaku přímo také určovat hladinu intenzity zvuku, aniž by byla podstatným způsobem ovlivněna přesnost výpočtu a měření zvuku. [2]

Při vyjádření souvislosti mezi hladinou akustického výkonu  $L_W$  a akustického tlaku  $L_p$  či intenzity  $L_I$  je nutné si uvědomit, že hladina akustického výkonu určuje vždy akustický výkon vyzařovaný určitým zdrojem a je to tudíž vlastnost jenom zdroje zvuku. Kdežto hladina akustického tlaku naopak určuje akustický děj v kontrolním místě. A jak již bylo naznačeno v kapitole 2.2.5, Tato veličina se výrazně mění se vzdáleností od zdroje, směru šíření akustické energie, okolním prostředím apod. [3]

Pro zdroj, který vyzařuje akustickou energii rovnoměrně do všech směrů a je obklopen měřicí plochou  $S$  platí následující vztah

$$W = I \cdot S \quad (3.4.3)$$

Dosazením do definičního vzorce hladiny akustického výkonu se získá rovnice ve tvaru

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{I \cdot S}{I_0 \cdot S_0} \quad (3.4.4)$$

Při zanedbání rozdílu -0,2 dB u vzorce (3.4.2), lze tuto rovnici vyjádřit také pomocí hladiny akustického tlaku. Při vhodném zvolení referenční plochy  $S_0=1 \text{ m}^2$ , má tato rovnice tvar

$$L_W = L_p + 10 \log S \quad (3.4.5)$$

Z následujícího vztahu lze konstatovat, že hodnoty hladin akustického výkonu jsou podstatně větší než hodnoty hladin akustického tlaku. Podle uvedené publikace, je pro malý bodový zdroj zvuku, vyzařujícího rovnoměrně do všech směrů, při vzdálenosti 1 m od středu bodového zdroje zvuku, rozdíl mezi hladinou akustického tlaku a hladinou akustického výkonu přibližně 10 dB. S větší vzdáleností se tento rozdíl podstatně zvětšuje. [2]

## 4 POŽADAVKY NA AKUSTICKÉ VLASTNOSTI

### 4.1 Výrobní požadavky

Organizace, které projektují, konstruuji a vyrábějí zařízení techniky prostředí, která jsou zdrojem hluku nebo vibrací, jsou povinny navrhovat a určovat konstrukční podmínky včetně materiálů a potřebných technických úprav zařízení podle stavu vědy a techniky tak, aby hluk a vibrace byly snižovány v souladu s potřebami ochrany zdraví.

Pokud je nutné pro splnění požadavků stanovených hygienickými předpisy doplňkové vybavení omezující hluk a vibrace, jsou organizace povinny dodávat nebo zajišťovat jejich dodávku.

Technická dokumentace těchto zařízení, musí obsahovat takové údaje, podle nichž by bylo možné provést potřebná opatření na ochranu proti škodlivému působení hluku. Zároveň odpovídají za to, že hodnoty hluku a vibrací uvedené v technické dokumentaci lze při stanovení těchto opatření dodržet.

### 4.2 Návrhové požadavky

Při návrhu zařízení techniky prostředí, které implementujeme do stavebního díla, je nutné dbát na to, aby byly splněny požadavky na hladiny zvuku uvedené v projektové dokumentaci. Pokud požadavky uvedeny nejsou, mohou být použity doporučené návrhové hodnoty, které uvádí norma ČSN EN 15251. Projektová dokumentace staveb, u nichž by mohlo docházet k nepříznivému působení hluku a vibrací na pracovníky, obyvatele či jiné uživatele, musí obsahovat doklady, popřípadě výpočty, prokazující dostatečné omezení hluku a vibrací.

Pro stanovení hluku v prostoru je nutno jednoduše a jednočíselně charakterizovat hlukovou expozici lidí. Ovšem subjektivní vjem zvuku lidmi je závislý na mnoha činitelích. Jedním z nich je nestejná citlivost lidského sluchu na různých kmitočtech. Z tohoto důvodu je tedy nutné přiblížit měřené akustické veličiny vlastnostem lidského sluchu.

Této skutečnosti lze dosáhnout zavedením elektronických zvukoměrných zařízení, jejichž citlivost je podobná kmitočtové závislosti lidského ucha. Proto byly do měřících zvukoměrů zařazeny tzv. **váhové filtry**, respektující výše uvedený požadavek.

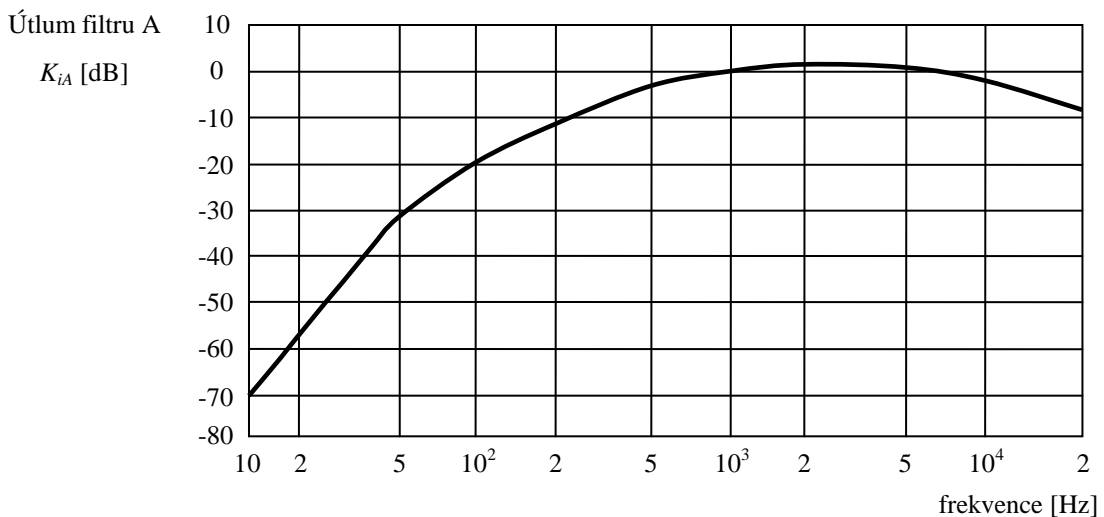
Hygienická služba ČR posuzuje hlukovou situaci v kontrolním místě na základě údajů zvukoměru při zapnutém váhovém filtru A. Tento údaj je nazýván **hladinou akustického tlaku A**, označován  $L_{pA}$  [dB].

Ze známých hladin akustického tlaku v oktávových nebo třetinooktávových pásmech, lze vypočítat hladinu akustického tlaku A podle následujícího vztahu

$$L_{pA} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi} + K_{Ai}}{10}} \quad (4.1)$$

kde  $L_{pi}$  je hladina akustického tlaku v příslušném kmitočtovém pásmu [dB],

$K_{Ai}$  korekce závislá na středním kmitočtu v oktávovém nebo třetinooktávovém pásmu [dB] (viz. Obr. 11). [2]



Obr. 11 – Útlumová charakteristika filtru A [2]

Hygienické limity, které se vztahují na zařízení techniky prostředí, se odvíjí od jejich umístění, kdy hluk jimi vyzařovaný může pronikat do chráněného vnitřního nebo venkovního prostoru. Chráněným vnitřním prostorem jsou myšleny místnosti, v kterých se zdržují lidé kvůli odpočinku, jako jsou nemocniční pokoje, obytné místnosti, kulturní střediska apod. Za hluk ze zdrojů uvnitř objektu se předpokládá i hluk ze zdrojů umístěných mimo tento objekt, který do tohoto objektu proniká jiným způsobem než vzduchem, zejména konstrukcemi nebo podlahám. Chráněným venkovním prostorem se rozumí volná prostranství, která jsou užívána k rekreaci, s výjimkou komunikací a prostor vymezených jako venkovní pracoviště. Vhodné návrhové požadavky ukazuje tabulka 1.

Tabulka 1 – Příklady návrhových hladin akustického tlaku pro některé typy prostorů [27]

Budova	Typ prostoru	Hladina akustického tlaku $L_{pA}$ [dB]	
		Typický rozsah	Návrhová hodnota
Bytová	Obývací pokoj	25-40	32
	Ložnice	20-35	26
Předškolní zařízení	Mateřské školy	30-45	40
	Jesle	30-45	40
Shromažďovací prostory	Přednáškové sály	30-35	33
	Knihovny	28-35	30
	Muzea	28-35	30
Nemocnice	Operační sály	30-48	40
	Pokoje	20-40	30
Hotely	Vestibuly	35-45	40
	Pokoje	25-40	33
	Recepce	35-45	40
Kanceláře	Konferenční místnosti	30-40	35
	Malé kanceláře	30-40	35
Restaurace	Restaurace	35-50	45
	Kavárna	35-50	40
Školy	Učebny	30-40	35
	Kabinety	30-40	35
Obchodní prostory	Obchodní domy	40-50	45
	Supermarkety	40-50	45
Sportovní střediska	Kryté stadiony	35-50	45
	Plovárny	40-50	45
Všeobecně	Toalety	40-50	45
	Šatny	40-50	45

## 5 AKUSTICKÉ PARAMETRY TECHNOLOGICKÉHO ZAŘÍZENÍ TECHNIKY PROSTŘEDÍ

Většina zařízení, které spadají do oblasti techniky prostředí, obsahují elementy (ventilátory, kompresory, čerpadla, apod.), které konají vratný nebo rotační pohyb, s nímž je spojeno silové působení na okolní součásti. Ve chvíli kdy je povrch součástí obklopen vzduchem, nastává přenos energie chvěním do okolního prostředí. Právě tyto části komplexních zařízení jsou zdrojem zvuku.

Zdroje zvuku lze rozdělit do dvou základních skupin

- mechanické zdroje zvuku – jedná se o akustické zářiče, jejichž povrch vyvolává kmitání, které se přes přiléhající vrstvy tekutiny<sup>3</sup> šíří dále do prostoru ve formě vlnění
- aerodynamické zdroje zvuku – jedná se o skupinu, kde je hlavní příčinou vzniku zvuku volné nestacionární turbulentní proudění, popř. obtékání těles proudem tekutiny

Vyzařování akustického výkonu ze strojního zařízení se obvykle děje celým souborem vyzařování hluku z dílčích zdrojů, které jsou tvořeny jednotlivými součástkami stroje. Na základě rozmístění jednotlivých dílčích součástí a řešení krytu zařízení, jsou vykazovány směrové účinky, tzn., že do různých směrů je vyzařována nerovnoměrně akustická energie.

### 5.1 Hluk tepelného čerpadla

Hlavními komponenty tepelného čerpadla typu vzduch-voda, z hlediska vytváření hluku je kompresor a ventilátor. K mírnému zvýšení hluku přispívá také expanzní ventil.

V počátcích výroby tepelných čerpadel vzduch-voda býval součástí vnější jednotky pístový kompresor, který byl velmi hlučný převážně v době větších mrazů. K dalšímu razantnímu zvýšení hlučnosti, ve velké míře přispívaly také hlučné vysokootáčkové ventilátory. Výsledkem byl poměrně velký hluk, zvláště v největších mrazech. [5]

Z výše uvedeného textu je zřejmé, že vyzařovaný akustický výkon výrazně ovlivňuje typ daného kompresoru. Mezi používané kompresory patří pístové, rotační či spirálové,

---

<sup>3</sup> společný název pro kapaliny a plyny, jejichž společnou vlastností je tekutost



z nichž poslední zmiňovaný je v nynější době značně zvýhodňován z důvodu jeho vyšší účinnosti, nižší údržbě a hlučnosti.

Podstatný podíl na míře hluku nese rychlost otáček ventilátoru, z toho důvodu jsou tepelná čerpadla osazována velkými ventilátory s nízkou rychlostí otáček. Pro minimalizaci nežádoucího hluku se výrobci zaměřují také na způsob řízení expanzního ventilu, zejména při odmrazování venkovní jednotky.

Tepelné čerpadlo typu země-voda nebo voda-voda je na tom z hlediska akustických vlastností podstatně lépe, zejména kvůli absenci ventilátoru.

## 5.2 Hluk vzduchotechniky

Na výsledné vyzářené akustické energii ze vzduchotechnického zařízení, se podílí části, které lze rozdělit na zdroje hlavní, podružné a zdroje pozadí.

Hlavní zdroj hluku ve vzduchotechnice tvoří ventilátor s elektromotorem. Celková hladina akustického výkonu ventilátoru závisí na jeho vzduchovém výkonu, dopravním tlaku a konstrukci.

Příčinou vzniku hluku podružných zdrojů je to, že vytváří turbulentní proudění vzduchu potrubím při změnách profilu potrubí a rychlosti proudění. Hluk vzniká v kolenech, odbočkách i v kolenových prvcích přívodu a odvodu vzduchu. Významně závisí na rychlosti proudění, proto snižování hlukové zátěže vnitřního prostoru vyžaduje užití nižších rychlostí proudění vzduchu jak v potrubí, tak zejména v koncových elementech.

Podrobnější shrnutí příčin hlučnosti vzduchotechnických zařízení je uvedeno v následujících bodech:

- aerodynamické účinky ve ventilátorovém soustrojí (obtékání lopatek, úplavy, turbulence)
- mechanické účinky ve ventilátorovém soustrojí (nevyváženost rotujících částí, hluk valivých ložisek, elektromotorů, apod.)
- hluk dalších pomocných zařízení (chladicí kompresory, oběhová čerpadla, atd.)
- aerodynamický hluk vznikající v rozvodovém potrubí a koncových elementech (vyústky, regulační klapky, apod.)

Akustická energie se šíří od zdroje všemi směry, což znamená, že se hluk ze strojoven nešíří pouze do sacího a výtlačného potrubí, ale také do prostoru samotné strojovny. Pro zabránění šíření hluku do okolí, se běžně používají technická opatření, jako jsou tlumiče hluku a protihlukové izolace. [9]

### 5.3 Hluk dílčích součástí mechanického rázu

Tato kapitola v sobě zahrnuje podrobnější popis jednotlivých dílčích zařízení, která jsou hlavními zdroji hluku v zařízeních techniky prostředí. Jsou zde popsány jak mechanické zdroje hluku, tak i ty aerodynamického rázu.

#### 5.3.1 Hlučnost valivých ložisek

Se snahou neustálého zvyšování výkonu strojů a zároveň snižováním jejich váhy, se tak děje především na základě zvyšování otáček. S tím úzce souvisí akustické vlastnosti stroje. Praxe prokázala, že značný podíl na hlučnosti strojů mají nedokonalá valivá ložiska. [7]

Mezi hlavní příčiny hluku valivých ložisek patří:

- odchylky od ideálního geometrického tvaru – při vzájemném pohybu jednotlivých elementů ložiska může vznikat chvění ložiska, což jednak přímo a jednak prostřednictvím přiléhajících konstrukčních prvků, vyzařuje akustickou energii do okolního vzduchu
- nedokonalé odvalování – je příčinou vzniku tzv. prokluzů, které zejména při vysokých otáčkách zvyšují vlastní hluk ložiska
- způsob uložení – je-li ložisko, dokonale mechanicky vázáno s okolní konstrukcí, může se chvění skrz ni lépe přenést do okolního vzduchu, které lidské ucho vnímá jako nežádoucí hluk.

#### 5.3.2 Hluk pístových strojů

Do této skupiny spadají již výše zmíněné pístové kompresory. Práce těchto strojů se vyznačuje přerušovaným sacím a výtlačným procesem. Právě nerovnoměrné proudění tekutiny v kanálech s tímto pracovním pochodem je jednou z hlavních příčin hlučnosti. Dalšími parametry, které ovlivňují hlučnost, je počet otáček, druh chlazení a druh pohonu. Snaha snižování hluku se děje nejčastěji pomocí aplikace zvukověizolačních krytů. [7]

Početně lze určit celkový akustický výkon tohoto typu stroje z přibližného vztahu

$$L_w = 61,3 + 10 \log W + 10 \log n \quad (5.3.2.1)$$

Kde  $W$  je výkon motoru [kW],

$n$  počet otáček motoru [ot./min].

### 5.3.3 Hluk elektromotorů

Asynchronní motory prozatím stále patří k nejrozšířenějším elektromotorům vůbec, i když z hlediska jejich malé účinnosti jsou již na ústupu. Na celkovém hluku těchto typů elektromotorů se nejvíce podílí aerodynamický hluk chladicího ventilátoru a magnetické hluky.

Magnetický hluk bývá způsobován jednak vzájemným silovým působením feromagnetických hmot pod vlivem časově proměnných polí a jednak magnetostrikcí<sup>4</sup>. Příčinou magnetického hluku u elektromotorů je pole mezi rotorem a státorem. Toto pole se mění a vyvolává ve statoru i rotoru vibrace, které jsou pak vyzařovány povrchem elektromotoru do okolí. [6]

### 5.3.4 Hluk cirkulačních čerpadel

V provozech, kde se dopravují kapaliny potrubními systémy, může mít nadměrná hlučnost různé příčiny, různou intenzitu i různý charakter. Jednou z příčin mohou být cirkulační čerpadla. Ve vytápěcích a klimatizačních zařízeních se nejčastěji používají čerpadla do potrubí, jejichž elektromotory pracují v kapalině, což má za následek nízké vyzařování akustické energie do okolního prostoru. Ovšem značná část akustické energie je čerpadlem vyzařována do připojeného potrubí, které bývá zazděno do nosných zdí, případně uloženo na kovových rámech. Vyzařování hluku tímto směrem má větší akustickou účinnost, což má za následek vyzařování hluku přímo do chráněných místností. Omezení šíření hluku čerpadel, směrem do potrubí, se často děje vkládáním pryžových kompenzátorů. [8]

---

<sup>4</sup> fyzikální jev, kdy těleso vyrobené z feromagnetického materiálu, mění v magnetickém poli svoje rozměry

## 5.4 Hluk dílčích součástí aerodynamického rázu

Hluk aerodynamického proudu je možné charakterizovat jako zvuk, vznikající v důsledku působení proudu vzduchu na okolní obklopující prostředí. Příčinou vzniku hluku tedy není kmitání povrchu pevných těles, ale pohyb tekutiny.

### 5.4.1 Hluk při obtékání těles

Při otékání tělesa danou tekutinou vznikají tzv. diskrétní složky zvuku. Nestabilní proudění za obtékaným tělesem je doprovázeno vznikem vírů, které se v pravidelném rytmu utrývají od obtékaného tělesa a vytvářejí tzv. Kármánovu vírovou cestu. Vznikající periodické fluktuace jsou příčinou prudké změny tlaku vzduchu, případně kapaliny a tím vzniká vlnění v médiu, což je provázeno vznikem hluku. [3]

Příkladem takového tělesa mohou být např. klapky ve vzduchotechnickém zařízení, vkládané do potrubí za účelem zvýšení tlakové ztráty určitého potrubního úseku. Obtékání takové klapky v každém případě narušuje proudění tekutiny za klapkou, což se projevuje výrazným zvýšením turbulence. Zvýšení hlučnosti závisí na parametrech klapky a proudění vzduchu.

### 5.4.2 Hluk ventilátorů

Důvodem hlučnosti ventilátorů je vysoce turbulentní proudění tekutiny ventilátorovým kolem a spirální skříní. K celkovému hluku ventilátoru přispívá také již výše popsany mechanický hluk od ložisek, elektromotoru, spojky apod.

Aerodynamický hluk ventilátoru se z velké většiny šíří vzduchovody, tj. sacím a výtlačným potrubím do větrané místnosti nebo do venkovního prostoru. Pro porovnání akustických vlastností ventilátorů různých typů a velikostí, je nejvýhodnější používat hladinu akustického výkonu. [2]

Pro určení celkového akustického výkonu ventilátoru je možné použít následující vztah

$$W = K\Delta pV\left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \quad (5.4.2.1)$$

kde  $K$  je konstanta úměrnosti závislá na typu ventilátoru [-],

$\Delta p$  celkový dopravní tlak ventilátoru [Pa],

- $V$  objemový průtok vzduchu ventilátorem [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  
 $\eta$  účinnost ventilátoru [-].

Pro výpočet celkového akustického výkonu lze ovšem použít i následující vztah, který vychází z charakteristických rozměrů a provozních parametrů ventilátoru.

$$W = K \frac{\rho}{c^3} u^6 D^2 \quad (5.4.2.2)$$

kde  $u$  je obvodová rychlost oběžného kola [ $\text{m/s}$ ],

$D$  velký průměr oběžného kola [ $\text{m}$ ].

U obou předcházejících vztahů je velikost konstanty úměrnosti  $K$  závislá na Machově čísle a jeho exponentu  $n$ . U ventilátoru je Machovo číslo  $Ma$  definováno jako poměr obvodové rychlosti oběžného kola  $u$  a rychlosti šíření zvuku  $c$ . Pro ventilátor radiální se uvádí hodnota exponentu  $n=2$ , a pro ventilátor axiální je velikost exponentu reprezentována číslem  $n=2,5$ . [2]

Dosazením rovnice (5.4.2.1) do definičního vztahu pro hladinu akustického výkonu a uplatnění poznatku o závislosti konstanty úměrnosti  $K$  na mocnině Machova čísla, se získá výraz

$$L_w = 10 \log \left[ K^* \Delta p V \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \left( \frac{u}{c} \right)^n \right] \quad (5.4.2.3)$$

Kde  $K^*$  je nová konstanta úměrnosti [-],

$N$  exponent Machova čísla [-].

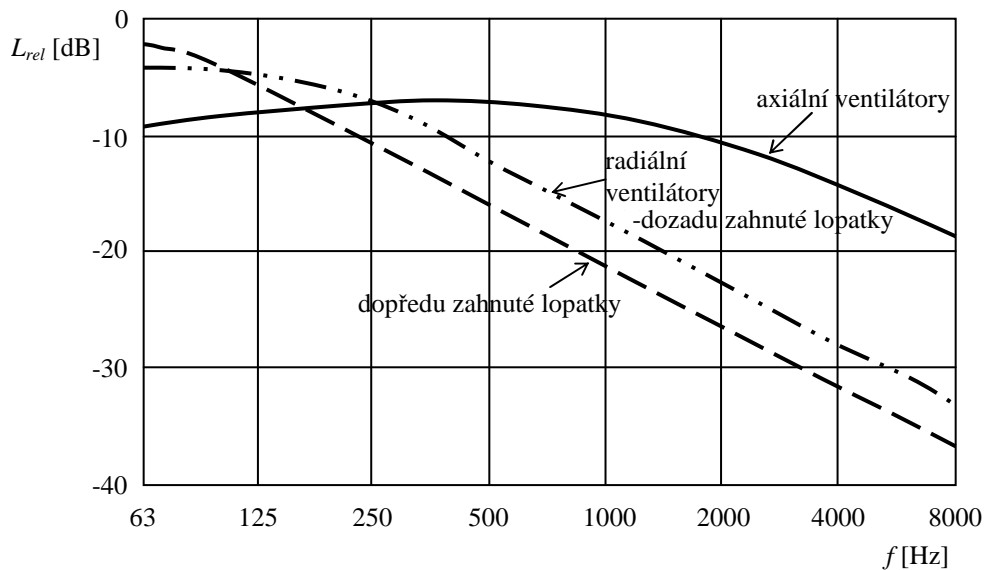
U ventilátorů je zvykem pracovat s hladinami akustického výkonu v oktávových pásmech. Hladinu akustického výkonu v oktávovém pásmu lze určit ze vztahu

$$L_{w0} = L_w + L_{rel} \quad (5.4.2.4)$$

Kde  $L_{w0}$  je hladina akustického výkonu v oktávovém pásmu [dB],

$L_w$  celková hladina akustického výkonu [dB],

$L_{rel}$  relativní hladina určující tvar spektra [dB].



Obr. 12 – Relativní spektrum ventilátorů [2]

Obr. 12 uvádí relativní hladiny pro základní typy ventilátorů. Z hlediska hodnocení hlučnosti ventilátorů podle limitů platného hygienického předpisu je nejméně hlučný ventilátor radiální s dopředu zahnutými lopatkami. Naopak axiální ventilátor tím, že má akustický výkon soustředěn do oblasti středních a vyšších kmitočtů, bude hodnocen jako hlučnější, protože hodnocení spektrálních složek o vyšších kmitočtech je přísnější. [2]

#### 5.4.3 Vlastní hluk elementů potrubní sítě

Při proudění tekutiny jednotlivými elementy vzduchotechnického zařízení jako jsou kanály, odbočky, kolena, výústky apod., mohou vznikat vedle turbulentních hluků také nežádoucí akustické ruchy vznikající rozkmitání stěny kanálu. Některé hluky vznikající v potrubní síti je možné za pomoci speciálních tlumičů hluku ztlumit. Všeobecně se dá tvrdit, že téměř každý element potrubní sítě může vystupovat jako zdroj aerodynamického hluku i jako útlumový prvek současně. [2]

Celková hladina akustického výkonu  $L_w$ , vznikající při proudění v přímých kanálech vlivem turbulentního proudění, lze vyjádřit následovně

$$L_w = 10 + 50 \log w + 10 \log S \quad (5.4.3.1)$$

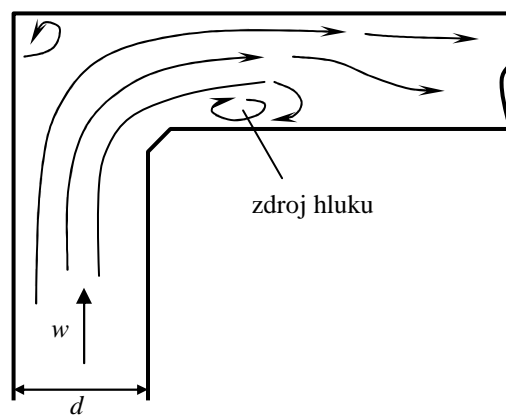
kde  $w$  je rychlost proudění vzduchu [m/s],

$S$  průřez potrubí [m<sup>2</sup>].

Z tohoto vztahu je zřejmé, že vzroste-li rychlost proudění dvojnásobně, znamená to zvýšení akustického výkonu o 15 dB.

Při proudění v potrubních kolenech dochází k náhlé změně směru proudění, čímž nastává odtržení proudnic od stěny potrubí a vytváří se tzv. úplav, který má za následek zvýšenou generaci aerodynamického hluku.

U jednoduchého pravoúhlého oblouku, jehož vnitřní poloměr  $r > 3d$ , nevzniká v daném kolenu větší aerodynamický hluk než odpovídající proudění vzduchu v přímém potrubí. [2]



Obr. 13 – Ukázka utržení proudnic v pravoúhlém kolenu [2]

Potrubí zařízení vzduchotechniky jsou zakončována vyústkami, kterými se vzduch odvádí nebo přivádí do potrubního systému. Koncové otvory jsou obvykle opatřeny různě tvarovanými mřížemi, kde stejně jako u klapek dochází při proudění tekutiny k periodickému odtrhávání vírů od jednotlivých částí vyústky. Tím vzniká fluktuací síla, která působí na mříže, které jsou zdrojem specifického zvuku. Vzhledem k tomu, že vyústky se vyznačují různou konstrukcí lopatek a mříží, je složité zapracovat do výpočetních vztahů různé tvarové úpravy.

## 6 TEORETICKÉ MOŽNOSTI STANOVENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ

Moderní akustika je subjekt s mnoha různými aplikacemi v praxi. Stanovení akustických parametrů strojního zařízení, lze provést experimentálně, na základě měření, nebo i teoreticky, pomocí poznatků z praxe a precizních matematických modelů. Většina velkých podniků ve vyspělých státech světa má týmy specialistů, kteří aplikují základní teoretické poznatky do praxe. Takovéto podniky se při výzkumu a vývoji nových zařízení, opírají o teoreticky vypočítané veličiny. Pomocné matematické modely pro stanovení akustických parametrů nejrůznějších zařízení jsou velmi složité, protože musí simulovat veškeré podmínky, kterých je poté zařízení reálně vystavováno. Tyto modely však stále představují jistou neurčitost, která se může odvíjet od nevhodnosti matematických výrazů, nedostatkem zkoumaných dat nebo nedokonalostí použitých metod. Proto musí být i veškeré teoretické předpoklady ověřeny praktickým měřením.

Určitou možnost teoretického stanovení akustických parametrů zařízení techniky prostředí nastiňuje předchozí kapitola zabývající se teorií mechanické generace zvuku. Tato kapitola je u určitých dílčích součástí zařízení, obohacena o funkční vztahy, které se používají v technické praxi. Zmiňovaný akustický výkon je však veličina, která úzce souvisí s teorií vlnění. Každému vlnění odpovídá různá frekvence nebo frekvenční rozsah. Je proto nezbytné uvádět u hladin akustického výkonu rozsah kmitočtů, kterému daná hodnota přísluší. Proto je však nutné znát charakteristiku vyzařování akustické energie pro jednotlivé dílčí součásti zařízení. Na základě znalosti veškerých informací o všech dílčích prvků strojního zařízení a jejich způsobu vyzařování akustické energie, lze teoreticky stanovit výslednou hladinu zkoumané akustické veličiny.



## 7 EXPERIMENTÁLNÍ MOŽNOSTI STANOVENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ

Problematikou experimentálního stanovení akustických parametrů strojních zařízení se zabývá řada norem ČSN EN ISO 3740 až 47 a ČSN EN ISO 11200. Měřicí postupy se člení na **měření laboratorní** a **měření provozní**. Pro podrobnější rozebrání dané problematiky měření je zapotřebí v následující kapitole objasnit několik pojmů týkajících se akustických polí.

### 7.1 Akustické vlastnosti uzavřených prostor

Při měření akustických vlastností určitého zařízení je možné se v praxi nejčastěji setkat se situací, kdy tak dochází v uzavřeném prostoru. Zdroj hluku je tedy umístěn v uzavřeném prostoru nebo je do daného prostoru přiváděn určitý akustický výkon např. vzduchotechnickým potrubím. Začne-li zdroj zvuku vyzařovat akustickou energii, bude se tato energie šířit všemi směry ve tvaru kulových vlnoploch, dokud nenarazí na překážku, v tomto případě na stěnu uzavřeného prostoru. Jelikož stěna není nikdy dokonale pohltivá, odrazí se vždy část akustické energie nazpět do prostoru. Vznikají tím tzv. **odražené vlny**, jejichž dráhy se navzájem křížují a překrývají.

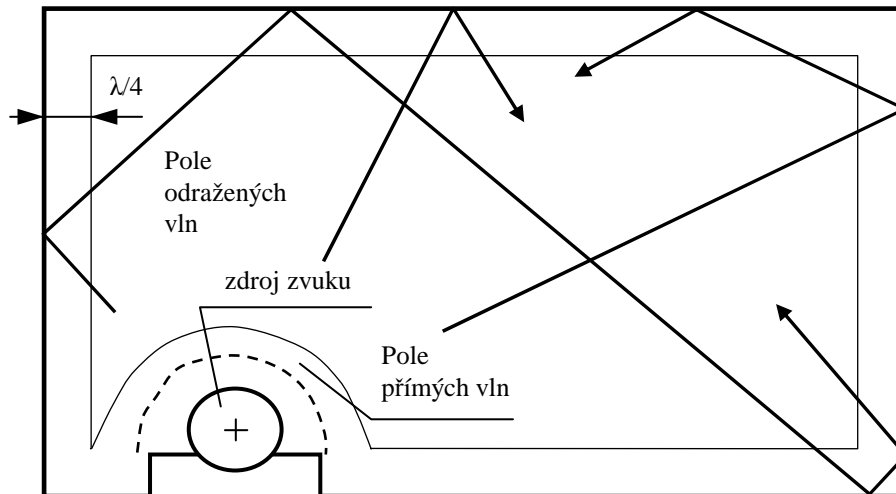
Za účelem zlepšení akustických podmínek je proto nutné porozumět vazbám mezi přítomnými akustickými zdroji, parametry příslušného prostoru a jejím geometrickým a akustickým charakteristikám.

#### 7.1.1 Typy akustických polí

Zdroj zvuku vytváří ve svém okolí akustické pole, jehož vlastnosti závisí zejména na

- umístění zdroje
- tvaru vyzařovacích ploch zdroje
- velikosti a tvaru prostoru
- okolních plochách a překážkách
- pohltivosti okolních stěn
- počtu zdrojů a jejich rozmístění

Ukázka akustického pole pravoúhlého uzavřeného prostoru je uvedena na Obr. 14. Na stěně takového uzavřeného prostoru je akustický tlak vždy na maximu, kdežto akustická rychlost má na stěně nulovou hodnotu. Akustická rychlost je proti akustickému tlaku fázově posunuta o  $\lambda/4$ . Z těchto poznatků vyplývá, že při měření hladiny akustického tlaku nesmí být mikrofón umístěn v malé vzdálenosti od stěny, protože by mohl být údaj zvukoměru až o 6 dB vyšší, než je v poli odražených vln.



Obr. 14 – Akustické pole pravoúhlého uzavřeného prostoru [3]

Tvar zvukového pole a tím i jeho vlnoploch ovlivňuje jakákoliv překážka vložená do cesty šířícím se akustickým vlnám. Zvukové vlny se od překážek odrážejí, pokud délka vlny dopadajícího zvuku je kratší, než jsou rozměry překážek (v opačném případě se uplatní více či méně difrakční jevy<sup>5</sup>). [3]

Podle charakteru šířících se vln lze rozdělit akustická pole na

- pole přímých vln – akustická energie se do prostoru šíří postupnými přímými vlnami
- pole odražených vln – akustická energie, která se odrazila zpět od odražejících ploch prostoru

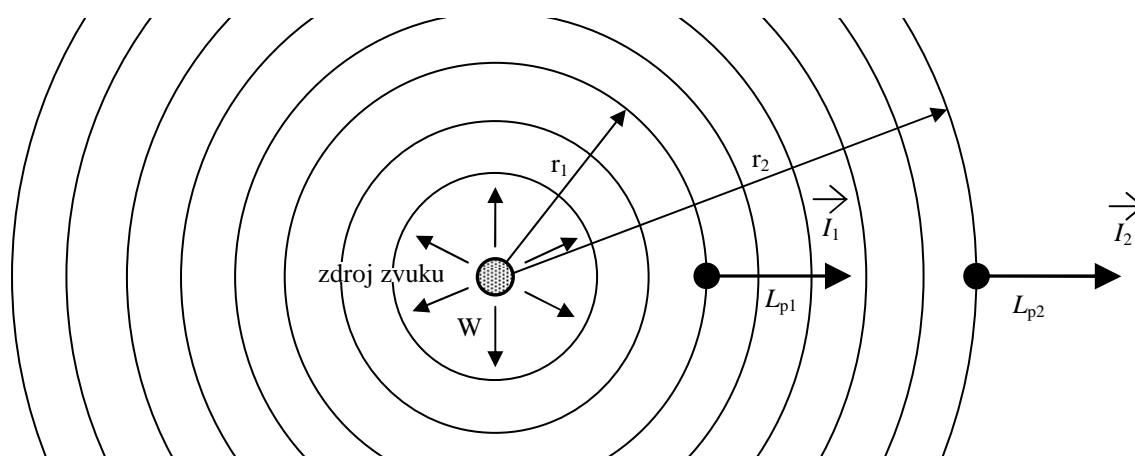
Dále je možné rozlišovat typy akustických polí na

- volné zvukové pole (akustické pole)
- difúzní pole

<sup>5</sup> Difrakčním jevem se rozumí deformace (ohyb) zvukových vln za překážku či roh budovy. Tento jev vysvětluje, jak se zvuk může šířit i za rohy.

### 7.1.2 Volné zvukové pole

U volného zvukového pole se předpokládá neomezené šíření akustické energie od zdroje do všech směrů rovnoměrně, přičemž amplituda se rovnoměrně zmenšuje. Rychlost kmitání částic je ve volném poli ve směru šíření akustických vln. Rovněž akustická intenzita je dána efektivní hodnotou akustického tlaku (2.2.6.5). V takovémto prostoru se zdvojnásobením vzdálenosti od zdroje zvuku klesá hladina akustického tlaku o 6 dB, stejně tak i jeho intenzita. Toto pravidlo ovšem platí pouze tam, kde šíření zvuku nestojí v cestě žádná překážka.

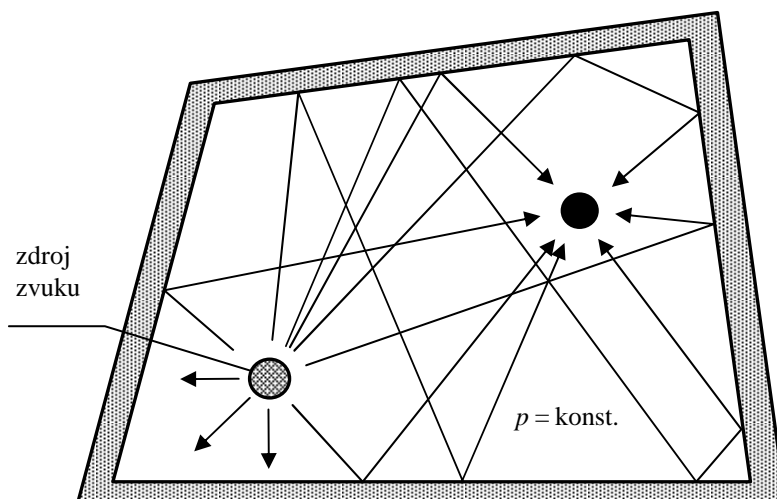


Obr. 15 – Volné zvukové pole

### 7.1.3 Difúzní zvukové pole

Za difúzní se dá považovat takové pole, kde je v každém bodě prostoru tok energie ve všech směrech se stejnou intenzitou avšak náhodnou fází. V důsledku mnohonásobných odrazů od stěn je akustický tlak rovnoměrně rozložen po prostoru. Na rozdíl od volného zvukového pole se u difúzního nemění intenzita pole s místem příjemce. Vlastnosti takového prostoru lze popsat pouze jedním parametrem a to dobou dozvuku, která bude objasněna v další kapitole. Takovýto prostor lze také označit za izotropní<sup>6</sup>. Je nutno podotknout, že žádný z dílčích povrchů takového uzavřeného prostoru nesmí mít absolutní pohltivost, neboť by pak difúzní pole nemohlo vzniknout.

<sup>6</sup> prostředí, které má ve všech směrech stejné fyzikální vlastnosti.



Obr. 16 – Difúzní zvukové pole

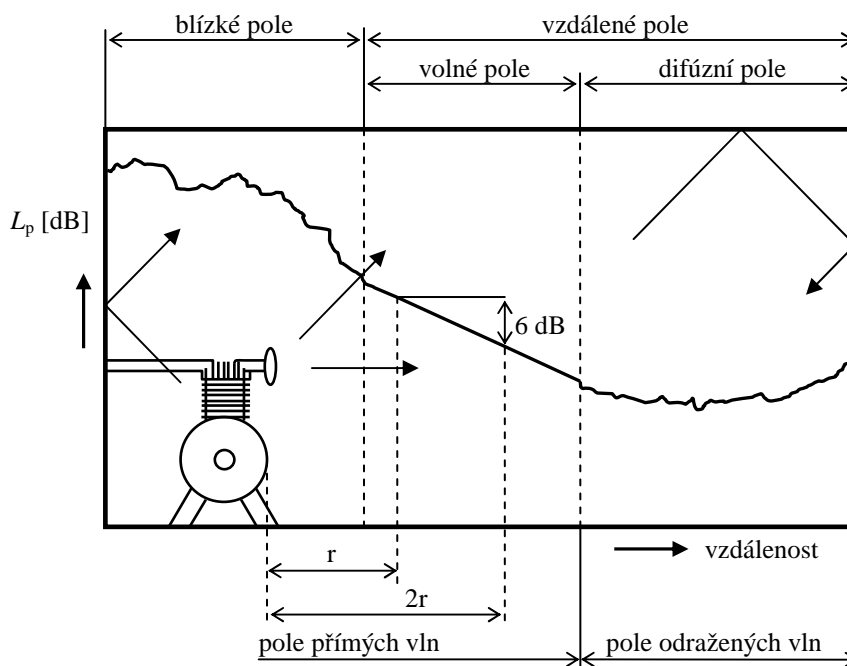
## 7.2 Zvuková pole uzavřených prostorů

Většina akustických měření strojních zařízení se provádí v uzavřených prostorech či místnostech. Charakter vyzařování akustických vln se liší podle vzdálenosti od zdroje. V těsné blízkosti zdroje není nutně rychlost kmitání pouze ve směru šíření akustických vln, jak tomu je ve volném poli. Tato část akustického pole nejbližší ke zdroji se nazývá tzv. **blízkým polem** (viz. Obr. 17). Charakteristickým rysem pro tuto část je výrazná změna akustického tlaku s měnící se vzdáleností od zdroje. Frekvence, charakteristický rozměr zdroje a fáze pohybů jednotlivých částí povrchu zdroje, určují vzdálenost od zdroje, do které se ještě jedná o blízké pole. Akustická intenzita zde není jednoznačně vztažena na efektivní hodnotu akustického tlaku. V praxi se pro stanovení akustických parametrů kvůli neurčitosti v měření akustických veličin tohle pole nevyužívá. [3]

Za blízkým polem se ve směru od zdroje nachází tzv. **vzdálené pole**, které nese vlastnosti difúzního i volného pole. Tato část pole je modifikována, neboť se zde sečítají přímé a odražené vlny. V důsledku odrazů vlnění od protějších stěn prostoru dochází k fluktuaci<sup>7</sup> akustického tlaku.

V obytných místnostech a kancelářích, vybavených nábytkem je akustické pole buď volné, nebo difúzní. Zde hladina akustického tlaku klesá o 3 dB s každým zdvojnásobením vzdálenosti. [3]

<sup>7</sup> nepravidelné a nesoustavné změny



Obr. 17 – Smíšené zvukové pole

### 7.3 Dozvuk

Za dozvuk je obecně požadována veškerá akustická energie, která se šíří prostorem po vypnutí zdroje zvuku. Vznik dozvuku je důsledkem mnohonásobného odrazu zvuku od stěn v uzavřeném prostoru. Dozvuk jako takový je velmi důležitý především z hlediska posouzení akustické kvality prostor. Z hlediska měření je především důležitá **doba dozvuku**. Norma ČSN ISO EN 354 ji specifikuje jako dobu v sekundách, během které dojde po vypnutí zdroje zvuku k poklesu hladiny akustického tlaku o 60 dB. S ohledem na objem místnosti a činitele zvukové pohltivosti je standardní doba dozvuku definována pomocí několika vtaů, přičemž každý je v praxi vhodný pro výpočet jiného typu prostoru. Vztah určující dobu dozvuku je

$$T = 0,164 \frac{V}{\alpha_m S} \quad (7.3.1)$$

kde  $V$  je objem místnosti [ $\text{m}^3$ ],

$\alpha_m$  střední činitel zvukové pohltivosti [-],

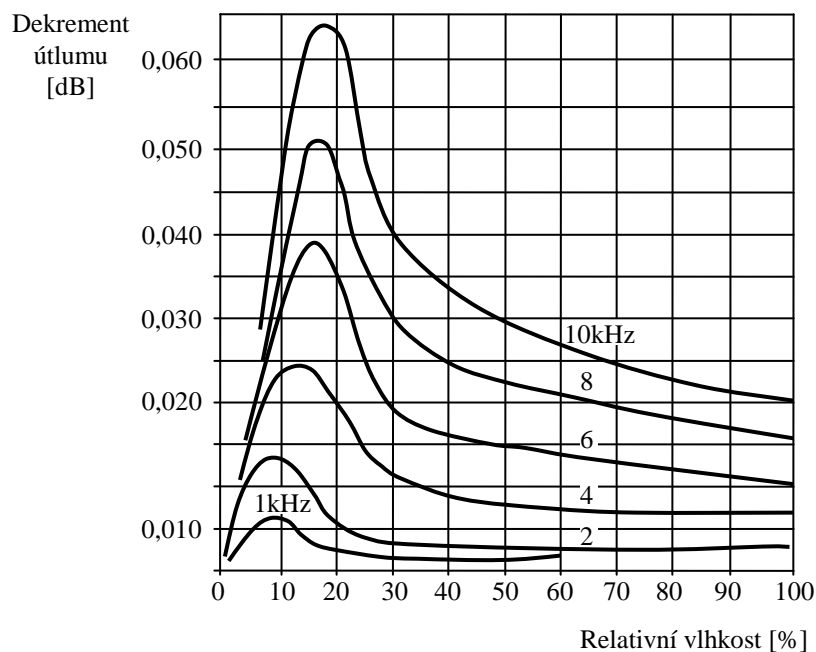
$S$  součet všech ploch ohraničujících místnost [ $\text{m}^2$ ].

Experimentálně bylo zjištěno, že tento vzorec ztrácí přesnost s rostoucí hodnotou činitele pohltivosti, protože teoreticky pro hodnotu  $\alpha_m=1$  by doba dozvuku odpovídala  $T=0$  s. Proto

postupem času docházelo k neustálému zdokonalování výpočtových vztahů, které již respektovaly možné útlumy z hlediska absorpce akustické energie ve vzduchu. Proto byl stanoven jako neuniverzálnější vzorec tzv. Eyringův, který předpokládá snížení intenzity akustické energie odraženou od jednotlivých ploch  $S_i$  a činitelem zvukové pohltivosti  $\alpha_i$ .

$$T = 0,164 \frac{V}{-\sum S_i \ln(1 - \alpha_i) + 4mV} \quad (7.3.2)$$

Kde  $m$  je dekrement útlumu, který závisí především na relativní vlhkosti vzduchu [dB].



Obr. 18 – Závislost dekrementu útlumu na relativní vlhkosti podle Knudsena a Harise [2]

Doby dozvuku pro určité místnosti předepisuje norma ČSN 730526.

## 7.4 Akustické komory

Pro experimentální stanovení akustických parametrů strojních zařízení se využívají tzv. akustické zkušební komory, jejichž prostředí umožňuje akustická měření. Cílem těchto prostorů je přiblížit se vlastnostem volného či difúzního pole, ve kterém lze popsat vztah mezi akustickým výkonem a akustickým tlakem. Snahou je také snížit nebo úplně potlačit nežádoucí zvuky z okolí, které by mohly ovlivňovat měření.

Měření akustického výkonu ve zkušebních komorách lze rozdělit na měření s **přesnou** (laboratorní), **technickou** (průmyslovou) nebo **orientační** třídou přesnosti.

### 7.4.1 Bezdozvukové komory

V bezdozvukové (anechoické) komoře s vysoce absorpčními povrchy dochází k šíření akustického vlnění jako ve volném poli. Takovéto pole má pouze přímé složky akustických veličin, tedy bez jakýchkoliv odrazů.

Povrchy bezdozvukové komory jsou opatřeny vysoce pohltivými materiály jako je minerální vlna nebo skleněná vata. Tyto materiály se vyznačují vysokou hodnotou součinitele zvukové pohltivosti. K dalšímu zvýšení pohltivosti stěn se dosahuje tzv. „zvětšením“ celkové pohlcující plochy komory použitím vysoce pohltivých materiálů ve tvaru dlouhých jehlanů, nazývaných také jako akustické klíny, nalepených na stěny komory. Optimální tvar takových klínů je vždy vypočítán pro daný rozměr komory, kdy se vždy jedná o určitý kompromis mezi mechanickými a akustickými vlastnostmi porézních materiálů. Tvar klínu ovlivňuje měřitelné frekvenční pásmo komory. Běžně se udává, že délka klínu se rovná  $\frac{1}{4}$  vlnové délky spodní frekvence měřitelného pásma. [11]

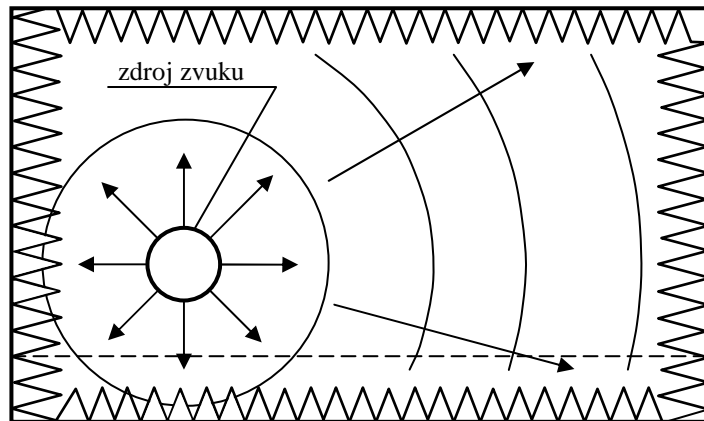
Bezdozvukové komory se používají pro přesná akustická měření bez jakýchkoliv přídatných rušivých prvků. Používá se například pro měření směrového diagramu zdroje, akustického výkonu zdroje apod. Jsou obzvláště vhodné pro měření zdrojů vyzařujících impulzní hluk nebo hluk obsahující diskrétní tóny např. hluk transformátoru. [11]

Vhodnost zkušební místnosti se může lišit podle vlastností zkoušeného zdroje zvuku. Proto v následující kapitole budou uvedeny základní typy bezdozvukových komor.

#### 7.4.1.1 Plně bezdozvukové komory

Veškeré zdi včetně stropu i podlahy jsou pokryty akustickou izolací. Podlahu tvoří zvukově transparentní železná síť. Právě kvůli způsobu provedení podlahy není možné provádět měření strojních zařízení s vyšší hmotností.

Měřicí plochou plně bezdozvukové komory je pole ve tvaru koule neboli sférické mikrofonní pole. To vyžaduje minimálně 20 měřených bodů. Poloměr sférického pole musí být menší než dvojnásobek charakteristické délky testovacího zařízení. Za určitých podmínek je vyžadováno až 40 měřících bodů. [11]



Obr. 19 – Plně bezdozvuková komora

Hlavními důvody, které vedou k výstavbě plně bezdozvukové komory jsou vysoká přesnost měření a zachování informací o směrovosti zdroje. Určováním hladin akustického výkonu plně bezdozvukové komory se zabývá norma ČSN EN ISO 3745.

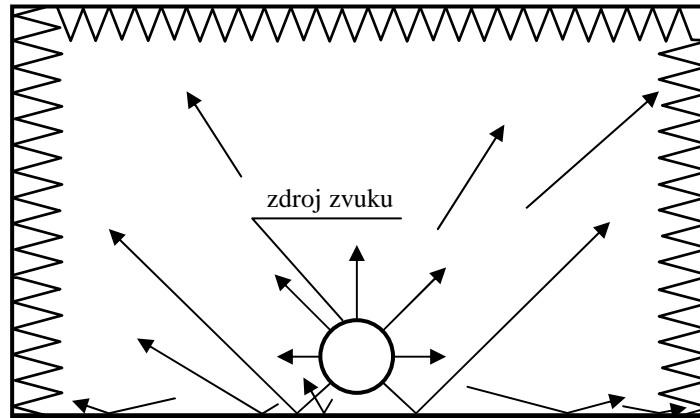
#### 7.4.1.2 Polobezdozvukové komory

Některá strojní zařízení jsou příliš velká a těžká na to, aby mohly být umístěny a proměřovány v plně bezdozvukové komoře. Některé stroje musí být navíc spojeny přímo s podlahou. Proto se v těchto případech využívá akustického prostoru nazývaného polobezdozvukovou neboli semi-anechoickou komorou. Polobezdozvukové komory se od plně bezdozvukových komor liší tvrdou podlahou s předepsanou zvukovou odrazivostí. Součinitel zvukové pohltivosti podlahy se pohybuje do hodnoty 0,06. Tato podlaha však značně komplikuje kvalifikační měření komory. Při měření je proto nutné následovat postupy, které zohledňují odrazivou plochu.

Pro přesné měření akustického výkonu je zapotřebí alespoň 10 mikrofonů, které vytvoří sférické pole (jen polokulové). Poloměr pole musí být menší než dvojnásobek charakteristického rozměru zdroje. Určováním hladin akustického výkonu pro přesné měření popisuje norma ČSN EN ISO 3745.

Pro technické měření akustického výkonu, je možné měřit v poli tvaru pravoúhlého rovnoběžnostěnu. To značně snižuje požadavky na velikost komory u vysokých strojů. Určováním hluku pomocí akustického tlaku pro technické měření se zabývá ČSN EN ISO 3744.





Obr. 20 – Polobezdozvuková komora

### 7.4.2 Dozvukové komory

Dozvukové (difúzní) komory jsou vytvořeny tak, aby byly jistou aproximací difúzního akustického pole. Stěny a všechny povrchy takové místnosti jsou navrženy tak, aby disponovaly co nejmenší hodnotou součinitele zvukové pohltivosti, čili byly co nejvíce odrazivé. Snahou je, aby v nich bylo dosaženo dlouhé doby dozvuku a oblast přímých vln v okolí zdroje byla co nejmenší.

Odezva dozvukové komory na nízkofrekvenční širokopásmový hluk vykazuje několik vrcholů odpovídajících vlastním frekvencím vzdušného obsahu komory. Jestliže sledovaná frekvence vzrůstá, vzdálenost mezi jednotlivými vlastními kmitů<sup>8</sup> se zkracují. Při dalším zvyšování frekvence dochází k překrývání odezvy komory u jednotlivých vlastních kmitů, takže pak jsou odezvy málo zřetelné. Tímto jevem dochází k zesilování zvuku v dané komoře. Od jisté frekvence se odezva komory na pásmový hluk stává přibližně konstantní, stejně tak vlastnosti akustického pole se stávají rovnoměrnější a odezva komory může být popsána statickými vztahy. Tato frekvence  $f_k$  se označuje jako kritická a byla stanovena experimentálně následujícím vztahem

$$f_k = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (7.4.2.1)$$

kde  $T$  je doba dozvuku [s],

$V$  objem místnosti [ $\text{m}^3$ ].

<sup>8</sup> vlastními kmity jsou nazývány frekvence, na kterých při shodě s budícím signálem dochází v důsledku stojatého vlnění k rezonancím, které narušují celkovou difuznost prostoru

Nad touto frekvencí je již splněno kritérium difúznosti prostoru. Pro dosažení rovnoměrnější odezvy komory při nízkých frekvencích je obvykle účelné použít nízkofrekvenčních akusticky absorpčních členů na stěnách a stropu komory. Běžné je také používání rotujících difuzorů nebo pevných panelů zavěšených v náhodných místech, polohách a orientacích prostoru. [3]

Měření v dozvukové komoře jsou používána pro zjištění zvukově absorpčních vlastností různých materiálů, akustických výkonů zdrojů zvuku a pro měření přenosu zvuku skrze stavební elementy (pláty, okna, panely, desky, apod.). Podle zmíněných účelů využívání komory se odvozují její konstrukční parametry a to především dostatečný objem a správný tvar. Pro měření zvukové pohltivosti s fyzikální přesností by podle ČSN EN ISO 354 měla komora mít objem větší než  $125 \text{ m}^3$ , v ideálním případě by však měla mít nad  $200 \text{ m}^3$ . Neměla by ale přesahovat  $500 \text{ m}^3$ , jelikož v takovém případě dochází již k útlumu zvuku na vysokých frekvencích a měření zvukové pohltivosti se tak v tomto pásmu stává nepřesné. Tato velikost ovšem neplatí u měření akustického výkonu. Zde platí zásada podle ČSN EN ISO 3741 a ČSN EN ISO 3743, že objem komory by měl být 100 krát větší než objem zdroje zvuku. Důležitým faktorem je i tvar komory, který musí být takový, aby byla splněna podmínka

$$l_{\max} < 1,9V^{\frac{1}{3}} \quad (7.4.2.2)$$

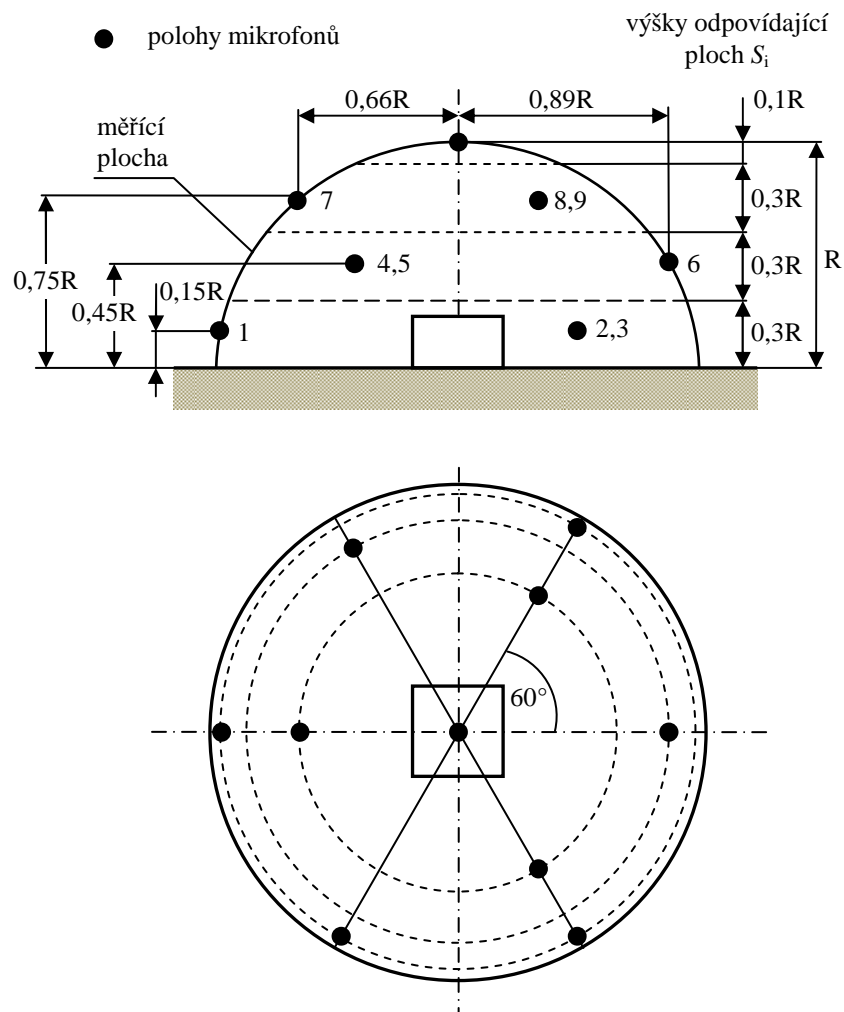
kde  $l_{\max}$  je nejdelší možná vzdálenost dvou bodů na kraji místnosti (v pravoúhlém prostoru se jedná o tělesovou úhlopříčku). Dalším požadavkem na tvar je i to, aby velikosti stran místnosti nebyly v poměru malých, celých čísel a aby vždy dvě protější stěny včetně stropu a podlahy nebyly rovnoběžné (Obr. 16). Všechny tyto podmínky jsou důležité pro to, aby bylo dosaženo vhodného rozložení vlastních kmitů na nízkých frekvencích.

Hlavními důvody, které vedou k výstavbě dozvukové komory, je zjednodušené měření akustického výkonu, kdy lze často použít jediný mikrofon, umožňující měření velice tichých zdrojů. Nevýhodou těchto komor je, že při měření dochází ke ztrátě informace o směrovosti zdroje. Rovněž nejsou vhodné pro měření zdrojů impulzního hluku.

## 7.5 Měření ve volném zvukovém poli

Nejpřesněji mohou být měřeny hladiny akustického výkonu zdroje v prostředí volného pole v bezdozvukové komoře. Běžné je akustický výkon určovat nepřímo, použitím prostorově průměrovaného čtverce akustického tlaku, měřeného na stejné ploše uzavřeného měřicího prostoru.

Norma ČSN EN ISO 3745 popisuje tři různé metody měření ve volném zvukovém poli. Každá z metod doporučuje umístění měřicích mikrofonů na fiktivní měřicí ploše tvaru polokoule, jejíž střed je umístěn ve středu zdroje zvuku. Je požadováno, aby poloměr polokoule byl nejméně dvakrát větší, než je hlavní rozměr zdroje nebo čtyřikrát větší než je průměrná vzdálenost zdroje od odražející plochy. Jedna z variant rozmístění měřicích mikrofonů je na Obr. 21.



Obr. 21 – Měřicí plocha tvaru polokoule [3]

## 7.6 Měření v difúzním poli

Prostory využívající difúzní pole pro měření akustického výkonu jsou z hlediska konstrukce výrazně levnější než prostory používající volné pole. Zajištění difúznosti komory není snadné, zejména na nízkých frekvencích a pokud zdroj vyzařuje čisté tóny. Na nejnižší frekvenci závisí také minimální objem komory.

Akustický zdroj je vhodné umístit od kterékoliv stěny. V difúzním poli je ustálená akustická energie zdroje v místnosti, rovna rozdílu mezi akustickou energií dodávanou zdrojem a energií absorbovanou plochami místnosti.

Při umístitování mikrofónů je potřeba dbát na to, aby se nenacházely v poli přímých vln zdroje zvuku. Za předpokladů splnění podmínek difúzního pole, by teoreticky nebylo třeba volit několik poloh mikrofónu a zdroje a stačilo by jedno měření. Ovšem v praxi se musí počítat s různým kolísáním v závislosti na poloze zdroje a mikrofónů, a rozmístění se volí hlavně s ohledem na zjištění rozdílů doby dozvuku v daném prostředí. [12]

Při umístitování je vhodné, aby mikrofóny byly od sebe vzdáleny alespoň polovinu maximální vlnové délky a vzdálenost mikrofónů od odrazivých ploch by neměla být menší než čtvrtina maximální vlnové délky. Při měření střední hladiny akustického tlaku, by mělo měření probíhat alespoň po dobu 30s při měřené frekvenci pod 160 Hz a nejméně 10s pro frekvence nad 200Hz. [3]

## 7.7 Měření v místech pobytu osob

Metody měření hluku v místech pobytu osob, se používají pro stanovení údajů o hluku na pracovních místech strojů, v prostorech uvnitř či vně budovy a to podle standardizovaných metod ČSN EN ISO 11200 až 11204.

V reálných provozních podmínkách není vytvořeno bezdozvukové ani dozvukové pole. Dochází zde k často nekontrolovaným odrazům zvuku a téměř vždy je přítomen zvuk pozadí. V takových provozních podmínkách je nutno akustický výkon stroje zjišťovat měřením akustické intenzity na uzavřené měřicí ploše kolem zdroje hluku. A to z toho hlediska, že akustická intenzita přímo popisuje akustický výkon procházející jednotkovou plochou.

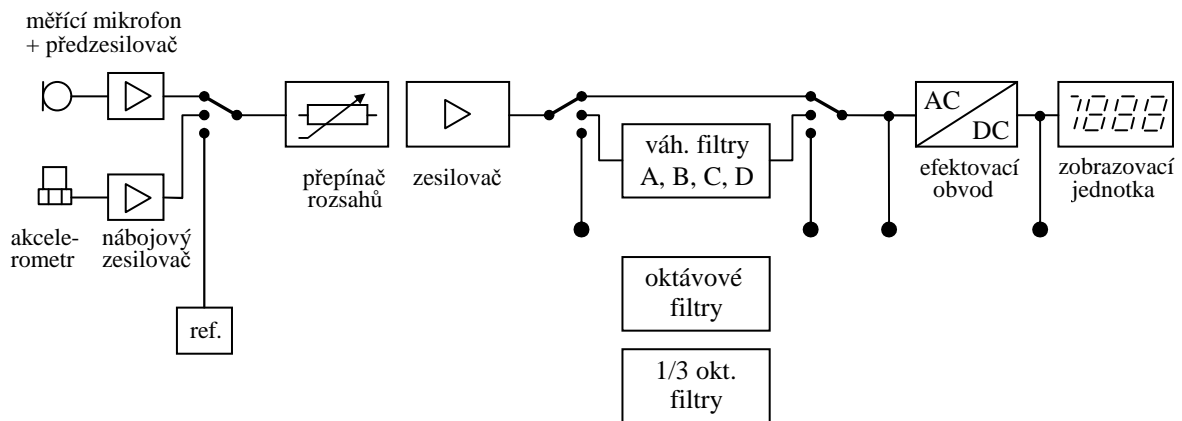
## 8 PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ AKUSTICKÝCH MĚŘENÍ

Zvukoměrné přístroje tvoří hlavní pomůcky, které používáme při měření hluku. Na jejich kvalitě a funkci závisí výsledek měření. Na zvukoměrné přístroje jsou kladeny požadavky shrnuté v normě ČSN EN 61672.

### 8.1 Zvukoměry

Zvukoměr je základním přístrojem pro měření akustických veličin. Konkrétněji se jedná o elektronické měřicí zařízení, které umožňuje objektivní a reprodukovatelné měření hladin akustického tlaku.

V podstatě se jedná o měřicí řetězec, složený z jednotlivých částí (viz Obr. 22). V současné době i zcela běžný zvukoměr představuje podstatně komplikovaný měřicí řetězec. Nejdůležitějším rozšířením, které přinesla moderní digitální technika, je zabudovaný frekvenční analyzátor v reálném čase, který je v tomto schématu vyznačen jen jako sada filtrů.



Obr. 22 – Blokové schéma zvukoměru

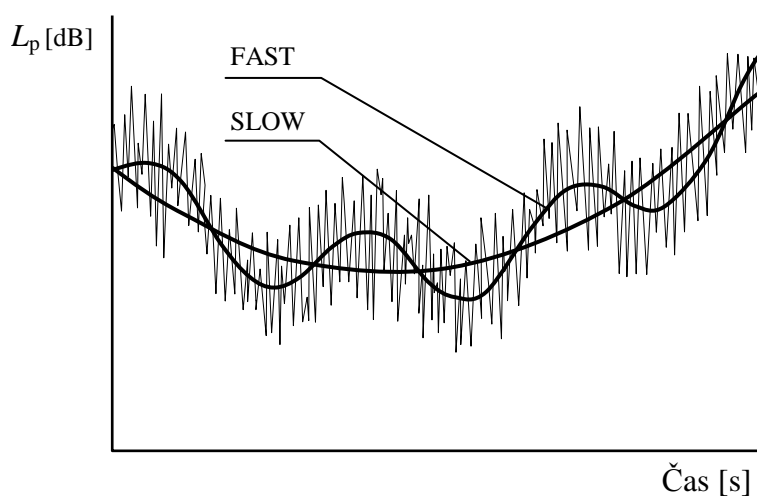
Akustickým měničem na vstupní části je ve většině případů mikrofon, ovšem za pomoci redukce lze na velké množství zvukoměrů zapojit i jiné měniče např. snímač rychlosti. Tento akustický měnič se stará o převod akustického signálu na signál elektrický. Výstup z akustického měniče má zpravidla velmi malé amplitudy, proto je v bezprostřední vzdálenosti za mikrofonem umístěn zesilovač s velkým vstupním odporem. [10]

Zvukoměr dále obsahuje části, které již souvisí se zpracováním signálu a zobrazováním výsledků měření a mohou být, ať už některé nebo všechny, realizovány digitálně. Nejprve

bývá zařazen modul, který umožňuje různé druhy filtrací. Zvukoměry standardně obsahují váhové filtry A, B, C popř. D a také možnost interní nebo externí připojení oktávové nebo třetinooktávové filtrace.

Důležitou součástí, která do značné míry určuje třídu přesnosti zvukoměru, je převodník střídavého signálu na stejnosměrný tzv. efektovací obvod. V analogovém provedení je výstupem napětí úměrné efektivní hodnotě vstupujícího střídavého napětí.

Zobrazovací jednotka je již převážně digitální, její dynamické vlastnosti jsou však odvozeny od ručičkových měřidel, jejichž rychlost reakce na změnu signálu závisí na mechanických a elektrických vlastnostech měřidla. Ty udávají časovou konstantu, která pak odpovídá přibližné době, po kterou je zobrazená hodnota (Obr. 23). Normou jsou stanoveny časové konstanty S (slow) 1s, F (fast) 200ms a I (impuls), která je nesymetrická a pro náběh má hodnotu 35 ms a pro doběh 2 s. Požadavky na elektroakustické parametry zvukoměrů jsou ve výše zmíněné normě ČSN EN 61672 a jejich dodatcích.



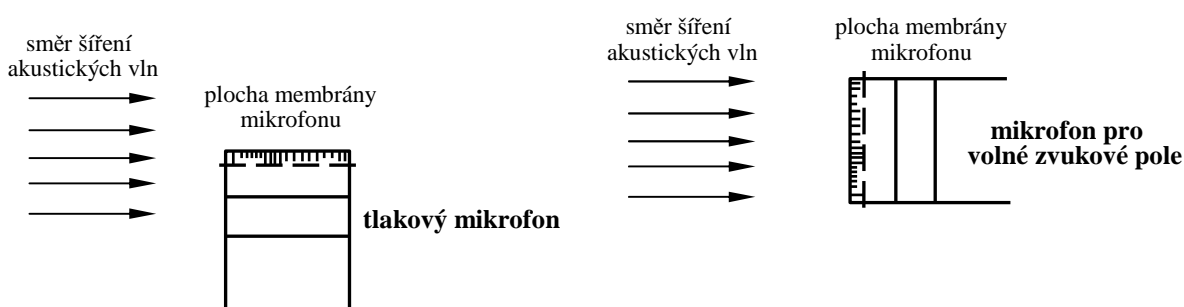
Obr. 23 – Vliv časových konstant na vyhodnocení měření

## 8.2 Mikrofony

Zvláštní pozornost je třeba věnovat nejdůležitější částí celého řetězce zvukoměru a tj. mikrofonu. Vlastnosti a parametry měřícího mikrofonu musí vyhovovat podmínkám příslušných mezinárodních norem. Jedním veledůležitým požadavkem je co možná nejvěrohodnější kmitočtová charakteristika v širokém rozsahu kmitočtů. Dalším důležitým prvkem je všesměrovost mikrofonu, tzn. stejná citlivost ke všem akustickým vlnám dopadajícím pod různými úhly. Všesměrovost je zvlášť důležitá při měření v dozvukové

komoře. V tuto chvíli je vhodné poznamenat, že přítomnost jakéhokoli mikrofonu nezbytně narušuje akustické pole, ovšem kvalitní měřicí mikrofony již automaticky vnášejí korekci na svou vlastní rušivou přítomnost. [10]

Při měření zvuku ve volném zvukovém poli, je třeba mikrofón, optimální pro volné pole, nasměrovat přímo proti zdroji zvuku, aby docházelo k dopadu akustických vln kolmo na membránu mikrofonu, zatímco kapacitní mikrofón je potřeba umístit tak, aby jeho membrána ležela rovnoběžně se směrem šíření akustické vlny (Obr. 24).



Obr. 24 – Poloha měřícího mikrofonu [10]

Mikrofon používaný při měření v difúzním poli by měl co nejlépe splňovat podmínky všesměrovosti. Jak již bylo nastíněno, samotná přítomnost mikrofonu či jiných objektů v akustickém poli může znehodnotit všesměrovost mikrofonu. Při měření v difúzním poli to platí dvojnásob. Z tohoto důvodu se mikrofony vzdalují od přístroje a operátora pomocí nástavců a prodlužovacích mikrofonních kabelů. Experimentálně bylo dokázáno, že na kmitočtech od 400 Hz mohou odrazy od lidského těla zvyšovat měřené údaje až o 6 dB v případech, kdy vzdálenost mezi mikrofonem a povrchem těla byla menší než 1m.

Kromě vlastního operátora je mikrofón také ovlivněn podmínkami okolního prostředí (teplota, tlak, proudění vzduchu). Z hlediska teploty umožňují zvukoměry přesná měření v běžném rozsahu teplot -10 až 50 °C. V každém případě je nutné se vyhýbat rychlým změnám teploty, které by mohly způsobit kondenzaci vodních par uvnitř přístroje. U rozmezí změn tlaku  $\pm 10\%$  lze vliv na citlivost mikrofonu zanedbat, jedná se o změny do 0,2 dB, ovšem při větších změnách tlaku už nejsou vyloučeny mnohem markantní změny, zejména v oblasti vysokých kmitočtů. Další možnou příčinou vzniku intenzivního hluku může být proudění vzduchu kolem membrány mikrofonu, vyvolané působením větru. Tento nežádoucí vliv lze téměř vyloučit nebo alespoň snížit na přijatelnou mez pomocí

speciálních krytů mikrofonů. Obvykle je používán kryt kulového tvaru z pěnového polyuretanu, který chrání mikrofon i proti prachu a vlhkosti. [10]

V současné době se vyskytuje mnoho typů mikrofonů, z nichž každý využívá jiný princip zpracování signálu. Je možné se setkat s magnetoelektrickými mikrofony, uhlíkovými mikrofony či elektretovými mikrofony, který má velkou citlivost a malé rozměry. Ovšem nejčastěji se u zvukoměrů využívá mikrofon kapacitní neboli také tlakový.

### **8.2.1 Kapacitní mikrofon**

Kapacitní mikrofon se využívá převážně tam, kde jsou kladeny přísné požadavky na malé rozměry, odolnost vůči vnějším vlivům a především na časově stálou kmitočtovou charakteristiku mikrofonu.

Funkce tohoto typu mikrofonu je založena na podobném principu jako snímače, které mají proměnlivou vzdálenost mezi dvěma elektrodami. První elektroda je pevná a kruhového tvaru. Aby nedošlo k dotyku s tělesem mikrofonu, tak je od něj elektroda izolována. Druhá elektroda je tvořena tenkou pružnou membránou. Prostor mezi elektrodami je velice malý a je vyplněn vzduchem, který slouží jako dielektrikum. V momentě, kdy dopadne akustická vlna na membránu, dojde k prohnutí membrány a díky tomuto prohnutí se změní vzdálenost mezi membránou a pevnou elektrodou. Jelikož je na elektrodách udržován konstantní náboj dochází se změnou vzdálenosti, také ke změně napětí.

### **8.2.2 Tlakový mikrofon**

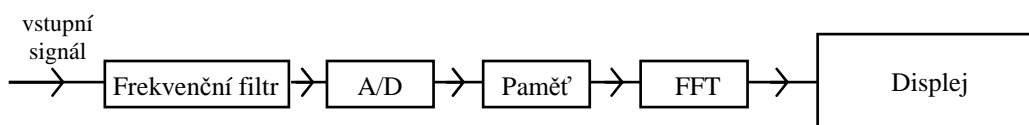
Tlakový mikrofon je vhodné použít do prostoru, kde se předpokládá všesměrový dopad akustických vln. Tento typ mikrofonu se vyznačuje tím, že tlaková síla vyvolaná akustickým tlakem působí pouze na jednu stranu membrány mikrofonu. Amplituda kmitů membrány, nezávisí na směru, v němž leží zdroj zvuku, ani na vzdálenosti zdroje zvuku od mikrofonu, ale jen na akustickém tlaku.

Tlakové mikrony s elektrostatickým měničem se vyznačují plynulou kmitočtovou charakteristikou bez prudkých zlomů a náhodného zvlnění. Pokud je mikrofon tohoto druhu pečlivě zhotoven, vyniká stabilitou, a lze ho použít pro měřicí účely.



### 8.3 Analyzátory zvuku

Dříve tento termín označoval zařízení, které bylo uzpůsobeno především pro frekvenční analýzu různých akustických signálů a oproti zvukoměru bylo v mnoha směrech výkonnější. S nástupem digitálních technologií a zvýšenými nároky na rozměry přístrojů, se tento rozdíl postupně stírá a analyzátozem je rozuměno zařízení více či méně stacionární, které je určeno pro rozsáhlejší měření analýzy. Nicméně současné moderní zvukoměry ve většině případů obsahují možnost třetinooktávové nebo FFT (rychlé Fourierovy transformace) analýzy v reálném čase, časovým záznamem signálu nebo i více paralelních kanálů, které umožňují kombinace různých druhů zpracování signálů. Všechny moderní zvukoměry již nabízí tu možnost přenosu dat do počítače, ty lepší pak i obousměrnou komunikaci, čímž představují přenosný analyzátor pro všeobecné akustické použití.



Obr. 25 – Blokové schéma činnosti digitálního analyzátoru

Obr. 25 zobrazuje blokové schéma činnosti digitálního analyzátoru. Z tohoto schématu je vidět, že mezi hlavní části analyzátorů patří frekvenční filtry, které při měření propouštějí pouze frekvence ležící uvnitř nastaveného pásma propustnosti. Takto filtrovaný signál se dále přivádí na A/D převodník, kde dojde pomocí vhodného způsobu k navzorkování zvukového signálu. Digitální analyzátor dále obsahuje paměť, která až v ní bude uloženo dostatečné množství vzorků, poskytnou tyto vzorky procesoru k vypočítání spektra pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Výsledné spektrum se následně zobrazí na displeji.

Značná část hluků, se kterými se lze v praxi setkat, má nepravidelný průběh v čase, což ztěžuje vlastní měření. Provede-li se však záznam, je možné kdykoliv později studovat charakter a hodnoty měřené veličiny.

### 8.4 Hlukový dozimetr

Dozimetr je zvukoměr, vyhodnocující přímé měření hlukové zátěže, pracující v hlučných provozech a signalizující překročení maximálně přípustné expozice v průběhu pracovního dne. Výsledky jsou udávány např. v ekvivalentních hladinách hluku s váhovým filtrem A nebo v procentech nastavené limitní hlukové dávky.

## 8.5 Referenční zdroj zvuku

Nejedná se o zařízení, které by podléhalo přímé specifikaci. Teoreticky lze říci, že se jedná o určitý typ zdroje akustické energie, který disponuje takovými vlastnostmi, jež jsou specifické pro daný účel měření. Všeobecnou snahou je, aby tento zdroj akustické energie vyzařoval zvuk rovnoměrně do všech směrů s určitým charakterem vyzařování (širokopásmový, úzkopásmový zvuk). Požadavek je také kladen na stálost vyzařování akustické energie v určitém časovém horizontu. Proto, aby získané výsledky byly spolehlivé a reprodukovatelné, musí každý referenční zdroj zvuku podléhat individuální akreditované kalibraci podle platné normy ISO 6926.

Z mechanického hlediska se převážně jedná o zařízení, využívající shluk reproduktorů, orientovaných do všech směrů. Takové zařízení nesmí měřitelně zasahovat do zvukového pole, a proto je dodáváno s teleskopickými stojany pro různé výškové polohování. Tento typ referenčního zdroje zvuku, bývá využíván pro měření zvukové neprůzvučnosti či doby dozvuku. Odlišný konstrukční systém referenčního zdroje zvuku se může sestávat například z ventilátoru poháněného elektromotorem, disponujícím konstantní rychlostí otáček. Celá konstrukce je poté navržena tak, aby docházelo k minimálním odrazům akustické energie od konstrukce. Tento typ referenčního zdroje se používá pro účely stanovení akustického výkonu zdrojů.

Měření s referenčním zdrojem zvuku slouží především k frekvenční analýze hluku stroje, tj. stanovení hladin akustického výkonu v oktávových pásmech slyšitelného spektra na základě užití metod podle norem ČSN EN ISO 3741 a ČSN EN ISO 3747. Metody uvedené v těchto normách jsou vhodné pro měření zdrojů, které vyzařují širokopásmový hluk, úzkopásmový hluk, diskrétní tóny nebo kombinace těchto hluků a jsou vhodné zejména pro zdroje vyzařující ustálený hluk.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 9 CHARAKTERISTIKA LABORATOŘE TECHNIKY PROSTŘEDÍ

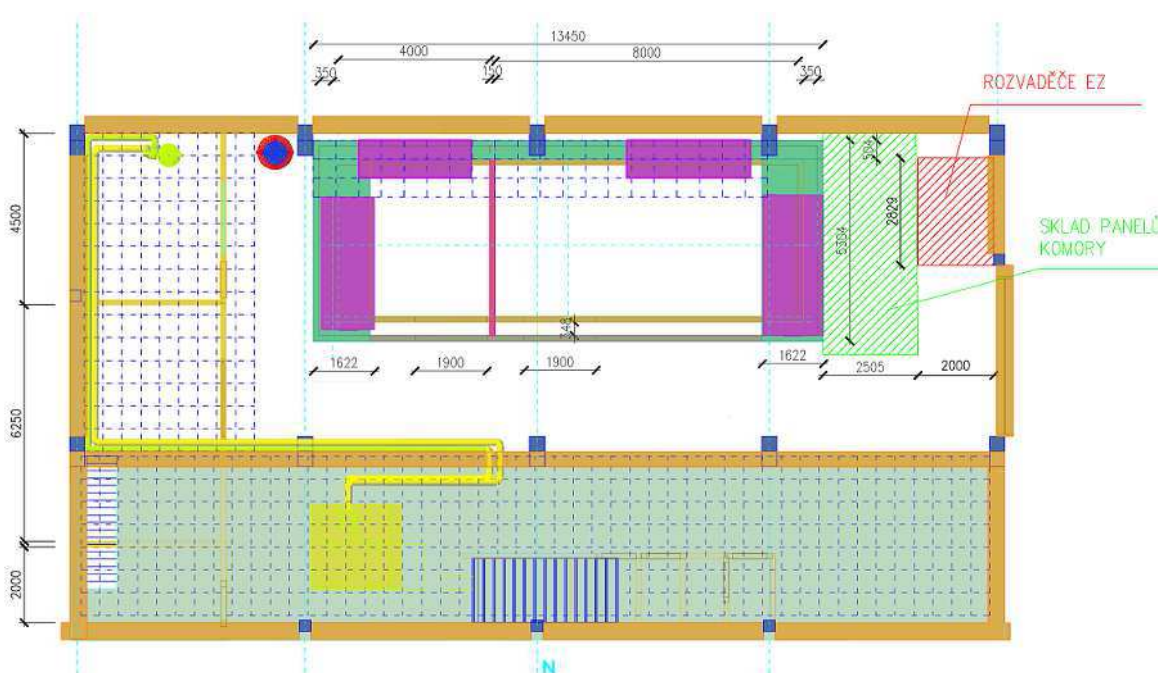
V této kapitole je popsán a charakterizován konkrétní objekt připravované výstavby laboratoře techniky prostředí. Při popisu jsem převážně vycházel z dokumentace, kde jsem ovšem neměl potvrzeno, že se jedná o finální verzi skutečného provedení. Proto bych rád zdůraznil, že následující popis technického řešení laboratoře se může lišit od skutečně v budoucnu realizovaného.

Na následujících stranách je uveden popis rozhodujících parametrů kalorimetrické komory, jako jsou geometrické a izolační parametry stavební konstrukce, rozbor možností využití komory a výčet základních parametrů zkoušených zařízení techniky prostředí.

Účelem laboratoře je vybudovat specializované pracoviště, které bude sloužit, jak k měření a testování technických parametrů, tak i k výzkumu a vývoji, prvků a zařízení techniky prostředí (tepelné, vzduchotechnické, chladicí a regulační zařízení).

### 9.1 Popis pracoviště laboratoře techniky prostředí

Pro vznik laboratoře techniky prostředí bylo kvůli dispozičním možnostem, návaznosti na možný dosah jeřábu a vhodností přístupové cesty, zvolen prostor haly v již zrealizované novostavbě CEBIA-Tech.



Obr. 26 – Schematické půdorysné umístění laboratoře techniky prostředí v hale

Základní pracoviště laboratoře by se mělo sestávat z univerzální kompenzované kalorimetrické komory, tratě vzduchotechnických a hydraulických prvků, měřicí a řídicí kabinky a pomocných prostor, které by byly převážně využívány jako přístrojové úložiště či mechanická dílna. Stavba by měla být situována v blízkosti rozvodné skříně a skladu panelů komory.

Požadavkem je, aby laboratoř splňovala veškeré náležitosti, z hlediska konstrukce a použitého zařízení, aby bylo možné na základě měření stanovit:

- výkonové energetické parametry při proměnných podmínkách prostředí,
- akustické parametry,
- parametry distribuce vzduchu,
- parametry řízení a monitorování datového přenosu.

Dalším požadavkem je, aby laboratoř svým zařízením a parametry, splňovala veškeré podmínky k tomu, aby mohla být později provedena její akreditace podle existujících legislativních předpisů a platných norem.

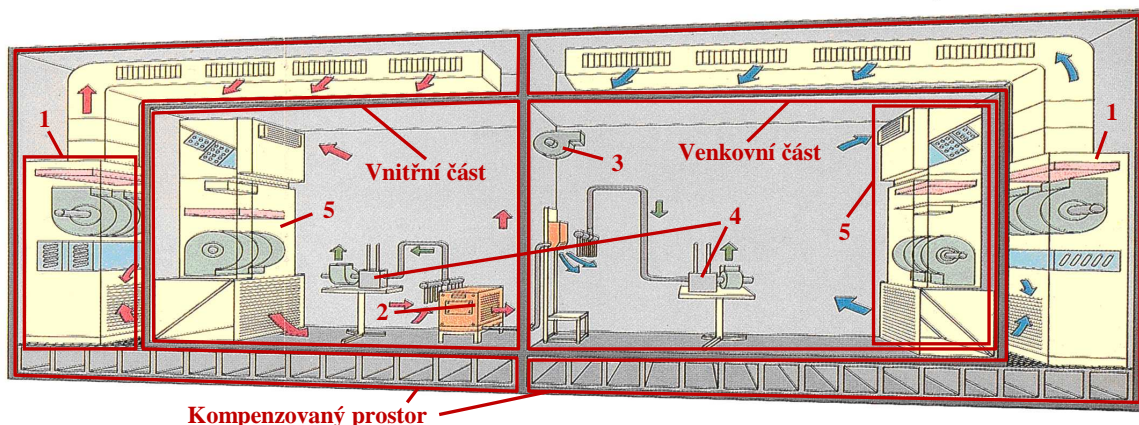
## 9.2 Univerzální kalorimetrická komora

Jedná se o zařízení, díky kterému je možné vytvořit izolované vnitřní prostředí s nastavitelnými parametry teploty, vlhkosti a tlaku vzduchu. Snahou je nasimulovat takové podmínky, se kterými se měřená zařízení v provozu reálně potýkají.

Právě kvůli zkoušeným zařízením, čímž mají být chladicí jednotky, split systémy, tepelná čerpadla a další vybrané vytápěcí prvky, kdy je účelem zkoušky zjistit chladicí a topný výkon jednotky, podle přesně daných okrajových podmínek, včetně extrémních teplot, je nezbytné simulovat podmínky venkovního i vnitřního prostoru. Proto se v dokumentaci počítá s výstavbou dvoukomorové kalorimetrické komory.

Vzhledem k tomu, že daná laboratoř by měla umožňovat měření parametrů s přesnou nebo technickou třídou přesnosti, je zapotřebí co nejlépe eliminovat tepelné ztráty a zisky. Tento problém řeší z velké části volba použití kalorimetrické komory s kompenzovaným prostorem, kde se ztrátový výkon a zisky eliminují tím způsobem, že se v kompenzačním prostoru, obklopující vnitřní nebo venkovní stranu měrné části komory, udržují stejné teplotní podmínky, jako jsou ve vnitřních částech komory. Jak ukazuje Obr. 27, v každé

části kompenzačního prostoru je umístěna jedna jednotka udržující teplotu vzduchu tak, aby tepelný tok přes stěnu oddělující zkušební a kompenzační prostor komory, byl nulový popřípadě s dovolenou tolerancí. Jednotka tak tedy kompenzuje tepelné ztráty nebo zisky mezi prostorem klimatizované haly a prostorem zkušební kalorimetrické komory.



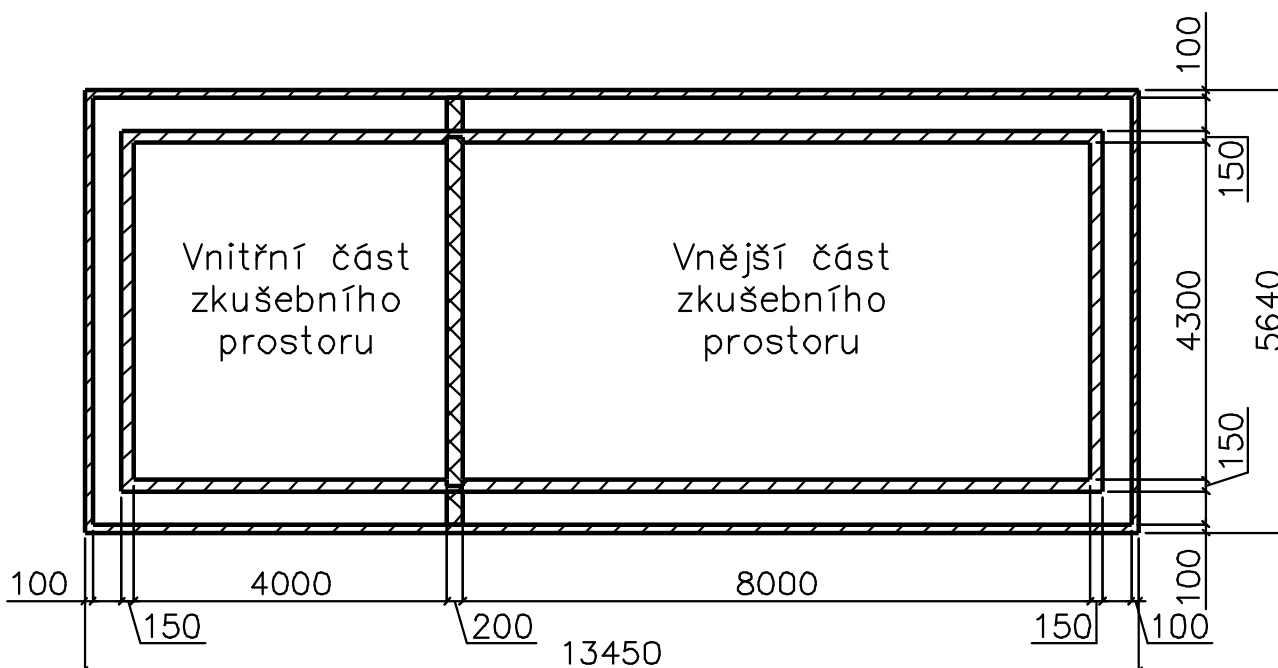
Obr. 27 – Ukázka kompenzované kalorimetrické komory [13], 1 – jednotky kompenzačního prostoru (chladič, ohříváč, zvlhčovač, ventilátor, stratifikátor<sup>9</sup>), 2 – zkoušené zařízení, 3 – zařízení pro vyrovnání tlaku vzduchu, 4 – zařízení pro odběr vzorku vzduchu, 5 – jednotky zkušebního prostoru

### 9.2.1 Geometrické a konstrukční řešení univerzální kalorimetrické komory

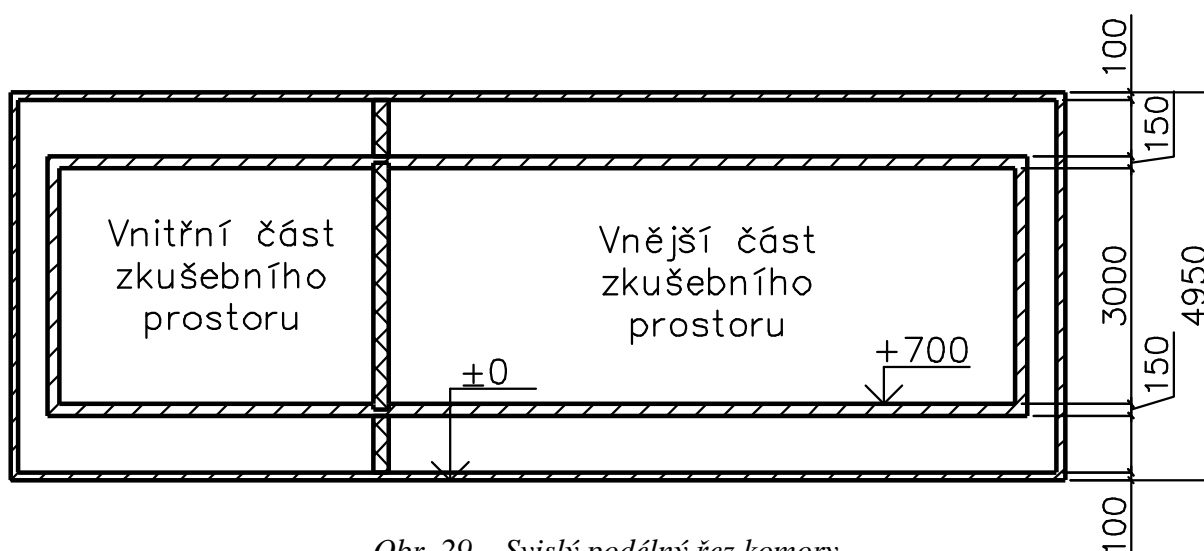
Za účelem zlepšení přesnosti měřených parametrů, je nutné stanovit jisté vazby mezi přítomným zkoušeným zařízením techniky prostředí, parametry příslušného prostoru a geometrickým a konstrukčním charakteristikám komory.

Geometrické a konstrukční řešení závisí jednak na možnostech měření energetických, akustických a distribučních parametrů zkoušeného zařízení, a jednak na prostorových možnostech haly. Z hlediska zkoušených parametrů má na zvolené rozměry komory největší podíl zkoušení akustických parametrů. Právě kvůli univerzálnosti komory byl pro určení akustických parametrů zvolen způsob měření v dozvukové místnosti s referenčním zdrojem zvuku. Pro tento způsob měření udává norma ČSN EN ISO 3743-2 minimální objem místnosti hodnotou 70 m<sup>3</sup>. Z těchto požadavků a dispozičních možností haly vychází i zvolené rozměry vnitřního a vnějšího zkušebního prostoru, a i celkové vnější rozměry komory včetně kompenzačního prostoru (viz Obr. 28 a 29).

<sup>9</sup> zařízení zajišťující rovnoměrné rozložení teploty vzduchu např. turbulentní mříže, atd.



Obr. 28 – Půdorysné rozměry komory



Obr. 29 – Svislý podélný řez komory

Veškeré uvedené rozměry jsou v milimetrech. Tloušťky tepelné izolace jsou pro obvodové stěny kompenzačního prostoru 100 mm, pro obvodové stěny vnitřních komor 150 mm a pro přepážku 200 mm. Jak je zdůrazněno na Obr. 29, světlá výška podlahy vnitřní komory od podlahy haly bude nejméně 700 mm, s předpokládanou nosností nejméně  $350 \text{ kg/m}^2$ . Tento prostor bude využit jako instalační prostor pro přívod a odvod médií a propojovacích kabelů měřicí techniky.

Z hlediska volby povrchu konstrukce se požaduje, aby všechny spoje, spáry a potrubní průchody byly provedeny vzduchotěsně a parotěsně. Proto z důvodu variability a osvědčených technologií se předpokládá použití samonosných chladírenských panelů.

Z konstrukčního hlediska jsou tyto panely „sendvičového“ typu s pláštěm z ocelového plechu a výplní na bázi pěnového polyuretanu. Tyto panely splňují požadavky, jak na maximální energetickou účinnost, tak i akustické parametry, konkrétně nízkého součinitele zvukové pohltivosti a dostatečné neprůzvučnosti.

### 9.3 Základní zkoušená zařízení a jejich parametry

Technická zařízení budov v sobě zahrnují značné množství oblastí od otopných soustav, přes osvětlovací techniku až po vzduchotechnická a klimatizační zařízení. To je velká škála zařízení disponující různými atributy. Pro zkoušky ve zmíněné laboratoři jsou rozhodující zejména chladicí výkon, hmotnost a rozměry. Tato kapitola obsahuje výčet základních parametrů zařízení, které splňují výše zmíněné podmínky.

Účelem následujícího textu není podrobný popis funkce a principu zkoušeného zařízení, ale stanovení zkoušených parametrů a výčet atributů, které slouží ke specifikaci zkoušené jednotky v protokolu o měření.

#### 9.3.1 Chladicí a vytápěcí zdroje

Chladicími a vytápěcími zdroji jsou myšleny zejména tepelná čerpadla typu vzduch-vzduch a vzduch-voda. Totéž také v provedení split. Split systém, jak již název naznačuje, značí rozdělení tepelného čerpadla na vnitřní a vnější jednotku. Obě části jsou nejčastěji mezi sebou propojeny dvojicí přívodního a vratného měděného potrubí o průměru 6 – 28 mm, které je pokryto cca 10 mm izolací a stejně tak jako potrubí, propojuje obě jednotky elektrický kabel. Velkou výhodou split systémů je, že veškerý hluk z kompresoru a ventilátoru zůstává vně objektu a také, že odpadá problém se zamrzáním topné vody jako u jiných systémů.

Zkoušenými parametry chladících a vytápěcích zdrojů jsou předpokládány:

- výkonové energetické parametry při proměnných podmínkách prostředí,
- akustické parametry,
- parametry distribuce vzduchu.



Hlavními atributy reprezentující konkrétní chladicí a vytápěcí zařízení, které musí obsahovat technická dokumentace jsou:

- výrobce + sériové číslo,
- typ jednotky,
- jmenovitý tepelný výkon (udávány v souladu s EN 14511 při nominální rychlosti a při maximální rychlosti),
- COP (udávány v souladu s EN 14511 při nominální rychlosti a při maximální rychlosti),
- jmenovitý chladicí výkon (závisí na možnostech TČ),
- hladinu akustického výkonu (udávány v souladu s ISO EN 9614-2),
- rozměry,
- hmotnost.

Z hlediska akustických parametrů mohou být uváděny také hodnoty hladin akustického tlaku  $L_{pA}$  (dB) s dodatkem měřené vzdálenosti. Z průzkumu, který jsem provedl, se průměrné hodnoty hladin akustického tlaku dnešních tepelných čerpadel pohybují v rozmezí od 45 – 63 dB (A).

### 9.3.2 Koncové prvky chladících a vytápěcích systémů

Tuto skupinu zkoušeného zařízení zastupují především chladicí stropy, chladicí trámce a indukční či ventilátorové jednotky (fan coils). Jedná se o možnou alternativu úpravy stavu prostředí, ke kterému dochází přestupem tepla konvekcí a sáláním.

Měření se bude provádět pro zjištění:

- výkonových energetických parametrů při proměnných podmínkách prostředí,
- akustických parametrů,
- parametrů distribuce vzduchu.

Přesný typ zařízení určují specifické hodnoty následujících parametrů:

- výrobce + sériové číslo,

- typ jednotky,
- průtok média,
- výkon (chlazení, topení),
- hladina akustického výkonu (tlaku),
- rozměry,
- hmotnost.

Z pohledu akustických vlastností těchto systémů je vhodné se zaměřit zejména na indukční jednotky a ventilátorové jednotky, které jsou nepříznivým hlukem při své činnosti doprovázeny. Snahou o vylepšení akustických proporcí, v případě fan coilů, vede v dnešní době výrobce dodávat zařízení v kombinaci s několika rychlostním motorem nebo motorem s proměnnými otáčkami a optimalizovaným radiálním ventilátorem. U indukčních jednotek dochází ke snižování hluku optimalizovaným tvarem trysek přivádějící vzduch. Průměrné hodnoty hladin akustického tlaku dnešních fan coilů se pohybují v rozmezí od 35 – 52 dB (A).

### 9.3.3 Prvky vzduchotechnických systémů

Do této kategorie spadají především ventilátory, uzavírací a regulační klapky, tlumiče hluku a koncové prvky. Z akustického hlediska jsou tyto prvky popsány v kapitole 5.4.

Na základě zkoušek budou vyhodnocovány:

- výkonové parametry pro ventilátory (pracovní charakteristika),
- akustické parametry.

Daný prvek je možné popsat podle:

- výrobce,
- typu,
- objemového průtoku,
- průměru,
- celkového tlaku.

## 10 NÁVRH DOZVUKOVÉ KOMORY

Jisté možnosti, jak realizovat dozvukovou komoru uvádí již kapitola 7.4.2. Návrh jednotlivých prvků komory, určené výhradně pro měření akustických parametrů tak, aby byly splněny podmínky difúzního pole, není vůbec triviální záležitost. V tomto případě je celá situace stěžena tím, že předmětná komora nebude sloužit pouze účelům měření akustických parametrů, ale předpokládá se její univerzálnost. Úkolem této práce je tedy, co nejefektivněji využít možnosti, které se nabízí a navrhnout komoru tak, aby splňovala veškeré nároky pro požadovanou třídu měření a zkoušeného zařízení. Při návrhu dozvukové komory jsem se převážně opíral o normy ČSN EN ISO 3741 a ČSN EN ISO 3743-2, protože právě ty vznášejí požadavky pro její výstavbu a následnou funkčnost.

K tomu, aby bylo možné, s laboratorní nebo technickou třídou přesnosti, určovat hladiny akustického výkonu nebo hladiny akustické energie zařízení či jejich dílčích prvků musí dozvuková komora mít

- přiměřený objem,
- vhodný tvar nebo difúzní prvky,
- přiměřeně malou zvukovou pohltivost ve sledovaném frekvenčním rozsahu,
- dostatečně nízké hladiny hluku pozadí.

Splnění těchto bodů by mělo mít za následek, že zvukové pole takto navržené dozvukové komory by se takřka blížilo poli difúznímu. Přibližné parametry komory jsou již známy z předchozí kapitoly. Úkolem je zjistit, zdali navrhované geometrické, konstrukční a přístrojové parametry z předchozí kapitoly, jsou schopny splnit zmíněné požadavky na vlastnosti komory nebo jestli bude potřeba některé parametry optimalizovat, či je úplně změnit. Neustále je však nutné mít na zřeteli, že navržené parametry komory vhodné pro měření akustických vlastností, nemusí být přijatelné pro měření jiných veličin, pro které je také komora konstruována.

## 10.1 Objem a tvar

Vhodná volba rozměrů dozvukové zkušební místnosti je základním kamenem, při navrhování takového objektu. Vyplývají převážně z rozměrových parametrů zkoušeného zařízení, měřené akustické veličiny a sledovaného frekvenčního rozsahu. Směrnice pro návrh rozměrů komory, jako funkci nejnižšího sledovaného frekvenčního pásma, udává norma ČSN EN 3741 následující tabulkou.

Tabulka 2 – Doporučený minimální objem dozvukové zkušební místnosti

Nejnižší sledované třetinooktávové pásmo [Hz]	Minimální objem dozvukové místnosti [m <sup>3</sup> ]
100	200
125	150
160	100
200	70

Podle předpokládaných rozměrů univerzální kalorimetrické komory uvedených na Obr. 28 a 29 vychází objem vnitřní části zkušebního prostoru 51,6 m<sup>3</sup> a objem vnější části zkušebního prostoru 103,2 m<sup>3</sup>. Pro měření akustického výkonu upravuje norma ČSN EN ISO 3743-2 minimální objem dozvukových místností hodnotou 70 m<sup>3</sup> a i vzhledem k velikosti předpokládaného zkoušeného zařízení nemůže být tato hodnota menší. Na základě této skutečnosti je zřejmé, že vyhrazeným prostorem pro měření akustických parametrů bude vnější část zkušebního prostoru. Proto jsem se i dále zaměřil převážně na tuto část univerzální kalorimetrické komory.

Také geometrický tvar dozvukové komory hraje při navrhování velkou roli. Cílem je zajistit odraz zvuku do co nejvíce směrů. Proto je doporučováno, aby místnost neměla přesný pravoúhlý tvar, neboli aby žádné z ploch na sebe nebyly rovnoběžné. V případě požadavku o zachování přesného pravoúhlého tvaru je důležité dodržet základní podmínku, a to aby se poměr jakýchkoliv dvou rozměrům nerovnal nebo těsně neblížil celému číslu.

V této práci jsem se z důvodu snadnější realizace z hlediska konstrukce, která má být jednak kompenzovaná a jednak z chladírenských panelů, které jsou výhradně krabicovitěho tvaru, rozhodl pro přesný pravoúhlý tvar komory a následné použití difúzních prvků.

Nejdříve musí být vymezena referenční obalová plocha, která je vodítkem při stanovení velikosti zkušební místnosti. Lze ji také nazvat jako hypotetickou plochu, která je určena nejmenším kvádrem, který právě obklopuje zkoušené zařízení. Za zkoušené zařízení se berou veškeré významné zdroje vyzařování, včetně pomocného zařízení, které buď nemůže být odstraněno, nebo je přiměřeně ztišeno a musí k němu být referenční obalová plocha vhodně zvětšena. Objem dozvukové komory pro měření s jistou třídou přesnosti musí být alespoň 100 násobek objemu, ohraničeného referenční obalovou plochou.

Při provedení analýzy dnešního trhu potenciálně možných měřených zařízení techniky prostředí, jsem dospěl k minimálnímu možnému objemu komory na  $78 \text{ m}^3$ . Tato hodnota vychází z průměrného objemu 28 zařízení (tepelná čerpalá, split jednotky), který je cca  $0,68 \text{ m}^3$  a případné rezervy.

V prvním kroku návrhu jsem se snažil ověřit, zda již navržené rozměry splňují předešlá kritéria

- objem větší jak  $78 \text{ m}^3$ ,
- poměry velikostí stran nejsou násobky malých celých čísel,
- nejdelší možný tělesový rozměr splňuje podmínku (7.4.2.2).

#### **Poměr rozměrů stran ( $d \times š \times v$ )**

Rozměry  $8 \times 4,3 \times 3 \text{ m}$  jsou v poměru  $2,6 : 1,43 : 1$ .

Tento údaj značí, že podmínka poměrů velikosti rozměrů stran je splněna.

#### **Nejdelší tělesový rozměr $l$ [m]**

$$l = \sqrt{d^2 + š^2 + v^2}$$
$$l = \sqrt{8^2 + 4,3^2 + 3^2}$$
$$l = 9,565$$

Nejdelší možný tělesový rozměr  $l_{\max}$  [m]

$$l_{\max} < 1,9V^{\frac{1}{3}}$$

$$l_{\max} < 1,9 \cdot 103,2^{\frac{1}{3}}$$

$$l_{\max} < 8,912$$

Na základě tohoto výpočtu je jasné, že nejdelší tělesový rozměr navržené vnější části zkušebního prostoru je větší, než maximálně přípustný. Z tohoto důvodu volbu těchto rozměrů nedoporučuji.

Jako jedno z možných řešení, které uvádí výše zmíněné normy, je využít doporučené poměry stran uvedené v tabulce 3.

Tabulka 3 – Doporučené podíly rozměrů pro pravoúhle místnosti z ČSN EN ISO 3741

$l_y/l_x$	$l_z/l_x$
0,83	0,47
0,83	0,65
0,79	0,63
0,68	0,42
0,70	0,59

Pozn.: Poslední dva řádky uvádějí podíly pro komoru o objemu blízkému  $200\text{m}^3$ .

Dispoziční možnosti haly jsou rozhodujícím faktorem a navržené rozměry z dokumentace beru jako limitující. Proto, při realizaci výpočtů s doporučenými podíly rozměrů z tabulky 3 jsem dospěl k závěru, že touto metodou nelze dosáhnout požadovaného objemu, aniž by nedošlo, k přesáhnutí alespoň jednoho rozměru nad limit.

Ke zjištění, jestli je možné s danými kritérii splnit požadavky dané zkušebním zařízením a požadavky z norem, je nutné provést výpočet veškerých možných kombinací rozměrů. Tabulka 4 uvádí nejvhodnější rozměry, které splňují podmínky a vykazují největší objem.

Tabulka 4 – Vhodné rozměry dozvukové komory

Rozměry [m]	Objem [m <sup>3</sup> ]	$l_{\max}$ [m]	$l$ [m]	Poměry stran
6,3x4,1x3	77,49	8,10	8,09	2,1:1,3 $\bar{6}$ :1
6,3x4,2x3	79,38	8,17	8,14	2,1:1,4:1
6,3x4,3x3	81,27	8,23	8,2	2,1:1,4 $\bar{3}$ :1
6,4x4,5x3	86,4	8,4	8,38	2,1 $\bar{3}$ :1,5:1

Pozn.:  $l_{\max}$  - nejdelší možný tělesový rozměr,  $l$  - skutečný tělesový rozměr

Zvolený rozměr je vyznačený v tabulce. Jedná se o maximální možný rozměr s přesností na decimetry, který je možné použít.

## 10.2 Konstrukční prvky a úprava povrchu

Konstrukce dozvukové komory má taktéž svá specifika a řídí se danými směrnicemi. Je nutné zvolit konstrukci, která by plnila dva základní požadavky:

- všechny plochy budou dostatečně zvukově odrazivé,
- konstrukční skladba bude zajišťovat maximální neprůzvučnost.

Správné vlastnosti povrchu konstrukce jsou velmi důležité, protože udávají pohltivost zvuku celé zkušební komory. Tuto pohltivost zvuku především ovlivňuje minimální vzdálenost, která musí být mezi zkoušeným zdrojem hluku a polohami mikrofonu. Ovlivňuje také vyzařování zdroje zvuku a charakteristiky vycházející z frekvenční odezvy zkušebního prostoru. Z těchto důvodů nesmí být pohltivosti zvuku zkušební komory ani příliš velké, ani extrémně malé.

Norma ČSN EN ISO 3741 udává, že všechny povrchy místnosti musí být v rámci jedné vlnové délky zkoušeného zdroje zvuku navrženy jako odrazivé, s činitelem pohltivosti menším než 0,06. Tato hodnota je ovšem navržena tak, aby bylo splněno kritérium doby dozvuku na širokém rozsahu frekvencí a vlhkosti. Na určitých frekvencích se dokonce doporučuje tuto hodnotu upravit na 0,16, aby došlo k minimalizaci vlivu módů na vyzařovaný akustický výkon. Konkrétně se jedná o frekvence nižší, než uvádí následující vztah

$$f = \frac{2000}{V^{\frac{1}{3}}} \quad (10.2.1)$$

Vzhledem k navrženému objemu 81,27 m<sup>3</sup> se jedná o frekvence nižší než 461,73 Hz. Všeobecně (do frekvence 6,3 kHz) je ovšem nutné splňovat kritérium doby dozvuku  $T_{60}$  pro každé třetinooktávové pásmo, kterou stanovuje vztah

$$T_{60} > \frac{V}{S} \quad (10.2.2)$$

Tato podmínka nám říká, že minimální doba dozvuku na všech měřených frekvencích musí být v našem případě minimálně 0,7 s. Právě z těchto hodnot a navržené konstrukce, lze i teoreticky stanovit sledovaný rozsah frekvencí.

K tomu jsem využil vztah 7.3.2, který by měl udávat nejpřesnější hodnotu součinitele zvukové pohltivosti na základě požadované doby dozvuku, protože předpokládá snížení intenzity akustické energie odrazem od jednotlivých ploch. Teoretický výpočet sledovaného pásma je pak možné provést přes dekrement útlumu  $m$ , který udává absorpci akustické energie ve vzduchu podle Obr. 18.

Vypočtené zvukové pohltivosti pro střední hodnoty třetinooktávových pásem udává následující tabulka.

Tabulka 5 – Maximální teoretické hodnoty součinitele zvukové pohltivosti všech ploch

$f_{\text{stř}} [\text{Hz}]$	$\alpha_{\text{max}} [-]$ ( $\varphi=50\%$ )	$\alpha_{\text{max}} [-]$ ( $\varphi=20\%$ )	$f_{\text{stř}} [\text{Hz}]$	$\alpha_{\text{max}} [-]$ ( $\varphi=50\%$ )	$\alpha_{\text{max}} [-]$ ( $\varphi=20\%$ )
125	0,14833	0,14810	1000	0,13983	0,13745
160	0,14739	0,14692	1250	0,13864	0,13387
200	0,14645	0,14574	1600	0,13745	0,12787
250	0,14551	0,14456	2000	0,13387	0,12426
315	0,14456	0,14338	2500	0,13028	0,11941
400	0,14362	0,14220	3150	0,12183	0,11086
500	0,14267	0,14101	4000	0,11941	0,10099



630	0,14172	0,13983	5000	0,11575	0,08218
800	0,14078	0,13864	6300	0,10717	0,05650

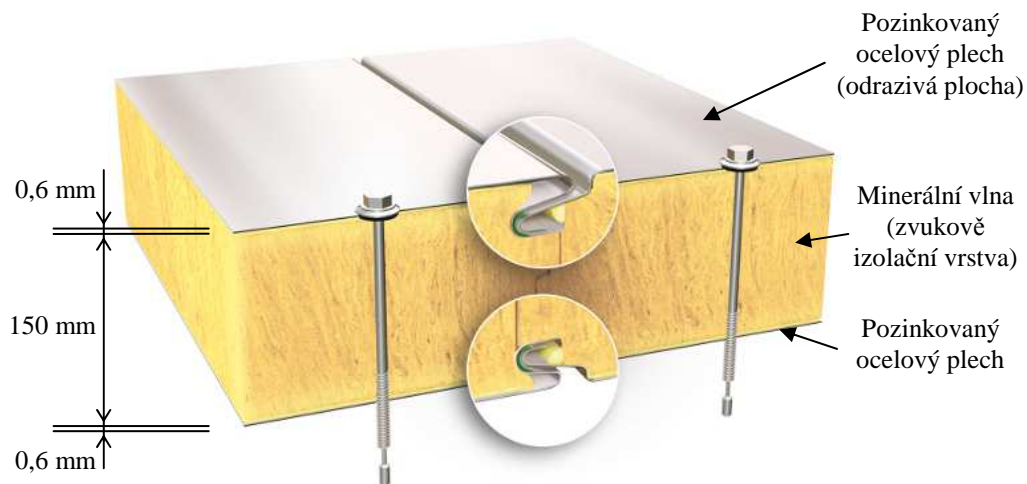
*Pozn.: Hodnoty do 1kHz jsou pouze odhadované, protože Obr. 18 není na tomto intervalu tak detailní.*

Tabulka uvádí maximální přípustné hodnoty součinitelů zvukové pohltivosti, pro splnění minimální doby dozvuku. Reálně ovšem tyto hodnoty musí být mnohem menší, protože je nutné brát v úvahu další absorpci akustické energie zařízením uvnitř zkušební místnosti a výstřiky vzduchotechnických jednotek. Navíc doba dozvuku bude určitě požadována podstatně vyšší, než uvedená minimální.

Dalším požadavkem na návrh konstrukce je zajištění vzduchové neprůzvučnosti, aby nedocházelo k ovlivnění měření provozem haly. Neprůzvučnost stavebních konstrukcí je v zásadě tím lepší, čím jsou tyto konstrukce těžší. Zároveň platí, že vzduchová neprůzvučnost vzrůstá s frekvencí dopadající akustické energie. Pokud se tedy má u stavebních konstrukcí dosáhnout vysoké zvukové izolace, je nutné použít materiál s velmi vysokou plošnou hmotností. V případě kompenzované komory takto vysoké plošné hmotnosti nejsou nutné, protože dvě vrstvy konstrukce budou odděleny vzduchovou izolační vrstvou. Při zhotovení by obě vrstvy měly být spojeny napevno pouze po obvodě, ve styku s navazující boční konstrukcí. Další konstrukční spoje by měly být pružné a měly by přenášet co možná nejméně zvukové energie.

### 10.2.1 Chladírenské sendvičové panely

Chladírenské sendvičové panely jsou konstrukčním prvkem, který je vhodný svým řešením do prostor s maximálními požadavky na energetickou účinnost a požární bezpečnost. Umožňuje odolávat velkému rozsahu teplot a vlhkosti. Standardně jsou nabízeny různé délky (2-6 m) i šířky panelů (100–200 mm). Tyto panely jsou sendvičového typu skládající se z perforovaného plechu a izolačního jádra. Jako plech se převážně používá žárově pozinkovaná ocel s celkovým množstvím zinku  $275 \text{ g/m}^2$ . Tento plech je také nabízen s povrchovou úpravou (barevné vnější provedení, polyuretanová úprava). Izolačním jádrem je minerální vlna nebo polyuretanová pěna nabízena v různých tloušťkách. [23]



Obr. 30 – Ukázka sendvičového panelu s detailem na provázání plechů

Z hlediska vhodnosti těchto panelů pro akustické měření je nutné poznamenat, že hodnota součinitele zvukové pohltivosti není přesně známá. Výrobci měření tohoto parametru neprovádějí, protože z primární účelnosti nemá tento parametr žádný význam. Zvuková pohltivost je výrobci pouze odhadovaná na hodnotu ~0,1 u plechu bez plošné perforace. Jakákoliv prováděná povrchová úprava vede ke zvýšení zvukové pohltivosti. Zvukovou neprůzvučnost již výrobci zmiňují a pohybuje se na základě skladby panelu (povrchová úprava, tloušťka plechu a izolace) v rozmezí od 20 – 35 dB.

Vzhledem k zjištěným vlastnostem je možné tyto panely pro dané účely použít. Ovšem bez plošné perforace nebo s reflexním nátěrem. Také doporučuji použít menší rozměry, kvůli snížení možnosti vzniku hluku a vibrací na rezonančních frekvencích. Konstrukčně jiný typ panelu bych volil na podlahu, kde je vyžadována jistá pochůznost.

### 10.3 Difúzní prvky

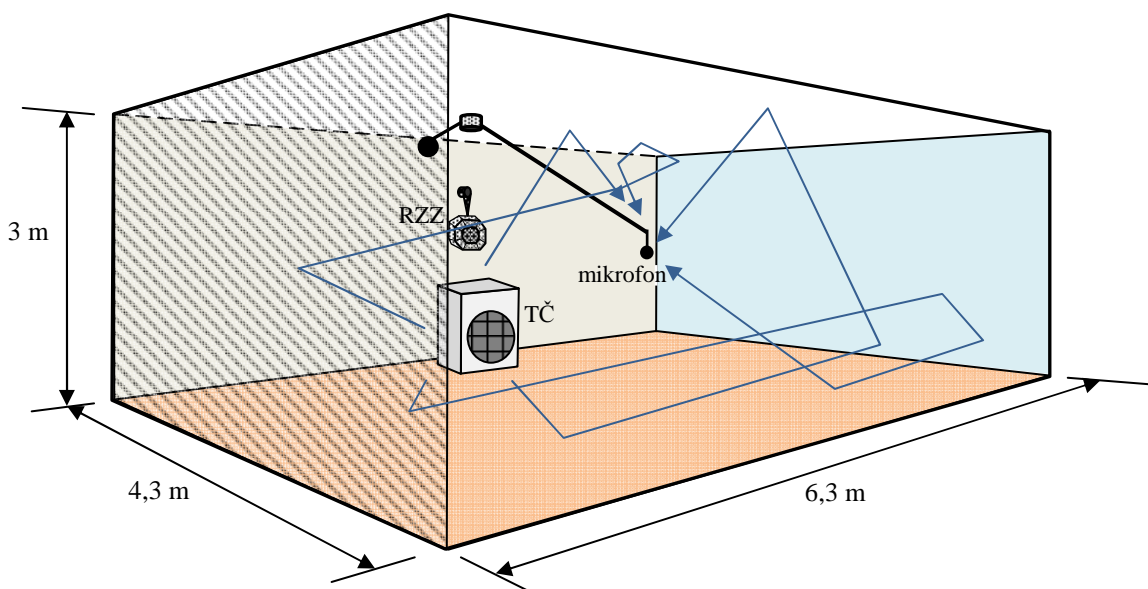
Je nutné si uvědomit, že každý předmět (osoba, vybavení místnosti), výhradně podle materiálu, z kterých je vyroben, má určitý vliv na akustiku daného prostoru. Jedinou možností, jak zjistit výsledné parametry prostředí je měření. V případě, že není možné dosáhnout daných požadavků geometrickým a konstrukčním řešením, je potřeba použít difúzní prvky.

V dozvukové komoře se v zásadě používají pevné difuzory nebo rotující křídla. Tyto difuzory jsou nejčastěji tvořeny deskami z plexiskla či překližky, o tloušťce několika milimetrů, které jsou mírně zakřiveny a rozmístěny v různých polohách v celém objemu místnosti. I zde musí difuzory splňovat nízkou zvukovou pohltivost s plošnou hmotností

cca  $5 \text{ kg/m}^2$  [22]. Standardní plocha difuzorů se pohybuje v rozmezí  $0,8 - 2 \text{ m}^2$  a pro správně rozptylující vlastnosti musí být úhly jejich sklonu různé. Celková jednostranná plocha difuzorů by se měla přibližně rovnat ploše podlahy komory, což je v našem případě  $27,09 \text{ m}^2$ .

Optimální počet difuzorů pro danou komoru lze stanovit pouze na základě měření zvukové pohltivosti vhodného zkušební vzorku (pórezní pohltivý materiál), který má v optimálním případě činitel zvukové pohltivosti větší než 0,9 v celé kmitočtové oblasti  $500 - 4000 \text{ Hz}$ . Základem je provádět měření nejprve bez použití difuzorů, a poté krok po kroku s rostoucím množstvím pevných difuzorů. V určité chvíli by průměrný činitel zvukové pohltivosti testovaného vzorku měl dosáhnout maxima a poté s přibývajícím počtem difuzorů zůstat konstantní. Optimální počet je pak tedy ten, při kterém došlo poprvé k dosažení konstantní hodnoty. Stanovení optimálního počtu pevných difuzorů se používá především v dozvukových komorách, kde se počítá s měřením činitele zvukové pohltivosti s dostatečnou přesností. [22]

V případě volby rotujících difuzorů, se jejich návrh řídí směrnicemi, které udává norma ČSN EN ISO 3741. U těchto typů difuzorů mohou nastat problémy právě s velkými těžkými panely rotujícími vysokou rychlostí. Tyto problémy mohou být odstraněny navržením rotujícího difuzoru ve tvaru disku, kužele či válce s vyvážením ploch tak, aby se těžiště nacházelo v ose difuzoru.



Obr. 31 – Ukázka odrazu zvukových vln v dozvukové komoře

## 10.4 Komplikace a možné řešení

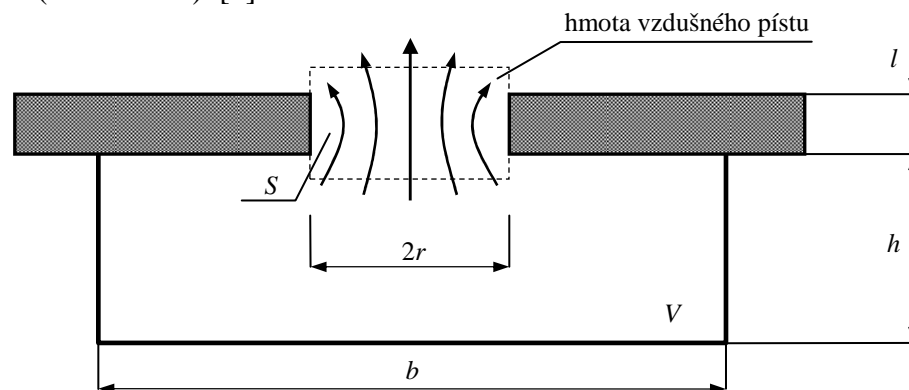
Tato kapitola obsahuje výčet možných komplikací a připomínek, které by při měřicích úkonech mohli způsobovat problémy.

### 10.4.1 Návrh rezonančních absorbérů

Vzhledem k tomu, že se konstrukci komory předpokládá vytvořit z panelů sendvičového tvaru, kde je izolační vrstva obklopena tenkými pravoúhlými deskami, tak zde existují jisté obavy ze vzniku ohybového vlnění. Toto vlnění vzniká v tělesech, v nichž převládá jeden nebo dva rozměry nad ostatními. Z hlediska šíření a vyzařování zvuku je ohybové vlnění nejnebezpečnější. Je to způsobeno především tou skutečností, že při ohybovém vlnění částice materiálu kmitají v kolmém směru k povrchu součástí, čímž je umožněn přenos energie kmitání na částice vzduchu, které součást obklopují. Takové součásti se poté stávají akustickým zářičem. Ohybové vlnění je také velmi důležité z hlediska neprůzvučnosti dělicích prvků, neboť je příčinou jimi vyzařovaného hluku. [2]

Na základě těchto skutečností je nutné zvážit volbu plošných rozměrů jednotlivých panelů a jejich uchycení. Řešení tohoto problému jsem se rozhodl provést návrhem rezonančních absorbérů. Prakticky každé konkrétní upnutí desky vyvolává odlišné rezonanční kmitočty, a proto jsem se zaměřil na rozsáhlé spektrum kmitočtů.

Mnou navrhnutý rezonanční absorbér, pracuje na principu Helmholtzova rezonátoru. Tento typ rezonátoru bývá umístěn buď jednotlivě, nebo sdruženě do podoby děrovaných panelů. Rezonátor je tvořen dutinou o určitém objemu  $V$ , opatřenou hrdlem, v níž se nachází určitá hmota vzduchu, plnící funkci pístu. Pohybu pístu je kladen určitý odpor třením vzduchu o stěny hrdla (viz Obr. 32). [3]



Obr. 32 - Princip Helmholtzova rezonátoru [3]

Kostrá rezonátoru je tvořena tuhou deskou umístěnou v určité vzdálenosti od stěny opatřenou kruhovými otvory. Návrh jsem provedl na základě rezonanční frekvence udávané vztahem [3]

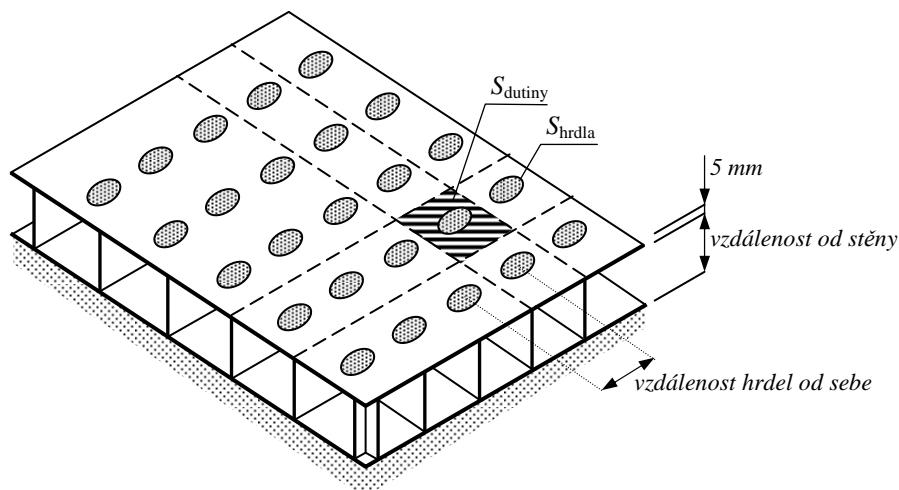
$$f_{rez} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{hrdla}}{V \left( l + \frac{16r}{3\pi} \right)}}. \quad (10.4.1.1)$$

Díky tomuto vztahu lze optimálně zvolit jednotlivé rozměrové parametry dutiny, desky a hrdla, tak aby maximální absorpce bylo dosahováno na rezonanční frekvenci povrchu panelu.

Následující tabulka zobrazuje možné rozměry rezonančních absorbérů, tvořeny 5mm dřevěnou deskou.

*Tabulka 6 – Vhodné rozměry rezonančního absorbérů pro určité rezonanční frekvence*

Rezonanční frekvence [Hz]	Vzdálenost od stěny [mm]	Vzdálenost hrdel od sebe [mm]	Poloměr hrdla [mm]
125	69	200	10
160	90	168	14
200	57	168	14
250	51	84	6
315	68	80	10
400	42	80	10
500	44	40	5
600	48	36	6
700	46	24	4
800	41	18	3
900	56	10	2
1000	44	20	5
2000	26	9	3



Obr. 33 – Celkový pohled v seskupení s předními děrovanými panely

Při aplikaci rezonančních absorbérů je důležité mít na zřeteli, že kostra tohoto prvku je tvořena materiálem o odlišné zvukové pohltivosti, než jsou jednotlivé plochy komory. Proto je nutné přesně spočítat maximální absorpční plochu rezonátoru, která může být použita, aby nedošlo k ovlivnění pohltivosti zvuku celé zkušební komory.

#### 10.4.2 Pružné uložení zařízení

O snaze minimalizovat hluk vznikající provozem haly, který by mohl mít negativní vliv na měřicí proces, je pojednáno již v kapitole 10.2. Ovšem hlavní příčinou hluku pozadí nebude provoz haly, ale zařízení umístěné uvnitř kalorimetrické komory. Zkoušená zařízení techniky prostředí musí být měřena v podmínkách, se kterými se v provozu reálně potýkají. Tyto podmínky budou udržovat klimatizační jednotky, které svým provozem generují jistou hladinu akustické energie a také chvění. Mezi chvěním a hlukem existuje přímá závislost, a proto je možné aplikací protitřesových izolací snížit i hladinu hluku celkového klimatizačního systému. Protitřesové izolace chrání před přenosem chvění od strojního zařízení do konstrukce a tím i před přenosem z konstrukce do měřicího zařízení.

K uložení zařízení je vhodné použít pryžových či ocelových pružin, u kterých lze poměrně snadno dosáhnout libovolné tuhosti. Ovšem nevýhodou ocelových pružin je schopnost poměrně velmi dobře přenášet vyšší zvukové frekvence. Tuto nevýhodu však lze odstranit vhodnou kombinací ocelové pružiny s pryžovými vložkami, které oddělí pružinu od vlastního pružně ukládaného zařízení ve smyslu zabránění přenosu chvění na vlnovém principu. Tyto izolátory chvění je nutné dimenzovat nejenom s ohledem na požadovanou tuhost pružin, ale také s ohledem na únosnost.

### Návrh pružného uložení zkoušeného zařízení

V případě zvolených konstrukčních prvků komory, je nutné kontrolovat šíření chvění ze zkoušeného zařízení do konstrukce. Proto je potřeba zajistit pružné uložení zkoušeného zařízení, aby dynamické síly chvění byly přenášeny do konstrukce jen v omezené míře. Obecně může mít zkoušené zařízení uložené na pružinách šest stupňů volnosti. Ovšem v našem případě umístění stačí návrh uložení na základě řešení soustavy s jedním stupněm volnosti.

Aby bylo pružné uložení kvalitní, musí dojít při usazení stroje na pružiny k dostatečnému stlačení. [24]

Při návrhu pružného uložení jsem vycházel z provedené analýzy potenciálně možných zkoušených zařízení. Jejich průměrné parametry potřebné pro návrh pružného uložení jsou uvedeny v následující tabulce.

*Tabulka 7 – Průměrné parametry potenciálně zkoušených zařízení*

Průměrná hmotnost zařízení [kg]	Průměrné otáčky ventilátoru [ot/min]
135	650

Při výpočtu byl uvažován předpoklad tuhého základu a požadavek na útlum chvění  $D = 25$  dB a hmotnost základového rámu 15 kg.

Z těchto hodnot je možné určit potřebný činitel  $\omega/\omega_0$  použitím rovnice

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \left(1 - \sqrt{10^{0,1D}}\right)^{0,5} = 4,1 \quad [24] \quad (10.4.2.1)$$

Ze zadaných otáček ventilátoru lze určit úhlový kmitočet budící síly

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = 68,1s^{-1} \quad (10.4.2.2)$$

a následně vlastní úhlový kmitočet soustavy s jedním stupněm volnosti

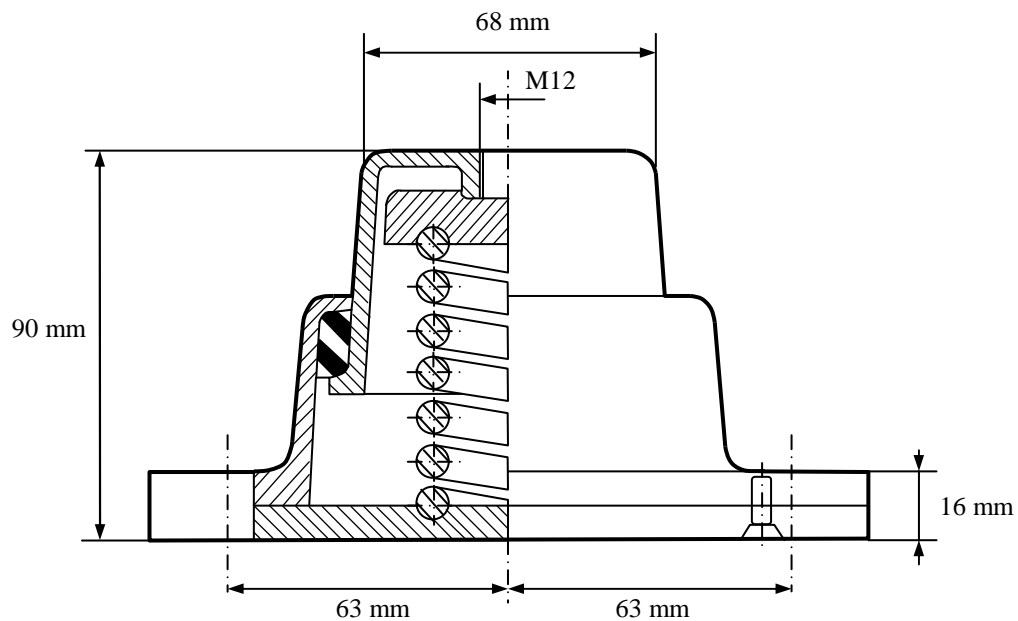
$$\omega_0 = 16,6s^{-1}$$

Následující vzorec umožňuje určit potřebnou tuhost izolátorů chvění

$$k = m\omega_0^2 = 41,4kN / m \quad [24] \quad (10.4.2.3)$$

Kvůli lepšímu rozložení silového působení jsem zvolil 8 ks izolátorů. V tomto případě vychází tuhost jednoho izolátoru na 5,2 kN/m. Každý izolátor tedy bude zatížen statickou silou  $F = \frac{m}{8} \cdot g = 184N$ .

Při volbě izolátoru platí pravidlo, že zvolený typ izolátoru chvění musí vykazovat nižší nebo stejnou tuhost, než která byla stanovena výpočtem. [24] Pro naše potřeby jsem zvolil izolátor ISTAKO P42 s ocelovými pružinami, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 7.



Obr. 34 – Řez izolátorem chvění ISTAKO P42

Tabulka 8 – Vlastnosti izolátoru ISTAKO P42 [24]

Typ	Svislá tuhost	Statické zatížení		Montážní výška	Hmotnost
	[kN/m]	Min. [N]	Max. [N]	[mm]	[kg]
P 42	5	80	195	90	0,6

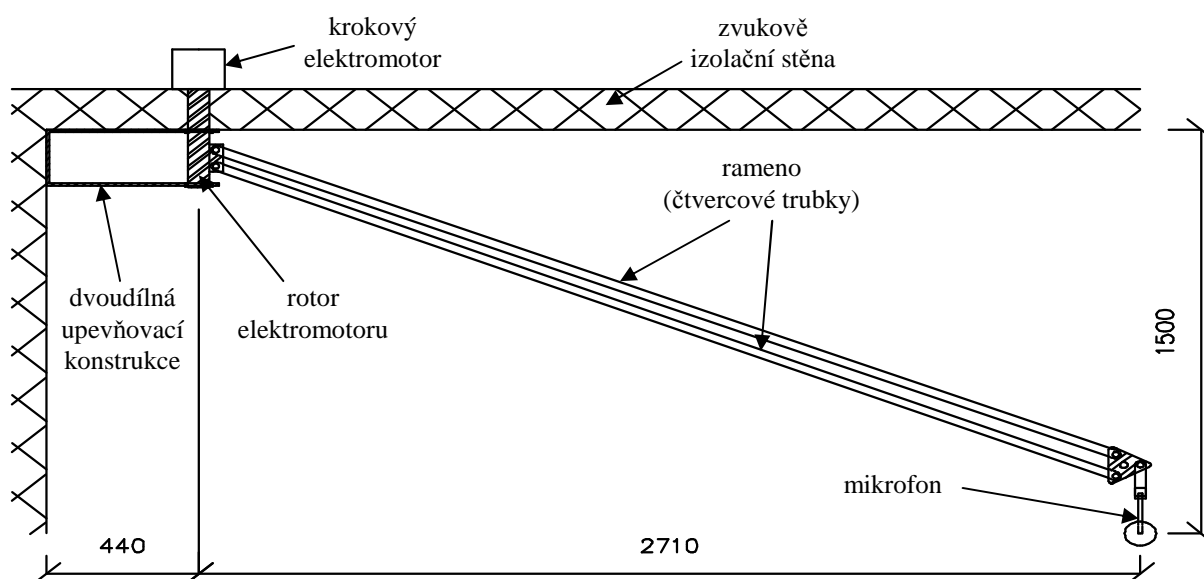
Mnou vypočtené hodnoty slouží pouze jako příklad. Návrh pružného uložení by se měl provádět pro konkrétní zkoušené zařízení, aby bylo dosaženo žádaného efektu.



### 10.4.3 Automatický posuv mikrofonu

Jako jedním z cílů této práce jsem si stanovil, obohatit vybavení komory o nestandardní prvek, který by usnadnil měřicí proces. Protože zařízení budou zkoušena v klimatických podmínkách specifických pro jejich provoz, bylo by vhodné celý proces měření navrhnout tak, aby obsluha laboratoře, měřicí prostor v době zkoušky navštěvovala minimálně, pokud možno pouze při instalaci nového zkoušeného zařízení. Proto jsem se rozhodl měřicí úkony usnadnit implementací automatického posuvu mikrofonu (Obr. 35).

Upevňovací část systému by se sestávala z dvou dílné konstrukce, z níž spodní díl by byl osazen valivým ložiskem. Díky ložisku by docházelo k přesnému a tichému otáčení rotoru. Další částí by bylo rameno, které by se skládalo z dvou přesných čtvercových trubek. Kvůli délce ramena, které musí dosáhnout do vzdálenosti až 3,2 m od stěny, je nutné, aby samotné trubky byly tvořeny materiálem, který disponuje lehkostí a pevností. Konec ramena by byl tvořen dílem trojúhelníkového tvaru, který by zajišťoval funkci vertikálního pohybu celého ramene. Takovýto systém posuvu by již umožňoval lépe zvolit ideální dráhu posuvu mikrofonu, než nabízí volba pevného ramena. Na tuto trojúhelníkovou část by již byl namontován speciální držák pro mikrofon. Otočný pohyb by prováděl krokový elektromotor, který by nebyl umístěn přímo ve zkušební místnosti, ale v kompenzačním prostoru. Díky tomuto umístění by bylo možné provádět měření s konstantním posuvem mikrofonu po dráze, aniž by došlo k ovlivnění výsledku měření vyzařovaným hlukem ze samotné činnosti krokového elektromotoru.



Obr. 35 – Ukázka možnosti automatického posuvu mikrofonu

Takto vytvořený návrh automatického posuvu mikrofonu slouží pouze jako inspirace pro případnou budoucí inovaci měřicího procesu. Není ověřené, zda by takovéto uspořádání bylo v praxi realizovatelné a jestli by bylo dosaženo žádaného efektu.

Dále by bylo potřeba danou problematiku zvážit z ekonomického hlediska. Posuvný mikrofon by znamenal snížení nákladů na přístrojové vybavení o pět mikrofonů, stojanů, propojovacích kabelů a dokonce i absenci jednoho modulu (viz. kapitola 14). Sestrojení automatického posuvu by na druhou stranu znamenal náklady na konstrukci, držáky, krokový elektromotor a řídicí systém. Zároveň s aplikací automatického posuvu mikrofonu, by se zvýšila i celková doba měření v porovnání s aplikací šesti stacionárních mikrofonů. Na druhou stranu, by ale k odlehčení časové náročnosti docházelo z hlediska kalibrace mikrofonů, před každým měřením. Je tedy potřeba zvážit možnosti a návratnost zvoleného měřicího systému.

#### **10.4.4 Vizuální monitoring měřicího procesu**

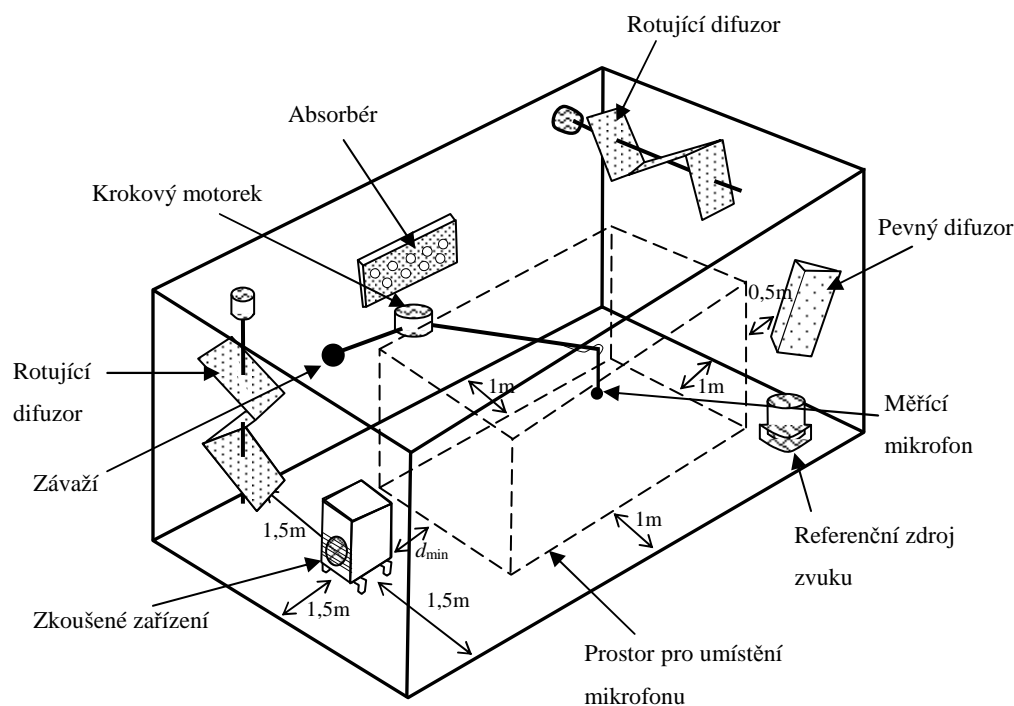
Při návrhu komory by dle mého nemělo být zapomenuto, že může dojít k mylnému zaznamenání informací o zkoušeném zdroji, poloh mikrofonů apod. Proto by měl existovat jistý systém, který by zpětně umožňoval tyto chyby zjistit.

Možným řešením by mohl být stacionární kamerový systém, který by plnit nejen funkci monitoringu vnější části zkušebního prostoru komory, ale i na základě pořízeného záznamu by v případě nesrovnalostí mohlo dojít k objasnění zkoušeného zařízení či přesných poloh mikrofonů. Vizuální pohled by taktéž zlepšoval kontrolu nad měřícím procesem.

## 11 UMÍSTĚNÍ MĚŘÍCÍCH PRVKŮ V DOZVUKOVÉ KOMOŘE

Jednou z veledůležitých složek měřicího systému je správné zvolení poloh měřících prvků během zkoušky. Je důležité docílit toho, aby vyzařovaná akustická energie nebyla negativně ovlivněna způsobem instalace a umístění měřeného zdroje zvuku, vzhledem k blízkým stěnám nebo jiným odrazivým rovinám. Tato kapitola zohledňuje požadavky norem, které musí být dodrženy při přípravě zdroje a měřících přístrojů ke zkoušení, aby se dosáhlo uspořádání, které je reprodukovatelné a může být jednoznačně spojováno se získanými výsledky.

Jednotlivé umístění měřících prvků soustavy podléhá splněním jistých požadavků. Veškeré minimální hodnoty je doporučováno vhodně dimenzovat, aby se minimalizovala možnost vzniku chyby způsobené umístěním měřicího prvku v blízkém poli. Úkolem je zvolit polohu zkoušeného zařízení, referenčního zdroje zvuku a měřících mikrofonů. Obr. 36 znázorňuje všeobecné podmínky umístění těchto zařízení pokud nejsou z nějakého důvodu určeny přesné polohy. Tento obrázek slouží pouze jako obecný příklad, ovšem vzhledem k již známým vlastnostem vnější části kalorimetrické komory, je možné jednotlivé polohy měřících zařízení určit přesněji.



Obr. 36 – Všeobecné podmínky minimálních vzdáleností mezi prvky měřící soustavy

## 11.1 Umístění zkoušeného zařízení techniky prostředí

Zkoušený zdroj zvuku by měl být v dozvukové komoře nainstalován na jednom či více místech. Vzhledem k tomu, že se bude jednat především o hmotnější zařízení, které je nutné osadit přírodním a vratným potrubím, bude měření probíhat pouze v jedné poloze. Je však nutné zajistit, aby žádná elektrická vedení, hydraulická nebo ventilační potrubí připojená ke zkoušenému zařízení nevyzařovala do zkušebního prostředí významné množství akustické energie. Zařízení bude nainstalováno tak, jak tomu je v případě obvyklého provozu, což je v případě závěsného provedení cca 0,3 m od stěny. V případě stacionárního zařízení není tato vzdálenost dána, ale kvůli dispozičním možnostem bude i v tomto případě vhodné tento rozměr dodržet. Kvůli minimalizaci přenosu chvění do konstrukce bude zkoušené zařízení posazeno na základovém rámu podle kapitoly 10.4.2.1. K umístění zkoušeného zařízení se z hlediska snahy využít automatického posuvu mikrofону pomocí rotačního ramene, jeví delší stěna. Díky tomuto umístění vznikne sice užší, avšak delší prostor pro obloukovou dráhu posuvného ramene. Vzhledem k tomu, že podlaha zkušebního prostoru bude pravoúhlého tvaru je potřeba zkoušený zdroj umístit na podlahu asymetricky.

## 11.2 Umístění referenčního zdroje zvuku

Na umístění referenčního zdroje zvuku jsou v určitých ohledech kladeny stejné požadavky jako na zkoušené zařízení. Taky je požadováno, aby zkoušené zařízení bylo během měření referenčního zdroje zvuku umístěno uvnitř zkušebního prostoru. Preferovanou polohou referenčního zdroje zvuku je poloha, ve které je umístěno zkoušené zařízení během zkoušky. V případě kdy zkoušený zdroj nelze snadno přemísťovat je požadováno umístění referenčního zdroje zvuku co nejbližší, ale nejméně 1,5 m od zkoušeného zařízení. [16]

Zmíněné požadavky výrazně zužují možnosti způsobů měření. Nejpodstatnější je zajistit, aby pokud možno byl referenční zdroj zvuku umístěn na stejné pozici jako zkoušené zařízení. Ve chvíli, kdy dojde k trvalému umístění referenčního zdroje zvuku, tak nebude možné tento předpoklad splnit. Proto z praktického hlediska se zdá být rozumné, umístit referenční zdroj zvuku volně do zkušebního prostoru. K měření referenčního zdroje zvuku bude docházet v místě umístění zkoušeného zařízení a to ve chvíli, kdy zkoušené zařízení nebude nainstalováno na základovém rámu.

### 11.3 Umístění měřících mikrofonů

Při měření akustického výkonu s referenčním zdrojem zvuku, udává ČSN EN ISO 3741 minimální vzdálenost  $d_{\min}$  mezi zkoušeným zařízením a nejbližší polohou mikrofonu. Pro jakýkoliv sledovaný frekvenční rozsah nesmí být menší, než udává následující vztah.

$$d_{\min} = D_1 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} \quad (11.3.1)$$

Kde  $D_1$  je konstanta, jejíž minimální hodnota je 0,08.

Pro výpočet jsem použil již známou hodnotu minimální doby dozvuku  $T_{60}$  ze vztahu 10.2.2, a to 0,7 s. Minimální vzdálenost mezi zkoušeným zařízením a nejbližší polohou mikrofonu je 0,862 m. Pro minimalizaci chyby způsobené blízkým polem, a aby měřící body byly v dozvukové části akustického pole, se doporučuje za konstantu  $D_1$  dosadit hodnotu 0,16. Tím se vzdálenost  $d_{\min}$  zvětšuje na 1,724 m.

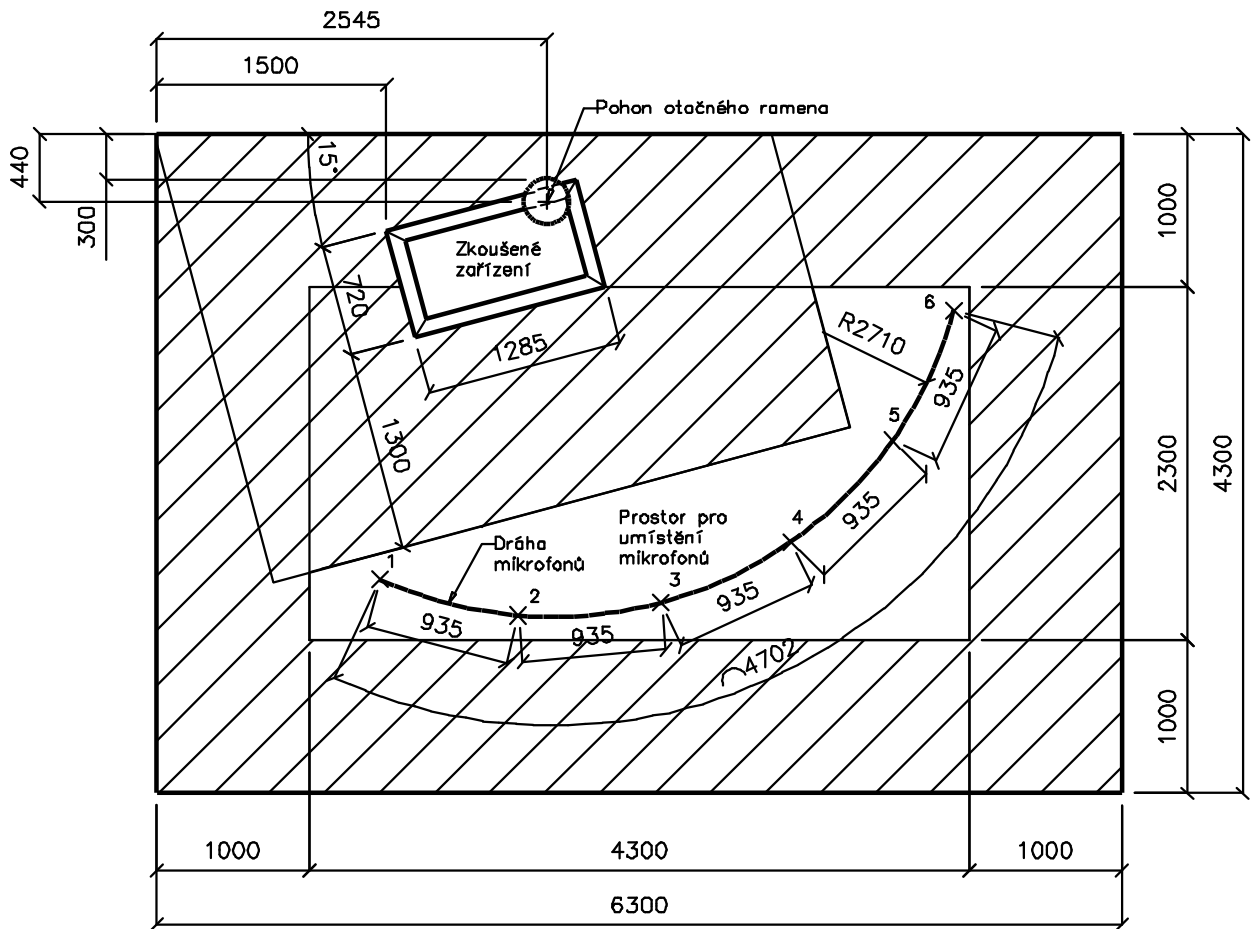
Norma ČSN EN ISO 3742-3 minimální vzdálenost  $d_{\min}$  specifikuje odlišným způsobem a to pomocí vztahu

$$d_{\min} = 0,3V^{\frac{1}{3}} \quad (11.3.2)$$

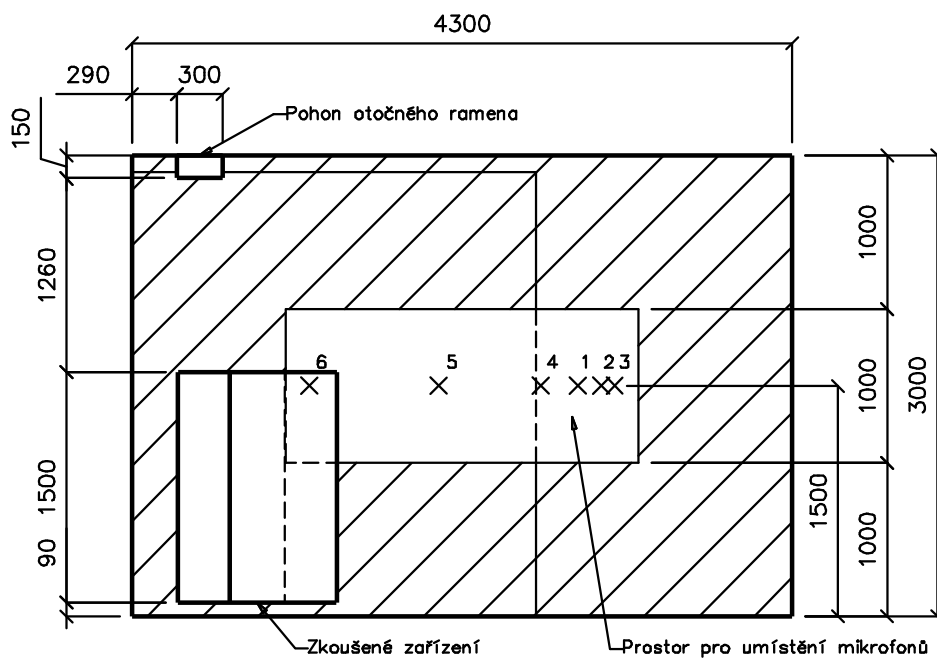
Výsledkem tohoto vztahu je hodnota  $d_{\min} = 1,3$  m. Z uvedených výsledků by bylo vhodné splnit podmínku s větší minimální vzdáleností tedy  $d_{\min} = 1,3$  m. V ideálním případě i vzdálenost 1,724 m.

Stejně jak existují požadavky na minimální vzdálenost mezi zkoušeným zařízením a nejbližší polohou mikrofonu, tak existují požadavky na minimální vzdálenost polohy mikrofonu a stěny komory (viz kapitola 7.1.1). Tento požadavek udává, že žádná poloha mikrofonu nesmí být blíže k povrchu komory než  $\lambda/4$ . Vlnová délka, odpovídající střední frekvenci nejnižšího možného třetinooktávového pásma, podle tabulky 2 s dosazením do rovnice 2.2.2.1, je rovna 1,73 m. Podle této vlnové délky je tedy jasné, že žádná poloha mikrofonu nesmí být blíže než 0,44 m od stěny komory. Vhodnější však bude, i tuto hodnotu naddimenzovat a snažit se splnit i všeobecnou podmínku jak udává Obr. 36. Další co je potřeba určit je počet poloh mikrofonů pro měření. Tento počet lze přesně stanovit pouze na základě měření a vypočtené směrodatné odchylky. Uvedené normy uvádí nutnost použití minimálně šest poloh mikrofonů. S touto hodnotou jsem také dále pracoval.

### 11.4 Návrh konkrétního umístění



Obr. 37 – Půdorysné rozmístění měřících prvků v dozvukové komoře



Obr. 38 – Svislý podélný řez dozvukové komory s rozmístěnými měřícími prvky

Zkoušené zařízení bylo potřeba umístit asymetricky, čili nesouměrně vzhledem k osám místnosti. Proto jsem jej umístit blíže k přepážce, konkrétně 1,5 m od ní, a to tak, aby zadní stěna zařízení svírala s delší stěnou komory úhel cca 15°. Takto šikmé umístění jsem zvolil, aby došlo lépe k vyloučení vzniku stojatých vln. Zvolené rozměry zařízení vychází z parametrů potenciálně možných zkoušených zařízení. Zařízení je umístěno na izolátorech podle 10.4.2.1. Je ovšem potřeba ještě uvažovat vlastní výšku základového rámu.

Ve snaze zajistit automatický posuv mikrofonů pomocí otočného ramena, jsou jednotlivé mikrofony umístěny za sebou v kruhovém oblouku, jehož délka je 4,7 m. Mikrofony jsou výškově situovány ve středu komory. Pro zvolený návrh poloh mikrofonů a umístění pohonu, musí být otočné rameno délky 3,03 m. Jako minimální vzdálenost mezi zkoušeným zařízením a nejbližší polohou mikrofonu jsem zvolil 1,3 m. Při snaze zvýšit tuto vzdálenost na 1,724 m nastaly komplikace v podobě nedostatečných velikostí rozestupů mezi jednotlivými polohami mikrofonů, které musí být minimálně  $\lambda/2$ , což je 0,865 m. Proto jsem velikost  $d_{\min}$  snížil a tím se naskytla možnost větších rozestupů mezi polohami mikrofonů na hodnotu 0,935 m. I v tomto provedení se však v poli bližším než 1,724 m nachází pouze jedna poloha mikrofonu. Stejně tak je vhodné říci, že žádné zvolené měřící místo se nenachází blíže než 1,1 m ke stěně komory.

Takto zvolené rozmístění měřících prvků splňuje veškeré požadavky, které normy, týkající se měření akustického výkonu v dozvukové komoře, udávají. Vzhledem ke zvolené poloze zkoušeného zařízení, je možné využít automatického posuvu po jedné kruhové dráze. Takovéto řešení umožňuje použít pouze jeden mikrofon. Ve chvíli kdyby bylo vyžadováno měření s konstantním posunem mikrofonu po dráze, bylo by nutné tuto dráhu prodloužit na hodnotu 5,2 m. Protože při návrhu byly uvažovány jisté rezervy, není problém tento požadavek splnit. Při realizaci je ještě nutné zvolit odkládací prostor pro zkoušené zařízení či referenční zdroj zvuku. Tento odkládací prostor by svým umístěním neměl narušovat akustiku daného prostoru a od měřící polohy zkoušeného zařízení by měl být vzdálen minimálně 1,5 m. Jako vhodné místo se jeví jeden z rohů komory, kde není umístěno zkoušené zařízení.

## 12 MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ V DOZVUKOVÉ KOMOŘE

Tato kapitola shrnuje metody pro určování hladin akustického výkonu strojních zařízení a jejich podsestav, uváděné v sérii norem ISO 3740 a vytvořit podklad, pro určování hladin akustického výkonu v třetinooktávových pásmech sledovaného frekvenčního rozsahu, který bude oporou při návrhu metodického postupu měření v navržené dozvukové komoře. Uvedená tabulka sumarizuje vlastnosti, které jsou pro metody dané normy charakteristické.

Tabulka 9 – Mezinárodní normy stanovující různé metody pro určení hladin akustického výkonu strojů a zařízení [17]

Číslo normy	Klasifikace metody	Zkušební prostředí	Objem zdroje	Charakter hluku	
3741	Přesná	Dozvuková místnost vyhovující požadavkům této normy	Menší než 1 % objemu zkušební místnosti	Ustálený, širokopásmový	
3742				Ustálený, úzkopásmový	
3743-1	Technická	Dozvuková zkušební místnost		Ustálený, širokopásmový nebo úzkopásmový	
3743-2		Speciální dozvuková zkušební místnost			
3744	Technická	Venkovní prostor		Bez omezení	Libovolný
3745	Přesná	Bezodrazová nebo polobezodrazová místnost		Menší než 0,5 % objemu zkušební místnosti	
3746	Provozní	Bez zvláštního zkušebního prostředí	Bez omezení	Ustálený, širokopásmový nebo úzkopásmový	
3747					



## 12.1 Kritéria měřeného prostředí

Prostředí, ve kterém probíhá měření, musí být před, během i po měření vyhodnocováno kvůli způsobilosti měřeného prostředí, aby získané výsledky mohly být dále reprodukovány s jistou třídou přesnosti. Vyhodnocovanými parametry jsou mikroklimatické podmínky a hluk pozadí.

### 12.1.1 Kritéria hluku pozadí

Hladina časově průměrovaného hluku pozadí v každém pásmu sledovaného frekvenčního rozsahu, měřená a průměrovaná v místech měřících mikrofonů musí být nižší, než je odpovídající hladina časově průměrovaného akustického tlaku vyvolána zkoušeným zdrojem hluku. Tento rozdíl se odvíjí podle sledovaného frekvenčního pásma následovně:

- 6 dB pro třetinooktávová pásma se středními frekvencemi nižšími než 200 Hz a vyššími než 6300 Hz,
- 10 dB pro třetinooktávová pásma se středními frekvencemi od 250 Hz do 5000 Hz.

Tyto požadavky ovšem nemusí být dosažitelné ve všech frekvenčních pásmech, pokud nejsou hladiny hluku pozadí ve zkušebním prostoru extrémně nízké. V tom případě se vypočte hladina akustického výkonu  $L_w$  (A), podle následně popsané metody, zahrnutím dat ze všech frekvenčních pásem sledovaného frekvenčního rozsahu. Následně se výpočet zopakuje, ale s vyloučením těch pásem, které podmínky 6 a 10 dB nesplňují. Pokud je rozdíl mezi těmito dvěma hladinami akustického výkonu menší než 0,5 dB, je přípustné považovat určenou hodnotu za splňující kritérium hluku pozadí. [16]

### 12.1.2 Kritéria mikroklimatických podmínek

Pohltivost vzduchu v dozvukové komoře se mění s teplotou a vlhkostí vzduchu, zvláště pro frekvence nad 1000 Hz. Kvůli této závislosti musí být mikroklimatické parametry kontrolovány během měření. Součin

$$\varphi \cdot (\theta + 5^\circ\text{C}) \quad (12.1.2.1)$$

kde  $\varphi$  je relativní vlhkost [%],

$\theta$  teplota [ $^\circ\text{C}$ ],

se nesmí lišit o více než 10 % od hodnoty součinu, která převládala na počátku měření a hodnoty součinu která převládá na konci měření.

K přípustným mezím kolísání teploty a relativní vlhkosti, které postačují pro určení způsobnosti měřeného prostředí, lze dojít také z následující tabulky.

*Tabulka 10 – Přípustné meze kolísání atmosférické teploty a relativní vlhkosti vzduchu během měření [16]*

Rozsah teploty	Rozsah relativní vlhkosti vzduchu		
	<30%	30 – 50 %	>50%
Přípustné meze teploty a relativní vlhkosti vzduchu			
-5 až 10 °C	±1 °C, ±3 %	±1 °C, ±5 %	±3 °C, ±10 %
10 až 20 °C	±1 °C, ±3 %	±3 °C, ±5 %	±3 °C, ±10 %
20 až 50 °C	±2 °C, ±3 %	±5 °C, ±5 %	±1 °C, ±10 %

## 12.2 Provoz zkoušeného zařízení během zkoušky

Akustická energie vyzařovaná zkoušeným zařízením závisí především na provozní rychlosti a ostatních podmínkách, za kterých je zařízení provozováno. Měření akustických parametrů musí být provedeno za standardních jmenovitých provozních podmínek. Pokud zařízení umožňuje provoz v několika režimech, musí být zařízení zkoušeno za podmínek, které jsou reprodukovatelné a představují nejhlučnější provoz při běžném používání zařízení. [16]

Před započítáním měření, musí být zkoušené zařízení se všemi napájecími zdroji či hnacím ústrojím udržováno v požadovaném provozním stavu za stabilní teploty nejméně 30 minut. Tyto podmínky ustáleného stavu musí být zachovány i v průběhu měření. [21]

U zkoušených zařízení techniky prostředí musí být věnována pozornost také na dodržení průtoku vzduchu jednotky uváděný v m<sup>3</sup>/hod., který nemá překročit 60 násobek objemu místnosti. Tato horní mez udává, že mikrofony mohou být ovlivněny nadměrnou rychlostí proudění vzduchu. [21]

## 12.3 Měření hladin akustického tlaku

Při zvoleném způsobu měření, s využitím referenčního zdroje zvuku se známou hladinou akustického výkonu, se musí získat hladiny časově průměrovaného akustického tlaku  $L'_{p(ST)}$  zkoušeného zdroje, pro všechna třetinooktávová pásma ve sledovaném frekvenčním rozsahu, v každé poloze mikrofonu a pro každý vybraný provozní režim. Měřicí interval se odráží podle měřeného frekvenčního pásma (viz. kapitola 7.6) a použitých difúzních prvků. V případě měření frekvenčního pásma se střední frekvencí nad 200 Hz musí být časový interval alespoň 10 s. Ovšem pokud jsou použity rotující difuzory, tak je požadováno, aby měřicí interval byl více než desetinásobek periody rotace.

### 12.3.1 Předběžné ověření vhodnosti rozmístění měřících prvků

Na základě prvního tzv. předběžného měření hladiny akustického tlaku lze také ověřit vhodnost zvoleného návrhu pro reálné měření. Toto ověření se děje s referenčním zdrojem zvuku a to ve všech zvolených polohách mikrofonu, pro každé třetinooktávové pásmo. Po tomto měření se určí směrodatná odchylka podle následujícího vztahu

$$s_M = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_M} \frac{(L'_{p(pre)_i} - L'_{pm(pre)})^2}{N_{M(pre)} - 1}} \quad (12.3.1)$$

kde  $L'_{p(pre)_i}$  je hladina časově průměrovaného akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu v  $i$ -té poloze mikrofonu za provozu referenčního zdroje zvuku,

$L'_{pm(pre)}$  je aritmetická střední hodnota hladin časově průměrovaného akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu měřená v šesti předběžných polohách mikrofonu za provozu referenčního zdroje zvuku,

$N_M$  počet poloh mikrofonu.

Podle vypočtené směrodatné odchylky se poté volí úprava polohy zkoušeného zařízení a také počet měřících poloh mikrofonu. Optimální umístění měřících prvků je tehdy, když hodnota  $s_M$  je menší nebo rovna 1,5 dB. [16]

### 12.3.2 Korekce na hluk pozadí

Jak již bylo řečeno v kapitole 12.1.1, musí být vždy bezprostředně před nebo po měření hladin akustického tlaku zkoušeného zařízení získány hladiny časově průměrovaného akustického tlaku hluku pozadí, pro všechna třetinooktávová pásma sledovaného frekvenčního rozsahu  $L_{p(B)}$  měřené ve všech polohách mikrofonu.

Z měřených hodnot hladin akustického tlaku zkoušeného zařízení a hluku pozadí, lze podle vztahu (12.3.2.1) vypočítat korekci na hluk pozadí  $K_1$  v každé poloze mikrofonu.

$$K_1 = -10 \log \left( 1 - 10^{-0,1 \Delta L_{pk}} \right) \quad (12.3.2.1)$$

Kde  $\Delta L_{pk}$  je vypočítána podle

$$\Delta L_{pk} = L'_{p(ST)} - L_{p(B)} \quad (12.3.2.2)$$

kde  $L'_{p(ST)}$  je nekorigovaná hladina časově průměrovaného akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu v  $i$ -té poloze mikrofonu za provozu zkoušeného zařízení [dB].

Ve chvíli, kdy vypočtená hodnota  $\Delta L_{pk}$  je větší než 15 dB, tak se korekce na hluk pozadí neprovádí. V opačném případě se měření hladiny časově průměrovaného akustického tlaku musí korigovat na přítomnost hluku pozadí. Korigovaná hladina akustického tlaku  $L_{p(ST)}$  v  $i$ -té poloze mikrofonu se vypočte podle

$$L_{p(ST)} = L'_{p(ST)} - K_1 \quad (12.3.2.3)$$

### 12.3.3 Výpočet hladin akustického výkonu pomocí referenčního zdroje zvuku

Pro výpočet akustického výkonu zkoušeného zařízení je potřeba nejprve zjistit hladinu střední hodnoty časově průměrovaného akustického tlaku v třetinooktávovém pásmu korigovaném na hluk pozadí v dozvukové komoře za provozu zkoušeného zařízení  $\overline{L_{p(ST)}}$  [dB]. Výpočet její hodnoty uvádí vztah

$$\overline{L_{p(ST)}} = 10 \log \left( \frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 L_{p(ST)}} \right) \quad (12.3.3.1)$$

Tuto veličinu je potřeba zjistit i pro referenční zdroj zvuku korigovanou na hluk pozadí. Upravený vztah pro referenční zdroj zvuku vypadá následovně:

$$\overline{L_{p(RZZ)}} = 10 \log \left( \frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} 10^{0,1 L_{p(RZZ)}} \right) \quad (12.3.3.2)$$

Hladina akustického výkonu zkoušeného zařízení techniky prostředí, v každém třetinoctávkovém pásmu se určí podle vztahu

$$L_W = L_{W(RZZ)} + \left( \overline{L_{p(ST)}} - \overline{L_{p(RZZ)}} \right) + C_2 \quad (12.3.3.3)$$

kde  $L_{W(RZZ)}$  je hladina akustického výkonu referenčního zdroje zvuku v třetinoctávkovém pásmu určená podle ISO 6926 a korigovaná na mikroklimatické podmínky v době zkoušky [dB],

$C_2$  je korekce, která převádí aktuální akustický výkon za mikroklimatických podmínek v době měření na akustický výkon při referenčních mikroklimatických podmínkách [dB].

Vztah pro ni uvádí ČSN EN ISO 3741 následovně:

$$C_2 = -10 \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 15 \log \frac{\theta}{\theta_0} \quad (12.3.3.4)$$

kde  $p_s$  je statický tlak dozvukové komory v době zkoušky [kPa],

$p_{s,0}$  referenční statický tlak;  $p_{s,0}=101,325$  kPa,

$\theta$  teplota vzduchu ve zkušební místnosti v době zkoušky [K],

$\theta_0$  referenční teplota;  $\theta_0=296$  K.

## 12.4 Nejistota měření

Pro reprodukovatelnost získaného výsledku hladiny akustického výkonu je nezbytné také vyjádřit nejistotu měření, která souvisí s použitou metodou měření a nestabilitou vyzařování akustické energie zkoušeného zařízení. Nejistoty měření se odhadují pomocí celkové směrodatné odchylky  $\sigma_{tot}$  [dB], která se vyjadřuje pomocí směrodatné odchylky reprodukovatelnosti  $\sigma_{RO}$  [dB] a směrodatné odchylky  $\sigma_{OMC}$  [dB], popisující nejistotu způsobenou nestabilitou podmínek provozu. Celkový vztah je uváděn následovně

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{RO}^2 + \sigma_{OMC}^2} \quad (12.4.1)$$

Obě tyto složky jsou považovány za staticky nezávislé a určují se odděleně.

Směrodatnou odchylku  $\sigma_{OMC}$  je možné vypočítat použitím rovnice

$$\sigma_{OMC} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\overline{L_{pj}} - \overline{L_{pav}})^2} \quad (12.4.2)$$

kde  $\overline{L_{pj}}$  je korigovaná hladina akustického tlaku průměrována přes všechny měřicí polohy, pro j-té opakování,

$\overline{L_{pav}}$  je aritmetický průměr vypočítaných hladin pro všechna opakování,

$N$  počet opakování.

Směrodatná odchylka  $\sigma_{RO}$  se pro metodu s použitím referenčního zdroje zvuku vypočítá na základě rozpisu nejistot zkoušeného zařízení  $L_{W(RZZ)}$  a referenčního zdroje zvuku  $\sigma_{RO(ST)}$ .

$$\sigma_{RO} = \sqrt{u(L_{W(RZZ)})^2 + (\sigma_{RO(ST)})^2} \quad (12.4.3)$$

Při této metodě se některé parametry, které ovlivňují celkovou nejistotu, se účinně vyruší, pokud jsou použity shodné polohy mikrofonů pro měření zkoušeného zařízení a referenčního zdroje zvuku.

S ohledem na celkovou nejistotu  $\sigma_{tot}$  má vyhodnocování  $\sigma_{OMC}$  vyšší prioritu, protože se v praxi připouští významně vyšší než  $\sigma_{RO}$ . [16]

Tabulka 11 ukazuje typické mezní hodnoty směrodatné odchylky  $\sigma_{RO}$  pro přesnou třídu přesnosti.

Tabulka 11 – Horní mezní hodnoty směrodatné odchylky reprodukovatelnosti [16]

Šířka frekvence třetinooktávových pásem [Hz]	Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti $\sigma_{RO}$ [dB]
100 až 160	3,0
200 až 315	2,0
400 až 5000	1,5
6300 až 10000	3,0
hladina vážená funkcí A	0,5

## 13 POSTUP MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ ZAŘÍZENÍ TECHNIKY PROSTŘEDÍ A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Při provádění jakéhokoliv měřicí činnosti je vždy dobré se držet předem daného sledu operací. Cílem této kapitoly je aplikovat požadavky z předešlé kapitoly na navrženou komoru a vytvořit metodický postup celého měřicího procesu s ukázkou vyhodnocení.

Uvedený strukturovaný postup předpokládá, že daná komora prošla předběžným měřením kvůli způsobilosti navržené konstrukce a umístění měřících přístrojů, které prošly kalibračním procesem.

### Strukturovaný postup měření

1. Zkoušená zařízení (zařízení techniky prostředí, referenční zdroj zvuku) jsou umístěna po dostatečně dlouho dobu, v měřicím prostoru za podmínek, při kterých je dané zařízení provozováno.
2. Zkoušené zařízení se umístí na základový rám a provede se instalace veškerých přípojných prvků standardně určených pro jeho provoz. Referenční zdroj zvuku je umístěn v odkládacím prostoru komory.
3. Zařízení se spustí podle specifikací udávaných ve zkušebním předpisu (kapitola 12.2). V tomto režimu zařízení setrvá po určitou dobu (cca 30 min).
4. Po uplynutí této doby je započato měření hladin akustického tlaku všech třetinooktávových pásem sledovaného frekvenčního rozsahu, v každé měřicí poloze mikrofonu. V každé poloze probíhá měření po minimální dobu podle kapitoly 12.3.
5. Takto provedené měření je nejméně 5x opakováno.
6. Po skončení měření je zkoušené zařízení přemístěno do odkládacího prostoru komory a místo něj je umístěn referenční zdroj zvuku, který se uvede do provozu.
7. Započne měření hladin akustického tlaku referenčního zdroje zvuku ve všech třetinooktávových pásmech sledovaného frekvenčního rozsahu, v každé měřicí poloze mikrofonu. Po stejný časový interval jako zkoušené zařízení.
8. Takto provedené měření je nejméně 5x opakováno.
9. Ihned po skončení měření referenčního zdroje zvuku dojde ke změření hladin akustického tlaku hluku pozadí ve všech třetinooktávových pásmech sledovaného

frekvenčního rozsahu, v každé měřicí poloze mikrofonu. Po stejný časový interval jako zkoušené zařízení.

Pozn.: Sledování průběhu mikroklimatických podmínek měřeného prostředí je prováděno po celou dobu měření.

### Získaná data

Po takto provedeném měření jsou známy:

- Hladiny časově integrovaného akustického tlaku zkoušeného zařízení techniky prostředí  $L'_{p(ST)}$  pro všechna třetinooktávová pásma sledovaného frekvenčního rozsahu, ve všech polohách mikrofonů.
- Hladiny časově integrovaného akustického tlaku referenčního zdroje zvuku  $L'_{p(RZZ)}$  pro všechna třetinooktávová pásma sledovaného frekvenčního rozsahu, ve všech polohách mikrofonů.
- Hladiny časově integrovaného akustického tlaku hluku pozadí  $L_{p(B)}$  pro všechna třetinooktávová pásma sledovaného frekvenčního rozsahu, ve všech polohách mikrofonů.
- Hodnoty mikroklimatických podmínek (teplota  $\Theta$ , relativní vlhkost  $\varphi$ , statický tlak  $p_s$ ) převládajících na počátku a na konci měření v prostředí komory.

### Postup výpočtu hladin akustického výkonu

1. Ověří se splnění kritérií na hluk pozadí podle kapitoly 12.1.1.
  - $L'_{p(ST)} - L_{p(B)} > 10$  pro  $f \in \langle 250; 5000 \rangle$ ,
  - $L'_{p(ST)} - L_{p(B)} > 6$  pro  $f$  nespádající do předchozího intervalu sledovaného rozsahu.
2. Ověří se splnění mikroklimatických podmínek podle kapitoly 12.1.2.
3. Proveďte se korekce na hluk pozadí pro každé třetinooktávové pásmo sledovaného frekvenčního rozsahu, podle kapitoly 12.3.2, pro zkoušené zařízení i referenční



zdroj zvuku. Následkem výpočtu, podle rovnice 12.3.2.3, jsou korigované hladiny akustického tlaku  $L_{p(ST)}$  a  $L_{p(RZZ)}$ .

4. Provede se výpočet střední hodnoty časově průměrovaného akustického tlaku v každém třetinoctávovém pásmu sledovaného frekvenčního rozsahu podle rovnice 12.3.3.1, pro zkoušené zařízení a 12.3.3.2 pro referenční zdroj zvuku. Výsledkem jsou hodnoty  $\overline{L_{p(ST)}}$  a  $\overline{L_{p(RZZ)}}$ .
5. Provede se výpočet korekce  $C_2$  podle rovnice 12.3.3.4.
6. Provede se výpočet hladin akustického výkonu zkoušeného zařízení techniky prostředí v každém třetinoctávovém pásmu podle rovnice 12.3.3.3. Výsledkem jsou hodnoty  $L_W$ .

Vzhledem k tomu, že hlukové situace se posuzují na základě údajů při zapnutém váhovém filtru A, je vhodné získané hladiny akustického výkonu přepočítat. Přepočet lze provést následovně:

- Provede se výpočet hladiny akustického výkonu váženou funkcí A podle rovnice

$$L_{WA} = 10 \log \sum_{k=1}^n 10^{0,1(L_{Wk} + K_{Ai})} \quad (13.1)$$

kde  $L_{Wk}$  je hladina akustického výkonu v k-tém třetinoctávovém pásmu [dB],

$K_{Ai}$  korekce závislá na středním kmitočtu třetinoctávového pásma [dB],

$n$  počet třetinoctávových pásem sledovaného frekvenčního rozsahu.

Pro dosažení hodnot se použijí hladiny  $L_W$  z bodu šest a korekce odečtené z Obr. 11.

### Postup výpočtu nejistoty měření

1. Provede se aritmetický průměr hladin akustického tlaku korigované na hluk pozadí přes všechny měřicí polohy, pro každé třetinoctávové pásmo sledovaného frekvenčního rozsahu a pro každé opakování.
2. Provede se aritmetický průměr vypočítaných hladin pro všechna opakování.
3. Vypočte se směrodatná odchylka  $\sigma_{OMC}$  použitím rovnice 12.4.2.

4. Zjistí se jednotlivé příspěvky k nejistotě  $\sigma_{RO}$  (viz. příspěvky k nejistotě) pro zkoušené zařízení a referenční zdroj zvuku.
5. Provede se výpočet nejistoty  $\sigma_{RO(ST)}$  podle

$$\sigma_{RO(ST)} = \sqrt{u_{(ST)}^2} \quad (13.2)$$

6. Provede se výpočet nejistoty  $u(L_{W(RZZ)})$  podle

$$u(L_{W(RZZ)}) = \sqrt{u_{(RZZ)}^2 + \sigma_{OMC(RZZ)}^2} \quad (13.3)$$

kde  $\sigma_{OMC(RZZ)}$  je nejistota způsobená kalibrací referenčního zdroje zvuku, udávaná výrobcem [dB].

7. Vypočte se směrodatná odchylka  $\sigma_{RO}$  použitím rovnice 12.4.3.
8. Vypočte se celková směrodatná odchylka  $\sigma_{tot}$  použitím rovnice 12.4.1.

#### **Příspěvky k nejistotě $\sigma_{RO}$ pro metodu s referenčním zdrojem zvuku**

$$u = \delta_{metody} + \delta_{upev} - K_1 + C_1 + C_2 + \delta_{přístroj} + \delta_H \quad (13.4)$$

kde  $\delta_{metody}$  je veličina zahrnující všechny nejistoty způsobené metodou měření [dB],

$\delta_{upev}$  veličina zahrnující všechny nejistoty způsobené podmínkami upevnění [dB],

$K_1$  korekce na hluk pozadí [dB],

$C_1$  korekce na referenční veličinu [dB] podle vztahu

$$C_1 = -10 \log \frac{p_s}{p_{s,0}} + 5 \log \left( \frac{\theta}{\theta_0} \right) \quad (13.5)$$

$C_2$  korekce na vyzařovací impedanci [dB] podle rovnice 12.3.3.4,

$\delta_{přístroj}$  veličina zahrnující nejistotu způsobenou měřicími přístroji [dB],

$\delta_H$  veličina zahrnující nejistotu způsobenou kolísáním relativní vlhkosti v měřicím prostoru [dB].

Určení směrodatné odchylky  $\sigma_{RO}$  je možné provést pomocí modelového přístupu, který uvádí vztah 13.4. Nejistota, způsobená měřicí metodou s referenčním zdrojem zvuku, se podle zkušeností uvedených v sérii norem ISO 3740 vztahuje na použitý frekvenční rozsah. Podle objemu dozvukové komory z tabulky 2 je zřejmé, že nejnižší střední frekvence sledovaného třetinooktávového pásma je 200 Hz. Proto je podle normy ČSN EN ISO 3741 příspěvek k nejistotě způsobený měřicí metodou roven 0,3 dB. Vzhledem k tomu, že zkoušené zařízení bude během zkoušky pružně uloženo, je možné nejistotu způsobenou podmínkami upevnění položit rovno nule. Nejistota měřicí techniky se odvíjí na základě třídy přesnosti přístroje. Pro laboratorní účely se využívají měřicí přístroje s třídou přesností jedna, pro které je příspěvek k nejistotě reprezentován hodnotou 0,3 dB. Tabulka 10 uvádí maximální přípustné meze rozsahu relativní vlhkosti. Při jejím dodržení bude dle zkušeností norem nejistota způsobená kolísáním relativní vlhkosti nejhůře 0,5 dB.

Uvážením těchto poznatků a dopočítáním korekcí se dospěje k určení směrodatné odchylky  $\sigma_{RO}$ . Norma ČSN EN ISO 3741 udává typickou hodnotu této odchylky na 0,61 dB.

Celkovou směrodatnou odchylku  $\sigma_{tot}$  lze také určit provedením mezilaboratorní porovnávací zkoušky, která musí být provedena v souladu s ISO 5725, kde je hladina akustického výkonu zkoušeného zařízení určována za podmínek reprodukovatelnosti. Tato zkouška poskytuje celkovou směrodatnou odchylku odpovídající konkrétnímu zařízení, které bylo použito při mezilaboratorní porovnávací zkoušce. [16]

### 13.1 Protokol o měření

Získané výsledky měření zařízení techniky prostředí, podle uvedeného postupu, musí být zpracovány a zaznamenány podle daných specifikací. Protokol o měření musí obsahovat prohlášení, že hladiny akustického výkonu byly určeny v plném souladu s postupy normy, vztahujících se na žádanou přesnost měření. Vzhledem k tomu, že návrh komory i postup a vyhodnocení měření jsem provedl pro přesnou třídu měření, bude se prohlášení týkat normy ČSN EN ISO 3741. Veškeré informace o měření zařízení techniky prostředí musí být zaznamenány podle následujících specifikací. [21]

**Informace o zkoušeném zařízení**

- specifikaci jednotky (typ jednotky, sériové číslo výrobce, rozměry, výrobce, rok výroby),
- popis všech pomocných zařízení pro potřeby zkoušky,
- podmínky provozu použité při zkoušce a interval měření,
- způsob instalace a upevnění,
- polohu zkoušeného zařízení a referenčního zdroje zvuku ve zkušební místnosti.

**Informace o zkušebním prostředí**

- popis zkušební místnosti (rozměry, úpravy povrchu, náčrt zobrazující umístění zkoušeného zařízení),
- teplotu vzduchu, relativní vlhkost a statický tlak v komoře v době zkoušky.

**Informace o použitých měřících přístrojích**

- název, typ, výrobní číslo a výrobce použitých měřících přístrojů,
- datum, místo a metoda kalibrace akustického kalibrátoru,
- prohlášení o tom zda byla u mikrofonů použita ochrana proti proudění vzduchu.

**Naměřené hodnoty a výsledky**

- akustické spektrum výkonu v třetinooktávových pásmech,
- celkovou hladinu váženého akustického výkonu A,
- datum měření,
- průměrné hodnoty naměřené při ustálených podmínkách,
- metoda měření dozvukové místnosti.

## 14 NÁVRH PŘÍSTROJOVÉHO VYBAVENÍ

Základní přístrojové vybavení se sestává z mikrofonu, zesilovače s váhovým filtrem A, kvadrátoru, integrátoru a indikačního zařízení. Potřebné jsou rovněž oktávové propusti. Všechny tyto prvky mohou být oddělenými přístroji nebo sloučeny do ucelené jednotky. Odlišné požadavky jsou kladeny na mikrofon, který by měl být fyzicky oddělen od ostatních přístrojů a spojen s nimi kabelem. [17]

Jedním z cílů této práce bylo navrhnout přístrojové vybavení, který by svými vlastnostmi splňovalo veškeré požadavky pro měření hladin akustických parametrů v difúzním poli. K jejímu vytvoření jsem sáhl po přístrojích předního světového výrobce a dodavatele řešení zvuku, společnosti Brüel & Kjaer.

Oddanost firmy Brüel & Kjaer environmentálnímu trhu trvá déle než šest desetiletí, čímž je doloženo, že se jedná o seriózní a velmi zdatnou společnost působící na poli systémů managementu hluku životního prostředí. Měřicí přístroje této společnosti se tedy nabízí jako vhodné řešení pro veškeré důležité instituce, které se zabývají zvukem a vibracemi.

### 14.1 Mikrofon s předzesilovačem

Typ mikrofonů jsem vybíral na základě jeho parametrů a vlastností, které splňují požadavky IEC 61672-1:2002 na přístroje s přesnou třídou přesnosti.

Pro naše požadavky měření akustických parametrů navrhnuté dozvukové komory se zdá být **typ 4942-A-021** jako ideální volba. Jedná se o kombinaci mikrofonu 4942 a předzesilovače 2471, která je ucelena do jedné jednotky. Na základě této kombinace umožňuje jednotka měření s větší přesností a dlouhodobou stabilitou. Jednotka taktéž disponuje vestavěnou technologií TEDS, což znamená, že veškeré informace potřebné pro automatickou identifikaci (sériové číslo, typ, citlivost) jsou obsaženy přímo v ní.

Základní vlastnosti a specifika:

- Použití: Difúzní pole
- Průměr: ½ palce
- Frekvenční rozsah: 6,3 – 16 000 Hz
- Vlastní šum: 14,6 dB

- Citlivost: 50 mV/Pa
- Teplotní rozsah: -40 až 150 °C
- Pozn.: Mikrofon je vhodný pro použití v prostředí s vysokou vlhkostí



Obr. 39 – Mikrofon s předzesilovačem Brüel & Kjær typ 4942-A-021

#### **Příslušenství:**

##### **Propojovací kabel AO-0087**

Jedná se o propojovací kabel z předzesilovačů. Kabel je osazen konektory typu BNC M. Vhodný do prostředí do teploty 85°C.



Obr. 40 – Propojovací kabel Brüel & Kjær typ A0-0087

##### **Ochrana mikrofonu proti proudění větru UA-0237**

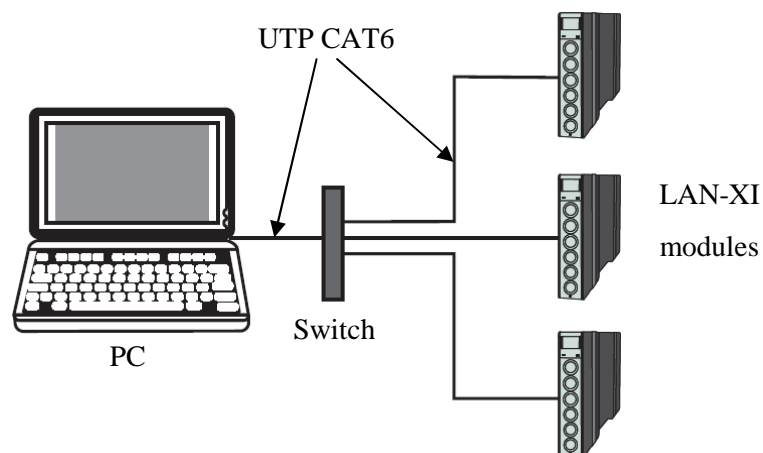
V případě měření zařízení techniky prostředí, kdy se počítá s neustálým prouděním vzduchu je nutné mikrofon opatřit ochranou, která by potlačila nežádoucí vliv na měření. Typ UA0237 je ochrana o průměru 90 mm, určená pro 1/2 palcový mikrofon.



Obr. 41 – Ochrana mikrofonu proti větru Brüel &Kjaer typ UA-0237

## 14.2 Moduly LAN-XI

Dalšími nezbytnými komponentami měřicího systému jsou propojovací panely pro kabelové rozvody. Můj výběr se soustředil především na jednoduchost a flexibilitu. Proto jsem zvolil systém LAN-XI, který je univerzální a může být použit samostatně nebo jako kompaktní jednotka s více moduly. Celý systém je možné si individuálně sestavit pomocí vstupně/výstupních modulů. Podle zvolených typů modulů se odvíjí i frekvenční rozsah od 0 Hz do 102,4 kHz. Jistou flexibilitu systém rozšiřuje tím, že nabízí vyměnitelné přední panely, což umožňuje jednoduše přestavět jednotlivé moduly podle použitých měřicích prvků a kabelů. Jednotlivé moduly, či celá kompaktní jednotka může být napájena buď z elektrické sítě, baterií nebo pomocí LAN rozhraní, které slouží také jako komunikační kanál. Pro zmíněnou komunikaci skrz kabelovou technologii LAN, firma Brüel &Kjaer doporučuje použít stíněný typ CAT6, který disponuje potřebnou přenosovou rychlostí. [25]



Obr. 42 – Propojení Brüel &Kjaer LAN-XI modulů s PC

Díky tomuto způsobu propojení LAN-XI modulů s počítačem je možné měřící systém ovládat z jakéhokoliv počítače, který se v dané síti nachází a obsahuje potřebný software. Výrobce ve svém sortimentu nabízí rozšiřovací wifi moduly, které ještě dále snižují kabelovou náročnost.

Při výběru jednotlivých modulů jsem vybíral podle jejich funkce a počtu kanálů. I přesto, že návrh s automatickým pojezdem mikrofonu by razantně snížil nutnost velkého počtu kanálů, je potřeba také předpokládat, že tento způsob se neosvědčí a bude nezbytné použít stacionární mikrofony. V tom případě jich bude minimálně šest z čehož na základě nezpůsobivosti prostředí, může nastat situace, že bude potřeba tento počet zvýšit. Navíc je nutné, také mít rezervované kanály pro senzory měření mikroklimatických podmínek (teplota, tlak, vlhkost). Z těchto skutečností se zdá být rozumné zvolit moduly, které budou disponovat alespoň dvanácti kanály.

#### **Modul LAN-XI typ 3050**

- Počet kanálů: 4/6
- Frekvenční rozsah: 0-51,2 kHz
- Rychlost vzorkování: 131 000 vzorků/s
- Použití: Měření zvuku a vibrací



*Obr. 43 – Modul Brüel & Kjær LAN-XI typ 3050*



**Modul LAN-XI typ 3056**

- Počet kanálů: 8 kanálů
- Frekvenční rozsah: 0-51,2 kHz
- Rychlost vzorkování: 131 000 vzorků/s
- Použití: Sledování nízkofrekvenčních napěťových signálů



*Obr. 44 – Modul Brüel & Kjær LAN-XI typ 3056*

Veškeré tyto moduly lze osadit do specializovaného krytu 3660-C, které nabízí možnost umístění až 5 modulů.



*Obr. 45 – Brüel & Kjær LAN-XI Front-end kryty 3660-C a 3660-D*

### 14.3 Referenční zdroj zvuku

Jak již zmiňuje kapitola 8.5, referenční zdroj zvuku musí splňovat požadavky uvedené v ISO 6926. Při výběru tohoto zařízení jsem volil na základě doporučení. V dnešní době velmi používaným referenčním zdrojem zvuku je **typ 4204**. Využívá se pro stanovení akustického výkonu zařízení, podle metod uvedených v normě ČSN EN ISO 3741 a 3747. Tento typ se také často využívá ve stavební akustice pro stanovení absorpci zvuku a návrhu zvukové izolaci místností.

Referenční zdroj zvuku 4204 se v zásadě skládá ze speciálně navrženého radiálního ventilátoru poháněného výkonným asynchronním motorem. Tento motor disponuje kvůli vysokému momentu setrvačnosti velmi konstantní rychlostí otáček. Celá konstrukce je sestavena tak, aby se minimalizovali odrazy od částí vnějšího krytu. Pro jednoduché přenášení obsahuje zařízení dvě držadla.

Základní vlastnosti a specifikata:

- Frekvenční rozsah: 100 – 20 000 Hz
- Teplotní rozsah: -10 až 50 °C
- Kompaktní a robustní



Obr. 46 – Referenční zdroj zvuku Brüel & Kjær 4204

## 14.4 Zvukový kalibrátor

Celý měřicí systém by měl být schopen při měření ve stejných podmínkách se stejným zkoušeným zařízením vykazovat stejné, popřípadě hodnoty s minimální odchylkou na všech frekvencích sledovaného rozsahu. Proto je důležité jednotlivé mikrofony kalibrovat pro náhodný dopad akustických vln, jak je stanoveno v IEC 61183. Ke kalibraci musí docházet před a po každé sérii měření, a to akustickým kalibrátorem splňujícím požadavky IEC 60942:2003. [16]

Pro potřeby našeho měření v laboratoři volím zvukový kalibrátor typu 4231. Jedná se o velmi robustní a stabilní přístroj, který splňuje veškeré požadavky pro přesnou třídu měření. Přístroj je osazen baterií a vyměnitelnými hlavicemi pro různé velikosti mikrofonů (od 1/8“ až po 1“).

Kalibrace se provádí při frekvenci 1000 Hz a velikosti kalibračního tlaku 94 dB, což umožňuje kalibraci provést i v hlučném prostředí. Tento akustický kalibrátor se vyznačuje přesností  $\pm 0,2$  dB.



*Obr. 47 – Akustický kalibrátor Brüel & Kjær typ 4231*

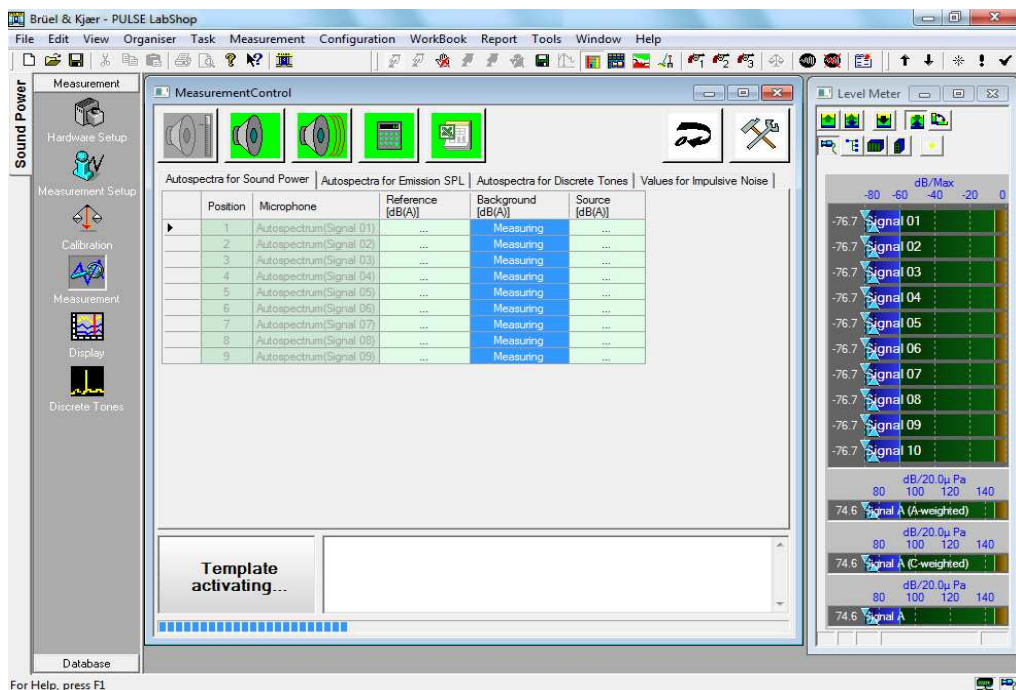
Kalibrace akustického kalibrátoru musí být v pravidelných intervalech prováděna ve specializovaných laboratořích nejméně jednou za dva roky.

## 14.5 Software PULSE

Již při realizaci návrhu laboratoře bylo jasné, že veškerá měřená data a jejich vyhodnocování bude prováděno na počítači. Z toho důvodu jsem se rozhodl programové vybavení laboratoře obohatit o jeden z nejrozsáhlejších softwarů z oblasti měření a analýzy hluku, který nese název PULSE. Takto navržený celek tvoří kvalitní analyzátor založeného na platformě osobního počítače.

Jedná se o software, který umožňuje sběr dat a jejich analýzu v reálném čase a to podle měřicích metod a postupů z mezinárodních norem série ISO 3740, ISO 9614-2, ISO 11201 a zkušebních předpisů pro hluk informačních technologií ISO 7779. Ve spojení s automatizovaným vytvářením výsledných zpráv se PULSE stává nástrojem, který umožňuje velice rychlé získávání výsledků měření. Multianalýza PULSE umožňuje současnou práci a zpracování dat několika různými způsoby analýzy současně, např. FFT analýza, CPB analýza či analýza celkových úrovní.

Technologie hardware PULSE, umožňuje připojení od jednoduchých a nejstarších snímačů až po moderní snímače včetně podpory TEDS. Také umožňuje rozsáhlá propojení s nástroji Microsoft Word nebo Excel. Tím PULSE, zjednodušuje celý proces měření akustických parametrů od kalibrace, sběru dat a analýzy až po vytváření výsledných zpráv a reportů. [26]



Obr. 48 – Ukázka prostředí softwaru Brüel & Kjær PULSE LabShop

## 14.6 Zhodnocení zvoleného přístrojového vybavení

Takto zvolené přístrojové vybavení pro měření akustických parametrů laboratoře techniky prostředí se tváří jednoduše a zároveň velmi profesionálně. Veškeré přístroje i software pochází z jedné firmy, což ukazuje na spolehlivou kompatibilitu jednotlivých částí měřicího systému mezi sebou a také na zjednodušený servis a podporu při komplikacích.

Navrhovaný mikrofon je přímo určen pro měření v dozvukové místnosti a může být bez problémů nainstalován na otočné rameno nebo umístěn stacionárně. Ochrana proti větru by měla spolehlivě zajistit, že neustálé proudění vzduchu neovlivní kvalitu měření. Dále podle provedených výpočtů by propojovací kabel dlouhý 25 m s rezervou vystačil pro pohybující se mikrofon na otočném rameni. Tato délka se ovšem může lišit v závislosti na umístění LAN-XI modulů v řídicí kabině.

Velmi kvalitním produktem se zdají být i moduly LAN-XI. Nejen kvůli jejich univerzálnosti, ale zejména kvůli implementované technologii TEDS. Díky ní odpadá nutnost manuálních nastavování a identifikace snímačů a mikrofonů. Pro potřeby laboratoře bych využil dvou šestikanálových modulů 3050 určených pro osazení mikrofonů a jednoho modulu 3056 pro snímače tlaku, vlhkosti, teploty a popř. rychlosti proudění vzduchu. K těmto panelům bych do budoucna přiřadil i kombinovaný modul baterie a záznamového zařízení BZ-7848-A, který by sloužil jako záložní zdroj (UPS) při nečekaném výpadku napájení počítače či poruše. Tento modul dokáže zálohovat data ze šesti kanálů po dobu až 4 hodin. Všechny tyto moduly bych uložil do specializovaného krytu 3660-C.

Celý tento měřicí systém zastřešuje software PULSE, který podle zvolené metody automaticky během měření vyhodnocuje hladiny akustického výkonu, směrodatné odchylky a je i schopen sám zhodnotit jestli nebyly porušeny standardní kritéria hluku pozadí a změny mikroklimatických podmínek.

## ZÁVĚR

Zadaným cílem této diplomové práce bylo vytvořit návrh zkoušek akustických parametrů zařízení techniky prostředí v kalorimetrické komoře, jejichž výstupem by byly výsledky, které by byly reprodukovatelné a přesně by stanovovaly hlukovou expozici zkoušeného zařízení. Získané výsledky se ovšem odvíjí od konstrukčního a geometrického řešení kalorimetrické komory, proto tato práce obsahuje i návrhy jednotlivých prvků komory, které se shodují se směrnicemi daných norem. Již z podstaty práce nebylo možné popsat komplexní problematiku ze všech úhlů pohledu. Přesto jsem se pokusil o co možná nejhlubší pohled při udržení vhodného rozsahu práce.

Práce je rozdělena do několika oddělených celků, které se zabývají jednotlivými specifiky a navzájem na sebe navazují. V nejširším pohledu je práce rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické. Cílem teoretické části bylo vytvořit čtivě psaný text, který by mi sloužil jako podklad, při vypracovávání praktické části.

V teoretické části jsem se zaměřil na popis základních akustických veličin, které by čtenáři umožnili pochopit podstatu šíření akustických vln se základními znalostmi fyziky a termomechaniky. Zvláštní pozornost jsem v této části věnoval příčinám vzniku nežádoucího hluku u zařízení techniky prostředí a jejich prvků. Tento popis jsem rozdělil na příčiny mechanického a aerodynamického původu, který jsem se snažil obohatit o výpočetní vztahy, z kterých lze teoreticky stanovit hladiny akustického výkonu jednotlivých dílčích částí strojního zařízení. V závěru této části je pojednáno o možnostech experimentálního stanovení akustických parametrů strojního zařízení, měřením hluku ve speciálních laboratořích a v běžných technických podmínkách.

Praktická část práce se již zabývá návrhem samotné kalorimetrické komory s přihlédnutím na požadavky univerzálnosti této stavby. Jako vodítko mi posloužila dokumentace prvotního návrhu, shrnutá v deváté kapitole, která obsahuje rozměrové a konstrukční řešení univerzální kalorimetrické komory. Z poznatků této kapitoly jsem se snažil co nejefektivněji využít možnosti, které se nabízely a navrhnout komoru tak, aby splňovala veškeré nároky pro požadovanou třídu přesnosti měření a zkoušeného zařízení. Postupem práce jsem zjistil, že navrhované rozměry komory nevyhovují, a proto jsem se zaměřil na jejich optimalizaci. Prioritou bylo splnit veškeré požadavky na difúznost prostoru, a zároveň zajistit maximální možný objem, který dispoziční možnosti haly umožňují.

Z konstrukčního hlediska nastaly také nejasnosti, protože samotná konstrukce měla být provedena z chladírenských panelů, u kterých nejsou známy veškeré potřebné technické parametry. Konkrétně se jedná o součinitel zvukové pohltivosti, jehož měření výrobci neprovádějí, protože z hlediska primární účelnosti nemá tento parametr žádný význam. Na základě této skutečnosti, jsem pro zvolený objem komory, provedl výpočty maximálních možných hodnot součinitelů zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci a vlhkosti daného prostoru. Během návrhu komory jsem si uvědomil několik komplikací a poznatků, které by při budoucích měřicích úkonech mohly způsobovat problémy. Součástí práce je tedy jejich rozbor a návrh možného řešení, obohacený o inovační prvky, jako je například využití obloukového posuvného ramena. Jistá část práce se zaměřuje na možnosti prostorového upořádání měřicích prvků, které splňuje veškeré požadavky a může být jednoznačně spojováno se získanými výsledky. V neposlední řadě jsem také vytvořil metodický postup celého měřicího procesu a následného vyhodnocení. V závěru praktické části je vypracován návrh přístrojového vybavení, s přihlédnutím na aktuální trendy, a možnosti v měřicí technice.

Správná funkce mnou navržených prvků kalorimetrické komory nemusí být dosažena, neboť nedošlo k jejich praktickému ověření. Mnou provedené akustické úpravy závisí na správném dodržení řady detailů v průběhu výstavby. Předpokladem úspěšné realizace je dostatečně podrobná projektová dokumentace a kvalifikovaná kontrola v průběhu výstavby. Je na rozhodnutí projektanta, případně stavitele, zda je účelné kontrolovat účinek akustických úprav v průběhu výstavby měřeními a podle výsledků navrhovat případné úpravy projektu, nebo rozhodnutí o nutnosti případných změn činit až na základě výsledků měření akustických vlastností dohotovené místnosti.

Základem je vytvořit adekvátní podmínky na určitém frekvenčním rozsahu a postupem času, vlivem neustálé optimalizace jednotlivých prvků komory a měřicího systému, tento frekvenční rozsah rozšiřovat. Optimalizace může vést také k rozšíření měřicích zařízení s odlišným charakterem vyzařování akustické energie, například s tónovými složkami.

Práce vychází ze svého zadání tak, aby splnila všechny její body. Rád bych ještě podotkl, že tato práce nemá nahrazovat práci týmu odborníků, kteří samotný návrh a výstavbu reálně řeší. Tato práce pro mě byla přínosem a to především v rozšíření mých znalostí z hlediska technické akustiky.

## CONCLUSION

Desired goal of this thesis was to create a suggestion of testing acoustic parameters of Equipment Environmental Engineering in the calorimeter chamber. Desired outcome of the proposal were the results, which would be reproducible and which would accurately determined the noise exposure of test device. However, the results depends on the structural and geometric solutions of calorimetric chamber, based on these assumptions, the work includes suggestion for individual elements of the chamber, which is in compliance with specific standards. By nature of this work, it was not possible to describe all the issues from all angles. Nevertheless, I tried to create the most comprehensive description while maintaining the appropriate scope of work.

The work is divided into several parts that deal with different specifics and mutually follow each other. The aim of theoretical part was to create a readable written text, which would serve me as a basis for the practical part.

In the theoretical part, I focused on description of the basic acoustic quantities which would allow readers to understand the nature of acoustics waves with a basic knowledge of physics and thermodynamics. In this part, I mainly focused on the causes of undesirable noise in device of technology environment and special parts. This description was divided into the causes of mechanical and aerodynamic origin, which I tried to enrich with equations, which can theoretically determine the sound power level of individual machinery components. The end of this section describes the options experimental determination of acoustic parameters of machinery device by measurement in special laboratories.

The practical part of this thesis deals with the design of the calorimetric chamber, taking into account the requirements of the multifunctionality of this building. When I was working on this part, I used the assumptions from the initial design documentation, which contains the dimensional and structural design of universal calorimetric chamber. Based on the findings of this chapter, I tried to use the most of opportunities that were offered to design calorimetric chamber to fulfill all claims for required accuracy class and test device. Over time I realized that the chamber dimensions do not meet the standards, so I started to focused on optimizing the dimensions. The priority was to meet all the requirements for diffuse space, while ensuring the maximal possible volume, which hall options allow.



From a structural point of view also occurred some confusion because the structure itself should be made of cold panels, about which are not known all technical parameters, specifically the sound absorption coefficient. Manufacturers did not measure, because in terms of primary effectiveness, this parameter has no meaning. Based on this fact, I calculated the maximum possible values of sound absorbing coefficient, depending on the frequency and humidity in measured environment. During designing calorimetric chamber, I came across some complications which could possibly cause some problems in the future during measurement tasks. So this thesis analyzed these problems and suggested possible solutions, enriched with innovative features, such as automatic microphone travel. One chapter of the work focuses on the possibilities of spatial arrangement of the measuring elements, which meet all requirements and can be clearly associated with the obtained results. Last but not least, I created a methodical procedure of the entire measuring process and subsequent evaluation. At the end of the practical section I created a suggestion of instrumentation, taking into account the current trends and possibilities in measurements.

Proper function of the elements of calorimetric chamber, which I suggested, might not be reached, because they were not practically verified. Acoustic treatment, made by me, depends on proper observance of many details during construction. A prerequisite for successful implementation is the sufficiently detailed project documentation and qualified supervision, during construction. It depends on the designer or builder, whether it is advisable to check the effect of acoustic adjustments during the construction by measuring and according to the results, suggest a possible modifications, or decisions about the necessity to make any possible changes based on the results of measuring of the acoustic properties of the finished chamber.

The basis is to create the right conditions for a particular frequency range and based on the influence of optimization of the individual elements of the chamber and the measuring system, extend this frequency range. Optimization can also lead to the expansion of the measuring device having a different acoustic energy radiation.

In this thesis, I was able to meet all the points from the assignment. I would like to point out that this work doesn't replace the work of a team of experts who practically carry out the design and construction object like this. This work was beneficial for me, especially in extending my knowledge in terms of technical acoustics.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Česká republika. Ochrana zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. In: 272. 2011.
- [2] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [3] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998, 177 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1262-3.
- [4] JANDÁK, Zdeněk. *Vibrace přenášené na člověka*. Státní zdravotní ústav [online]. 2007, č. 1 [cit. 2014-03-09]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/vibrace-prenasene-na-cloveka>
- [5] SMITH, Sean. Department of Energy & Climate Change. *Acoustic Noise Measurements of Air Source Heat Pumps* [online]. 2011, EE0214, s. 155 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <https://www.gov.uk/government/publications/acoustic-noise-measurements-of-air-source-heat-pumps>
- [6] MENC, Lukáš. *Hluk a vibrace z dopravy a jejich působení na lidský organismus* [online]. Univerzita Pardubice, 2002 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: [http://envi.upce.cz/pisprace/ks\\_pce/menc.pdf](http://envi.upce.cz/pisprace/ks_pce/menc.pdf). Seminární práce. Dopravní Fakulta Jana Pernera.
- [7] DEDOUCHE, Karel, Jiří RANSDORF a Richard NOVÝ. *Hluk a vibrace strojních zařízení: postgrad. studium pro stud. fak. elektrotechn.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 1990, 78 s. ISBN 80-010-0205-5.
- [8] MATĚJČEK, Jiří. Energetická zařízení s.r.o. *Hluk v otopných soustavách* [online]. 2013, č. 1, s. 5 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.ptas.cz/cs/dodavky-tepla/jak-to-funguje/hluk-v-otopnych-soustavach/>
- [9] GEBAUER, Günter, Helena HORKÁ a Olga RUBINOVÁ. *Vzduchotechnika*. Brno: Era, 2005, xviii, 262 s. ISBN 80-736-6027-X.
- [10] MATUŠKA, Tomáš. *Experimentální metody v technice prostředí*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, 200 s. ISBN 80-010-3291-4.

- [11] NELSON, David A. National Instruments. *Acoustic Test Chambers and Environments* [online]. 2012, č. 1 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/264/en/>
- [12] Akustické aplikace pro inteligentní budovy. In: *Měření doby dozvuku: Laboratorní cvičení* [online]. Fakulta elektrotechnický. Katedra fyziky, 2014 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: [http://acoust.feld.cvut.cz/teach/uak\\_files/uloha6.pdf](http://acoust.feld.cvut.cz/teach/uak_files/uloha6.pdf)
- [13] Enthalpy & Entropy. *Balanced Ambient Room-Type Calorimeter* [online]. 2012, [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: [http://www.sh-hanshang.com/en/product\\_list.html](http://www.sh-hanshang.com/en/product_list.html)
- [14] PETERSON, Jeffrey Shawn. Centers of Disease Control and Prevention. *Design and Instrumentation of a Large Reverberation Chamber* [online]. 2013, č. 1 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/dilrc.pdf>
- [15] ČSN EN ISO 3740. *Akustika Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku.: Směrnice pro užití základních norem a pro přípravu zkušebních předpisů pro hluk*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [16] ČSN EN ISO 3741. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku: Přesné metody pro dozvukové zkušební místnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [17] 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*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [18] ČSN EN ISO 3745. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku: Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [19] ČSN EN 61672-1. *Elektroakustika - Zvukoměry: Část 1: Technické požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [20] ČSN EN ISO 5135. *Akustika - Určení hladin akustického výkonu hluku koncových prvků, koncových jednotek a regulačních a uzavíracích součástí*

- vzduchotechnických zařízení na základě měření v dozvukové místnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [21] ČSN EN 12102. *Klimatizátory vzduchu, jednotky pro chlazení kapalin, tepelná čerpadla a odvlhčovače s elektricky poháněnými kompresory pro ohřívání a chlazení prostoru: Měření hluku přenášeného vzduchem – Stanovení hladiny akustického výkonu*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [22] ČSN EN ISO 354. *Akustika - Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [23] ČSN EN 10346. *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky – Technické dodací podmínky*. Brusel: Avenue Marnix 17, 11/2009.
- [24] NOVÝ, Richard. Vzduchotechnická zařízení. *Pružné ukládání strojů* [online]. 2011, č. 1 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/7886-pruzne-ukladani-stroju>
- [25] BRÜEL & KJAER. *LAN-XI Data Acquisition Hardware for PULSE™: Product Data*. Denmark, 2013.
- [26] BRÜEL & KJAER. *PULSE Sound Power Type 7799: Product Data*. Denmark, 2013.
- [27] ČSN EN 15251. *Vstupní parametry vnitřního prostředí pro návrh a posouzení energetické náročnosti budov s ohledem na kvalitu vnitřního vzduchu, tepelného prostředí, osvětlení a akustiky*. Brusel: Avenue Marnix, 2011.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

BNC	<b>B</b> ayonet <b>N</b> eill <b>C</b> oncelman connector.
CAT	<b>C</b> ategory.
COP	<b>C</b> oefficient of <b>P</b> erformance.
CPB	<b>C</b> onstant <b>P</b> ercentage <b>B</b> andwidth.
ČMI	Český <b>m</b> etrologický <b>i</b> nstitut.
ČSN	Česká technická <b>n</b> orma.
FFT	<b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>T</b> ransform.
IEC	<b>I</b> nternational <b>E</b> lectrotechnical <b>C</b> ommission.
ISO	<b>I</b> nternational <b>O</b> rganization for <b>S</b> tandardization.
LAN	<b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork.
RZZ	<b>R</b> eferenční zdroj zvuku.
TČ	<b>T</b> epelné čerpadlo.
TEDS	<b>T</b> ransducer <b>E</b> lectronic <b>D</b> ata <b>S</b> heet.
UPS	<b>U</b> ninterruptible <b>P</b> ower <b>S</b> ource.
UTP	<b>U</b> nshielded <b>T</b> wisted <b>P</b> air.

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1: Prahové křivky slyšitelnosti [2] .....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2: Šíření zvuku od zdroje ve formě vlnoploch [3] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3: Časový průběh harmonického kmitání [2] .....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4: Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu [2].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 5: Schéma rovinné vlny [2] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 6: Úplné stojaté vlnění [2] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7: Částečné stojaté vlnění [2] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 8: Třetinooktávové pásmo .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9: Lineární a decibelová stupnice pro akustický výkon.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10: Hladiny akustického tlaku v různém prostředí.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11: Útlumová charakteristika filtru A [2] .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 12: Relativní spektrum ventilátorů [2].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 13: Ukázka utržení proudnic v pravoúhlém koleni [2] .....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 14: Akustické pole pravoúhlého uzavřeného prostoru [3].....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 15: Volné zvukové pole.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 16: Difúzní zvukové pole .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 17: Smíšené zvukové pole .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 18: Závislost dekrementu útlumu na relativní vlhkosti [2] .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 19: Plně bezdozvuková komora.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 20: Polobezdozvuková komora.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 21: Měřicí plocha tvaru polokoule [3].....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 22: Blokové schéma zvukoměru.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 23: Vliv časových konstant na vyhodnocení měření.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 24: Poloha měřicího mikrofonu [10] .....</i>	<i>55</i>

<i>Obr. 25: Blokové schéma činnosti digitálního analyzátoru .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 26: Schematické půdorysné umístění laboratoře techniky prostředí v hale.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 27: Ukázka kompenzované kalorimetrické komory [13].....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 28: Půdorysné rozměry komory.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 29: Svislý podélný řez komory.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 30: Ukázka sendvičového panelu s detailem na provázání plechů .....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 31: Ukázka odrazu zvukových vln v dozvukové komoře .....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 32: Princip Helmholtzova rezonátoru [3].....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 33: Celkový pohled v seskupení s předními děrovanými panely .....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 34: Řez izolátorem chvění ISTAKO P42 .....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 35: Ukázka možnosti automatického posuvu mikrofonu .....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 36: Všeobecné podmínky minimálních vzdáleností mezi prvky měřící soustavy.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 37: Půdorysné rozmístění měřících prvků v dozvukové komoře.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 38: Svislý podélný řez dozvukové komory s rozmístěnými měřícími prvky .....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 39: Mikrofon s předzesilovačem Brüel &amp;Kjaer typ 4942-A-021.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 40: Propojovací kabel Brüel &amp;Kjaer typ A0-0087.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 41: Ochrana mikrofonu proti větru Brüel &amp;Kjaer typ UA-0237.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 42: Propojení Brüel &amp;Kjaer LAN-XI modulů s PC.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 43: Modul Brüel &amp;Kjaer LAN-XI typ 3050.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 44: Modul Brüel &amp;Kjaer LAN-XI typ 3056.....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 45: Brüel &amp;Kjaer LAN-XI Front-end kryty 3660-C a 3660-D.....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 46: Referenční zdroj zvuku Brüel &amp;Kjaer 4204 .....</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 47: Akustický kalibrátor Brüel &amp;Kjaer typ 4231 .....</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 48: Ukázka prostředí software Brüel &amp;Kjaer PULSE LabShop.....</i>	<i>108</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1: Příklady návrhových hladin akustického tlaku pro některé typy prostorů.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 2: Doporučený minimální objem dozvukové zkušební místnosti .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 3: Doporučené podíly rozměrů pro pravoúhle místnosti z ČSN EN ISO 3741 ...</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 4: Vhodné rozměry dozvukové komory .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 5: Maximální teoretické hodnoty součinitele zvukové pohltivosti všech ploch.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 6: Vhodné rozměry rezonančního absorbéru pro určité rezonanční frekvence....</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 7: Průměrné parametry potenciálně zkoušených zařízení.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 8: Vlastnosti izolátoru ISTAKO P42 [24] .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 9: Mezinárodní normy stanovující různé metody pro určení hladin akustického výkonu strojů a zařízení [17].....</i>	<i>88</i>
<i>Tabulka 10: Přípustné meze kolísání atmosférické teploty a relativní vlhkosti vzduchu během měření [16].....</i>	<i>90</i>
<i>Tabulka 11: Horní mezní hodnoty směrodatné odchylky reprodukovatelnosti [16].....</i>	<i>94</i>



**SEZNAM PŘÍLOH**

- P I      Analýza potenciálně zkoušených zařízení (TČ, Split jednotky)
- P II     Vypočtené rozměry dozvukové komory
- P III    Ukázka zapojení měřícího systému za pomoci modulů LAN-XI
- P IV    Ukázka protokolu o zkoušce
- P V     Vizuální ukázka umístění zkoušeného zařízení a automatického posuvu mikrofону

## PŘÍLOHA P I: ANALÝZA POTENCIÁLNĚ ZKOUŠENÝCH ZAŘÍZENÍ (TČ, SPLIT JEDNOTKY)

Výrobce	Označení	Výkon [kW] (A2W35)	COP [-] (A2W35)	Rozměry [m] ( <i>v x š x h</i> )	Hmotnost [kg]	Hladina akustického tlaku [dB]	Objem [m <sup>3</sup> ]
Vaillant	geoTherm VWL 62/3	5,70	3,90	1,80 x 0,60 x 0,84	141	45	0,91
	geoTherm VWL 82/3	7,40	4,00	1,80 x 0,60 x 0,84	148	46	0,91
	geoTherm VWL 102/3	9,60	3,90	1,80 x 0,60 x 0,84	152	47	0,91
Nibe	AP-AW10-10C	10,40	3,40	1,86 x 0,85 x 0,75	300	48	1,17
	SPLIT	9,60	3,60	0,85 x 0,97 x 0,37	140		0,31
IVT	Air Split 11	9,60	3,20	1,34 x 1,05 x 0,36	126	52	0,51
Revel	Pex LWRa	7,00	3,56	0,75 x 1,03 x 0,37	102	51	0,29
EasyMaster	EM26Z	8,10	3,20	1,20 x 0,53 x 0,72	175	50	0,46
Regulus	EcoAir 410	8,80	3,83	1,18 x 1,38 x 0,61	201	57,3	0,98
	EcoAir 110	8,55	3,30	1,28 x 1,19 x 0,41	156	56	0,62

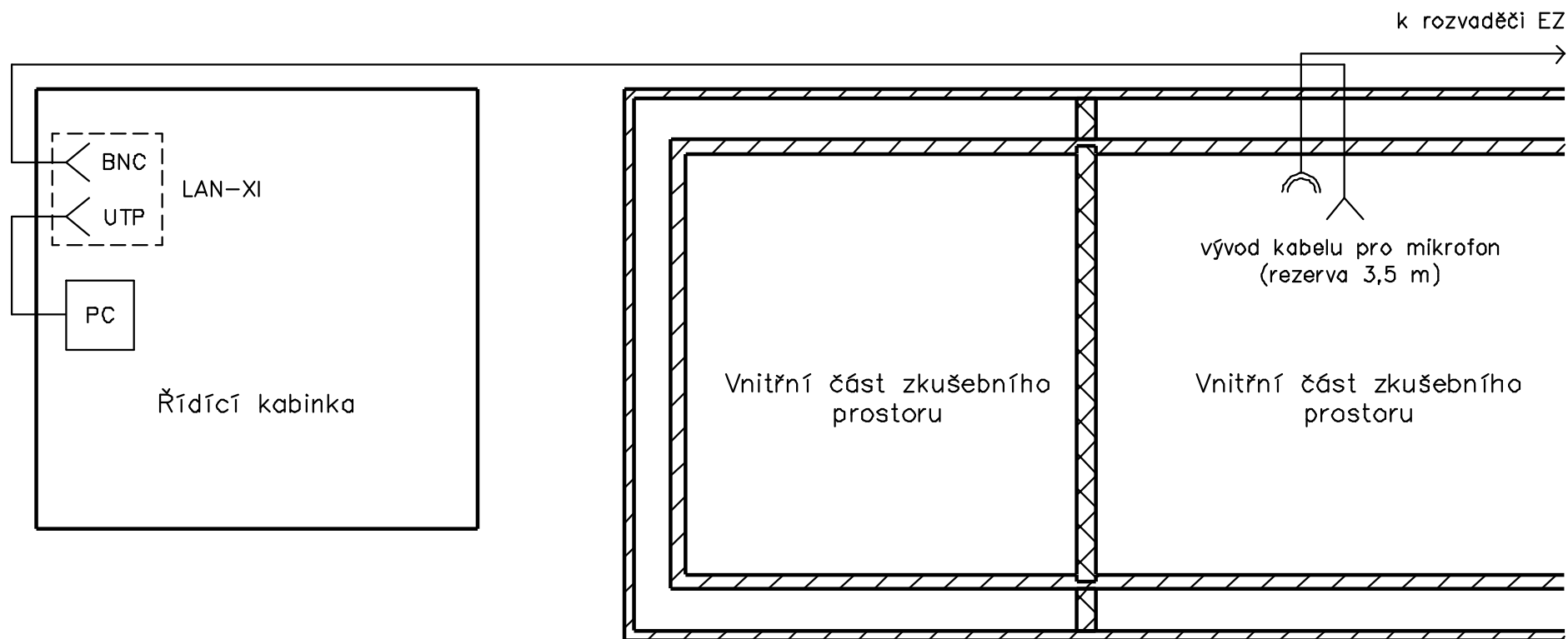
Nosreti	WBR 9,5 H-B	7,50	3,46	0,62 x 1,01x 0,37	67	55	0,23
	WWBC 3,8 H-B	3,00	3,00	0,67 x 0,94 x 0,29	57	52	0,18
	WWBC 9,5 H-B	6,80	3,10	0,69 x 1,12 x 0,47	91	58	0,36
	WWBC 13,5 H-A-S	9,20	3,20	0,96 x 0,66 x 0,66	112	63	0,42
	WWBC 19,5 H-A-S	13,80	2,90	0,96 x 0,66 x 0,66	137	63	0,42
PZP	AWX HPAWX 08	8,10	3,50	1,17 x 1,23 x 0,60	165	51	0,86
	AWX HPAWX 10	11,00	3,70	1,17 x 1,29 x 0,54	185	51	0,81
	AWX HPWX 08	8,70	3,30	1,17 x 1,49 x 0,64	190	52	1,11
	Split HPAW 18	17,50	3,60	1,50 x 0,58 x 0,60	180	57	0,52
Zubadan	SHW80VHA	6,40	3,96	1,35 x 0,95 x 0,33	120	51	0,42
	SHW230YHA	18,40	2,90	1,34 x 0,95 x 0,33	148	59	0,42
	HW140YHA	8,76	3,26	1,35 x 1,02 x 0,33	148	53	0,45
Stiebel	WPL IS-2 Split	4,75	4,01	0,92 x 1,10 x 0,52	78	54	0,52
	WPL 25 I-2	8,14	3,89	1,10 x 1,27 x 0,52	93	54	0,72
De Dietrich	HPI 6MR Split	6,00	4,00	0,94 x 0,95 x 0,33	43	48	0,30

## PŘÍLOHA P II: VYPOČTENÉ ROZMĚRY DOZVUKOVÉ KOMORY

<b>Rozměry [m]</b> <i>(d x š x v)</i>	<b>Objem</b> <b>[m<sup>3</sup>]</b>	<b>Obsah</b> <b>[m<sup>2</sup>]</b>	<b>Tělesový</b> <b>rozměr [m]</b>	<b>Max. tělesový</b> <b>rozměr [m]</b>	<b>Poměry stran</b>
5,5 x 4,3 x 3,0	70,95	106,10	7,60	7,87	1,83:1,43:1
5,6 x 4,2 x 3,0	70,56	105,84	7,62	7,85	1,87:1,40:1
5,6 x 4,3 x 3,0	72,24	107,56	7,67	7,91	1,87:1,43:1
5,7 x 4,1 x 3,0	70,11	105,54	7,64	7,83	1,90:1,37:1
5,7 x 4,2 x 3,0	71,82	107,28	7,69	7,90	1,90:1,40:1
5,7 x 4,3 x 2,9	71,08	107,02	7,71	7,87	1,97:1,48:1
5,7 x 4,3 x 3,0	73,53	109,02	7,74	7,96	1,90:1,43:1
5,8 x 4,1 x 3,0	71,34	106,96	7,71	7,88	1,93:1,37:1
5,8 x 4,2 x 3,0	73,08	108,72	7,76	7,94	1,93:1,40:1
5,8 x 4,3 x 3,0	74,82	110,48	7,82	8,01	1,93:1,43:1
5,9 x 4,0 x 3,0	70,80	106,60	7,73	7,86	1,97:1,33:1
5,9 x 4,1 x 2,9	70,151	106,38	7,75	7,84	2,03:1,41:1
5,9 x 4,1 x 3,0	72,57	108,38	7,79	7,93	1,97:1,37:1
5,9 x 4,2 x 2,9	71,86	108,14	7,80	7,90	2,03:1,45:1
5,9 x 4,2 x 3,0	84,34	110,16	7,84	7,99	1,97:1,40:1
5,9 x 4,3 x 2,8	71,04	107,86	7,82	7,87	2,11:1,54:1
5,9 x 4,3 x 2,9	73,57	109,90	7,86	7,96	2,03:1,48:1
5,9 x 4,3 x 3,0	76,11	111,94	7,89	8,05	1,97:1,43:1
6,0 x 4,1 x 2,9	71,34	107,78	7,82	7,88	2,07:1,41:1
6,0 x 4,2 x 2,8	70,56	107,52	7,84	7,85	2,14:1,50:1
6,0 x 4,2 x 2,9	73,08	109,56	7,88	7,94	2,07:1,45:1

6,0 x 4,3 x 2,8	72,24	109,28	7,89	7,91	2,14:1,54:1
6,0 x 4,3 x 2,9	74,82	111,34	7,93	8,01	2,07:1,48:1
6,1 x 3,9 x 3,0	71,37	107,58	7,84	7,88	2,03:1,30:1
6,1 x 4,0 x 2,9	70,76	107,38	7,85	7,86	2,10:1,38:1
6,1 x 4,0 x 3,0	73,20	109,40	7,89	7,95	2,03:1,33:1
6,1 x 4,1 x 2,9	52,53	109,18	7,90	7,92	2,10:1,41:1
6,1 x 4,1 x 3,0	57,03	111,22	7,94	8,01	2,03:1,37:1
6,1 x 4,2 x 2,9	74,30	110,98	7,95	7,99	2,10:1,45:1
6,1 x 4,2 x 3,0	76,86	113,04	7,99	8,08	2,03:1,40:1
6,1 x 4,3 x 2,9	76,07	112,78	8,01	8,05	2,10:1,48:1
6,1 x 4,3 x 3,0	78,69	114,86	8,04	8,14	2,03:1,43:1
6,2 x 3,9 x 3,0	72,54	108,96	7,92	7,92	2,07:1,30:1
6,2 x 4,0 x 3,0	74,40	110,80	7,96	7,99	2,07:1,33:1
6,2 x 4,1 x 3,0	76,26	112,64	8,02	8,06	2,07:1,37:1
6,2 x 4,2 x 2,9	75,52	112,40	8,03	8,03	2,14:1,45:1
6,2 x 4,2 x 3,0	78,12	114,48	8,07	8,12	2,07:1,40:1
6,2 x 4,3 x 2,9	77,31	114,22	8,08	8,09	2,14:1,48:1
6,2 x 4,3 x 3,0	79,98	116,32	8,12	8,19	2,07:1,43:1
6,3 x 4,1 x 3,0	77,49	114,06	8,09	8,10	2,10:1,37:1
6,3 x 4,2 x 3,0	79,38	115,92	8,14	8,17	2,10:1,40:1
6,3 x 4,3 x 3,0	81,27	117,78	8,20	8,23	2,10:1,43:1

### PŘÍLOHA P III: UKÁZKA ZAPOJENÍ MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU S VYUŽITÍM MODULŮ LAN-XI



## PŘÍLOHA P IV: UKÁZKA PROTOKOLU O ZKOUŠCE

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

Laboratoř  
techniky prostředí

### PROTOKOL O ZKOUŠCE Č. 0001-001-14

Předmět zkoušky:

		Výtisk číslo
REVIZE: 0	Měření akustického výkonu zařízení techniky prostředí	1.

Objednatel, adresa	
Číslo, objednávky	
Datum přijetí zakázky	
Datum provedení zkoušky	
Číslo zakázky	
Měření provedl	
Protokol vypracoval	
Účel	
Počet stran protokolu	
Vydává	
Správce dokumentu	
Výsledky zkoušky se vztahují pouze na uvedený předmět zkoušky a čas měření, na popsaném místě a za popsaných podmínek.	

Pracovník laboratoře techniky prostředí, odpovědný za provedení zakázky a zpracování	
Datum schválení	Jméno, podpis:

## **FAI UTB ve Zlíně**

Laboratoř techniky prostředí, akreditovaná zkušební laboratoř

Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín 5

Tel.: +420 000 000 000



Protokol o zkoušce č. 0001-001-14

Listů celkem: 3

List číslo: 1

### **1. Předmět zkoušky**

Předmět:

Objednatel:

Účel měření:

Datum měření:

### **2. Metoda měření**

Měření provedeno dle: ČSN EN ISO 12102 Klimatizátory vzduchu, jednotky pro chlazení kapalin, tepelná čerpadla a odvlhčovače s elektricky poháněnými kompresory pro ohřívání a chlazení prostoru: Měření hluku přenášeného vzduchem – Stanovení hladiny akustického výkonu

Požadavky viz.

Nejistota měření:

### **3. Použitá měřicí technika**

Přesný mikrofon s předzesilovačem Brüel &Kjaer typ 4942-A-021, v. č. 2414750, ov. List č. 8014-OL-10181-10, platný do 11.6.2015. Ochrana mikrofonu proti větru Brüel &Kjaer typ UA-0237. Akustický kalibrátor Brüel &Kjaer typ 4231 – 94 dB/1000 Hz, v. č. 1769468, kalibrační list č. 8013-KL-10174-14, vydaný ČMI dne 11.6.2014, platnost kalibrace je 2 roky, tedy do 11.6.2016. Referenční zdroj zvuku Brüel &Kjaer typ 4204, v. č. 856142, ověřený na ČMI Praha, kalibrační list č. 8014-KL-50167-14 vydaný dne 22.5.2014, platnost kalibrace stanovená laboratoří je 2 roky, tedy do 22.5.2016.

Datum vydání listu:



## **FAI UTB ve Zlíně**

Laboratoř techniky prostředí, akreditovaná zkušební laboratoř

Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín 5

Tel.: +420 000 000 000



Protokol o zkoušce č. 0001-001-14

Listů celkem: 3

List číslo: 2

### **4. Měřený zdroj hluku**

Specifikace zařízení:

Rozměry:

Pomocná zařízení:

Poloha měřeného zařízení:

Zkoušený režim zařízení:

### **5. Zkušební prostředí**

Specifikace prostředí:

Rozměry:

Měřené podmínky:	Teplota:	°C
	Relativní vlhkost:	%
	Statický tlak:	Pa

Datum vydání listu:

## FAI UTB ve Zlíně

Laboratoř techniky prostředí, akreditovaná zkušební laboratoř

Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín 5

Tel.: +420 000 000 000



Protokol o zkoušce č. 0001-001-14

Listů celkem: 3

List číslo: 3

### 6. Způsob měření

Měření bylo provedeno formou záznamu hladiny hlukové expozice  $L_{W(A)}$  [dB] na dynamické charakteristice Fast pro 6 poloh měřicího mikrofonu. Celková doba měření na každém bodě byla cca 1 min. Měření bylo provedeno pro více opakování. Celková hluková expozice je korigována na hluk pozadí. Měřené prostředí nebylo vystaveno razantním změnám teploty, vlhkosti či statického tlaku.

### 7. Výsledky měření

$f_{stř}$ [Hz]	200	250	315	400	500	630	800	1000
$L_W$ [dB]								
$f_{stř}$ [Hz]	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
$L_W$ [dB]								

Hladina akustického výkonu vážená funkcí A

$$L_{WA} = 10 \log \sum_{k=1}^n 10^{0,1(L_{Wk} + K_{A_i})}$$

$$L_{WA} = \quad \quad dB$$

Připomínky k výsledku

Datum vydání listu:

**PŘÍLOHA P V: VIZUÁLNÍ UKÁZKA UMÍSTĚNÍ ZKOUŠENÉHO  
ZAŘÍZENÍ A AUTOMATICKÉHO POSUVU MIKROFONU**

