



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# STANOVENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU PŘEVODOVÝCH ÚSTROJÍ

DETERMINATION OF SOUND POWER LEVEL OF TRANSMISSION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lenka Švanigová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka:	<b>Lenka Švanigová</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Kamil Řehák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Stanovení akustického výkonu převodových ústrojí**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Rešeršní práce zabývající se metodikou určení akustického výkonu v reálném provozu pomocí měření akustické intenzity. Práce bude rozšířena o zpracování dat z měření akustické intenzity na převodovém ústrojí.

### **Cíle bakalářské práce:**

Obecný úvod do akustiky.

Přehled dostupných možností určování hladin akustického výkonu pomocí intenzitní sondy.

Vyhodnocení technického experimentu – metodou měření v bodech.

### **Seznam doporučené literatury:**

NOVÝ, R. Hluk a chvění. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1995. 389 s. ISBN 80-01-01306-5.

MIŠUN, V. Vibrace a hluk. 1. vyd. Brno: FSI VUT v Brně a PC-DIR, s.r.o., 1998. 177s. ISBN 80-21-1262-3.

CROCKER, M., J. Handbook of noise and vibration control, John Wiley & Sons, 2007, 1569 p. ISBN 978-047-1395-997.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Oblast vibrací a s nimi spojeného hluku je velmi aktuálním tématem. Pro stanovení hluku je možné použít rozdílné vybavení a dosažené výsledky porovnat různými přístupy, které jsou ošetřeny pomocí norem. Tato bakalářská práce se zabývá normou ČSN EN ISO 9614, především její první částí, jež se zaměřuje na metodu měření v bodech. Za účelem aplikace této metody na měření převodových ústrojí byly detailně popsány základní pojmy a vzorce použité ke stanovení jednotlivých indikátorů. Celý postup byl aplikován na dvě průmyslové převodovky rozdílných parametrů a přenášeného výkonu. Kromě stanovení celkového akustického výkonu těchto zdrojů byly stanoveny také hladiny akustického výkonu pro jednotlivé měřené strany, a to s i bez vážení filtrem A, který se v případě převodových ústrojí používá nejčastěji. V neposlední řadě byly vytvořeny akustické mapy, které umožňují detekování oblastí, dominantně se podílejících na celkové hladině akustického výkonu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Hladina akustického výkonu, převodové ústrojí, hluk, intenzitní sonda, metoda měření v bodech

## ABSTRACT

The field of vibrations and associated noises is a very current topic. Noise can be measured with different equipment and the gained data might be compared using different methods, which are in accordance with defined norms. This bachelor thesis deals with the CSN EN ISO 9614 norm, especially its first part which focuses on the method of measuring in points. To apply this method to measure the transmission, basic terminology and formulas used to determine the individual indicators were described in detail. The whole procedure was applied to two industrial transmission units with different parameters and transmitted power. The total sound power on these sources was determined as well as the sound power levels for the individual measured sides, even without using the A-filter, which is the most commonly used filter in transmissions. Lastly, acoustic maps were created. These maps make it possible to discover locations which dominantly contribute to the total sound power level.

## KEYWORDS

Sound power level, transmission, noise, intensity probe, method of measuring in points

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠVANIGOVÁ, Lenka. *Stanovení akustického výkonu převodových ústrojí*. Brno, 2020. 42 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124506>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Kamil Řehák.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Kamila Řeháka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. června 2020

.....

Lenka Švanigová

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji své rodině za podporu, kterou mi vyjadřovali po celou dobu mého studia. Dále bych chtěla poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Kamilu Řehákovi, Ph.D. za jeho odborné rady a čas, který věnoval mým dotazům při tvorbě této práce.

# OBSAH

Úvod.....	9
<b>1 Základní pojmy v akustice .....</b>	<b>10</b>
1.1 Základní akustické veličiny.....	10
1.2 Hladiny akustických veličin .....	12
1.3 Fyzikální vlastnosti zvukových vln.....	12
1.3.1 Odraz a lom zvukové vlny .....	12
1.3.2 Absorpce zvukové vlny.....	13
1.3.3 Ohyb zvukové vlny .....	13
1.4 Frekvenční pásma.....	13
1.4.1 Oktávová frekvenční pásma.....	14
1.4.2 Třetinooktávová frekvenční spektra.....	14
<b>2 Objektivizované měřicí postupy .....</b>	<b>15</b>
2.1 Křivky stejné hlasitosti .....	15
2.2 Váhové filtry.....	15
2.3 Snímače akustických veličin .....	16
2.3.1 Druhy mikrofonů.....	16
2.3.2 Intenzitní sonda .....	17
<b>3 Akustické vlastnosti uzavřených prostor .....</b>	<b>18</b>
3.1 Typy akustických polí .....	18
3.2 Zvuková pole uzavřených prostor .....	18
<b>4 Metody určení akustického výkonu.....</b>	<b>19</b>
4.1 Metoda měření v bodech .....	19
4.2 Metoda měření skenováním .....	22
4.3 Přesná metoda pro měření skenováním.....	22
<b>5 Příčiny buzení akustického signálu v převodových ústrojích .....</b>	<b>25</b>
5.1 Rotorové buzení .....	26
5.2 Buzení ozubenými převody.....	26
5.3 Rezonance .....	27
<b>6 Analýza naměřených dat .....</b>	<b>28</b>
6.1 Měření převodového ústrojí X1 .....	28
6.2 Měření převodového ústrojí X2 .....	33
<b>Závěr .....</b>	<b>37</b>
<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>38</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>40</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>42</b>



## ÚVOD

Vzhledem ke stále stoupajícímu množství dopravních prostředků a pracovních strojů je člověk více než kdy jindy ovlivňován zvýšenou hlučností těchto zařízení. Pro korekci tohoto nežádoucího vlivu a větší komfort při jejich užívání musí motorová ale i jiná mechanická zařízení splňovat normami stanovená kritéria, aby nedocházelo k poškození zdraví člověka nebo škodě na životním prostředí.

Mezi významné zdroje hluku dopravních ale i průmyslových strojů patří převodové ústrojí. To je tvořeno řadou komponent, které buď samy hluk vytváří nebo se podílí na jeho přenosu. Typickým příkladem buzení akustického signálu jsou rázové změny sil při záběru ozubeného soukolí. Naopak k vedení zvukového signálu přispívají součásti uložené s vůlí nebo konstrukce samotné převodové skříně. Hlučnost převodovky se tedy stává neopomenutelným faktorem při posouzení hluku celého zařízení.

Aby bylo zajištěno splnění hlukových omezení, musí být provedena řada měření, na jejichž základě je hlučnost stroje objektivně stanovena. Proto je v rámci této práce proveden rozbor normy ČSN EN ISO 9614, která se zabývá stanovením akustického výkonu pomocí měření intenzitní sondou. V praktické části této práce jsou vyhodnocována data ze série měření provedených na dvou průmyslových převodovkách s vyšším výkonem. Pro analýzu dat technického experimentu je použita metoda měření v bodech. Lze ji aplikovat mimo speciální zvukové komory i v reálném provozu, a tudíž nejlépe odpovídá požadavkům kladeným na přesnost výsledků.

# 1 ZÁKLADNÍ POJMY V AKUSTICE

Zvuk lze definovat jako mechanické vlnění. Je realizován podélným nebo příčným kmitáním částic pružného prostředí. To, jestli je kmitání podélné nebo příčné, závisí na druhu prostředí. Plyny a kapaliny mohou kmitat pouze ve směru podélném, u pevných látek může být kmitání rozloženo navíc i do směru příčného. [1][2]

Lidské ucho není schopné zaznamenat veškeré akustické vlnění, ale pouze to s frekvencí od 20 do 20 000 Hz. [2] Toto rozmezí postihuje zvuky od velmi tichých na hodnotě prahu slyšení až po výrazné zvuky, hlasitostí blízko nebo na prahu bolesti. Slyšitelné pásmo se může u jednotlivých osob mírně lišit, proto se liší i frekvence zvuku, která je pro danou osobu už nepříjemná. Tako hranice není fyzikálně stanovena, ale zavádí se zde pojem hluk. Označuje se tak veškerý pro člověka obtěžující a nežádoucí zvuk. [1][2]

## 1.1 ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ VELIČINY

Oblasti s částicemi, které jsou od zdroje zvuku stejně vzdálené, se nazývají vlnoplochy. Šíří se směrem totožným se směrem postupu zvukového paprsku, který je na danou vlnoplochu kolmý. Vlastnosti vlnoplochy lze popsat za pomoci akustických veličin: [1][2][3]

- **Vlnová délka:** Každá částice kmitá kolem své rovnovážné polohy, a to vede ke zhušťování a zředování pružného prostředí a vzniku vlnoploch. Vzdálenost mezi dvěma sousedními vlnoplochami, je definována jako vlnová délka  $\lambda$ , a ta je popsána vzorcem (1), tedy závislostí mezi rychlostí zvuku  $c$  a frekvencí  $f$ . [2]

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

Částice prostředí vzdálené od sebe o tuto vzdálenost se nachází ve stejném akustickém stavu a jsou od sebe vzdáleny časovým posunem o jeden kmit  $T$ . Průběh vlnění se po této době u harmonického kmitání periodicky opakuje. [1][2]

- **Rychlost šíření akustických vln:** Tato veličina udává rychlost, kterou se zvuková vlna šíří prostředím. Bývá také nazývána jako rychlost zvuku. Je možné ji popsat jako šířící se tlakové pulzy. Rychlost zvuku je přímo úměrná změně objemové pružnosti kapaliny  $k$  a nepřímo úměrná hustotě prostředí  $\rho$ , což je patrné ze vzorce: [1][2]

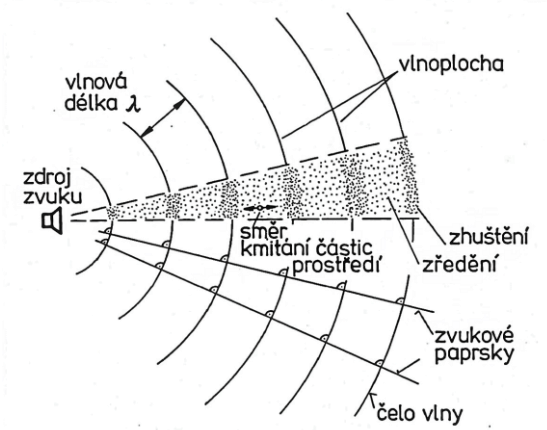
$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad (2)$$

Dosazením součinu Poissonovy konstanty a barometrického tlaku za modul objemové pružnosti kapaliny, lze vzorec upravit na tvar platný pro vlnění v plynech, tedy pro podélné vlnění. Při aplikaci pravidel adiabatické změny vzduchu je možno získat vzorec (3) platný přímo pro případ, kdy je uvažovaným plynem vzduch. [2]

$$c = 331,6 \cdot \sqrt{1 + \frac{\tau}{273,1}} \quad (3)$$

Z tohoto vztahu plyne, že jedinou proměnou určující rychlost šíření akustických vln v plynném prostředí je pouze teplota  $\tau$  daného prostředí. [2]

- **Akustický tlak:** Při kmitání částic prostředí dochází k lokálním změnám tlaku. Přetlak oproti statickému tlaku nastává v oblasti vlnoploch s maximální kumulací částic, podtlak naopak tam kde dochází ke zředění pružného prostředí (viz Obr.1). [2]



Obr. 1 – Lokální změny tlaku při šíření zvukové vlny [3]

Tato odchylka celkového tlaku oproti statické hodnotě, za kterou je brán tlak barometrický, je okamžitý akustický tlak. Celkový tlak v daném místě je tedy dán součtem statické hodnoty tlaku a okamžité hodnoty akustického tlaku: [2]

$$p_c = p_b + p_o \cdot \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (4)$$

- **Akustický výkon:** Akustický výkon je definován jako množství akustické energie, které projde jednotkovou plochou za jednotku času. Je dán vztahem: [1][2][3]

$$P = p \cdot v \cdot S \quad (5)$$

Na rozdíl od ostatních akustických veličin je stanovený akustický výkon nezávislý na teplotě, rychlostním gradientu prostředí nebo vzdálenosti od zdroje. Na srovnávání různých akustických zdrojů se proto hodí lépe než např. akustický tlak, který je závislý na vnějších vlivech. [2]

- **Akustická intenzita:** Akustická intenzita je vektorová veličina charakterizovaná tokem akustické energie jednotkovou plochou, která je kolmá k jeho směru. [3] Z hlediska praktického měření jsou používány okamžité hodnoty akustického tlaku a akustické rychlosti a předpokládá se nulový fázový posun těchto dvou veličin. Platí pak závislost: [2]

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)} \quad (6)$$

## 1.2 HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN

Při dekadickém zápisu akustických veličin v základních jednotkách je zřejmé, že nabývají širokého rozsahu hodnot, a to od záporných mocnin deseti až po kladné. Pro přehledný popis se zavádí jednotka decibel [dB], která vyjadřuje logaritmickou závislost mezi akustickou veličinou a její referenční hodnotou. Pro porovnání a přepočet jednotlivých veličin je nutné vhodně zvolit referenční hodnotu z příslušných norem. Užitím následujících vztahů lze při známých hodnotách akustických veličin dopočítat požadované hladiny. [1][2][3]

- **Hladina akustického tlaku:** Zkoumaná hodnota hladiny akustického tlaku v určitém bodě je nejčastěji vztažena k referenčnímu tlaku  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Značí se písmenem  $L$  s indexem  $p$ . Obecně je však dána vztahem: [2][3][12]

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (7)$$

- **Hladina akustického výkonu:** Zkoumaná hodnota hladiny akustického výkonu se nejčastěji vztahuje k referenční hodnotě akustického výkonu  $P_0 = 10^{-12}$  W. Značí se písmenem  $L$  s indexem  $W$  a obecně je dána vztahem: [2][3][12]

$$L_W = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (8)$$

- **Hladina akustické intenzity:** Zkoumaná hodnota hladiny akustické intenzity je nejčastěji vztažena k referenční hodnotě akustické intenzity  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>. Značí se písmenem  $L$  s indexem  $I$  a obecně je dána vztahem: [2][3][12]

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (9)$$

Pro výpočet výsledné hladiny  $L_C$  v daném místě od více zdrojů nebo od více hladin naměřených pro různá frekvenční pásma nelze použít pouze součet nebo snad průměr dílčích  $i$ -tých hladin. Je nutné použít následující vztah: [2]

$$L_C = 10 \log \sum_i 10^{0,1L_i} \quad (10)$$

## 1.3 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ZVUKOVÝCH VLN

Akustické vlnění je při svém šíření ovlivňováno řadou faktorů, vyplývajících z vlastností prostředí, kterým se šíří. V reálném prostředí se nachází množství překážek a různorodých povrchů, které způsobují částečný nebo úplný odraz, lom nebo absorpci vlny, a tudíž i akustické energie. [1][2]

### 1.3.1 ODRAZ A LOM ZVUKOVÉ VLNY

Chování zvukové vlny při průchodu dvěma rozdílnými prostředími popisuje následující rovnost: [1]

$$\frac{\sin(\theta_1)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_2)}{c_2} \quad (11)$$

Povrch, od kterého by se zvuková vlna beze zbytku odrazila, se nazývá akusticky tvrdý povrch. Při průchodu dvěma médii s odlišnými akustickými vlastnostmi, však dochází jak k odrazu, tak k průchodu energie. To, pod jakým úhlem bude průchozí paprsek nakloněn vůči normále plochy, záleží na hustotách obou prostředí a rychlosti a směru dopadové zvukové vlny. [1][2][3]

### 1.3.2 ABSORPCE ZVUKOVÉ VLNY

Absorpce zvuku je popisována pomocí součinitele pohltivosti  $\alpha$ , který je dán podílem dopadající a absorbované energie: [2]

$$\alpha = \frac{\text{energie dopadající}}{\text{energie absorbovaná}} = 1 - |R^2| \quad (12)$$

Součinitel pohltivosti se pohybuje v rozmezí (0, 1), kde maximálně pohltivému povrchu odpovídá  $\alpha = 1$  a maximálně odrazivému povrchu  $\alpha = 0$ . [2]

Absorpce zvuku je také závislá na frekvenci zvuku a teplotě prostředí. Pro vysoké frekvence je absorpce výrazně vyšší než pro nízké. Podobná závislost je platná také pro teplotu. Pro vlhkost vzduchu však platí úměra opačná, absorpce se s vyšší vlhkostí snižuje. [1][2][3]

### 1.3.3 OHYB ZVUKOVÉ VLNY

Při nárazu zvukové vlny na překážku dochází ke vzniku akustického stínu, tedy oblasti kde je zabráněno průchodu vlnění. Jeho velikost je nepřímo úměrná vlnové délce zvukové vlny a přímo úměrná druhé mocnině šířky překážky. [1][3] Lze tedy říct, že průchod vlny o velké vlnové délce přes malou překážku se obejde téměř bez vzniku akustického stínu. Pokud je však překážka větších rozměrů, nebo vlna kratší vlnové délky, dochází na okraji překážky k ohybu akustické vlny a k zeslabení intenzity zvuku za překážkou. [1]

Podobný jev, jako při ohybu kolem překážky, nastává také při průchodu vlny otvorem. Čím menší je otvor a čím větší je vlnová délka zdroje, tím méně se projeví akustický stín na druhé straně stěny. [1][2][3]

## 1.4 FREKVENČNÍ PÁSMA

Akustický signál je složen z velkého množství frekvenčních složek různých amplitud a fázových posunů. Pro popis rozložení amplitud v signále jsou používána frekvenční spektra. Pro analýzu hluku se používají konkrétně pásmová spojitá spektra. Pásmová spektra se dělí podle šíře pásma na spektra s konstantní šíří pásma a spektra s procentuálně konstantní šíří pásma. Aby byly do vyhodnocovací části přístroje propuštěny pouze frekvence určitého rozsahu, používá se akustických filtrů. [2][3]

Metoda používající filtry s konstantní šíří pásma se používá pro měření čistých tónů. V takovém případě je cílem měření zjistit jednotlivé složky zvuku. Šíře pásma propustnosti je nezávislá na střední frekvenci pásma. Pro měření celkové hlučnosti je vhodnější metoda analýzy s filtry s procentuálně konstantní šíří pásma. Šíře pásma propustnosti je procentuálně konstantní vzhledem ke střední frekvenci pásma. Čím vyšší je pak střední frekvence pásma, tím se absolutní hodnota šíře pásma zvětšuje. [1]

### 1.4.1 OKTÁVOVÁ FREKVENČNÍ PÁSMA

Významným typem spekter s procentuálně konstantní šíří pásma jsou oktavová frekvenční pásma, která jsou charakterizována poměrem krajních frekvencí. Jak lze vidět z uvedeného vztahu (13), tento poměr je omezen hodnotou dvě. [1][2]

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (13)$$

Střední hodnota pásma  $f_m$  je dána normou ČSN EN ISO 1683, proto bývá častějším úkolem zjistit krajní hodnotu pásma. Pro dolní frekvenci platí vztah: [1][2]

$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

Při známé hodnotě dolní frekvence  $f_1$  a referenční střední frekvence  $f_m$  dopočteme horní frekvenci  $f_2$  ze vztahu: [1][2]

$$f_2 = f_m \cdot \sqrt{2} \quad (15)$$

Z toho vyplývá, že pro vyšší frekvence jsou vypočtená oktavová pásma širší než pro frekvence nižší. [2]

### 1.4.2 TŘETINOOKTÁVOVÁ FREKVENČNÍ SPEKTRA

Třetinoctavová frekvenční spektra vychází z oktavových. Vzniknou rozdělením oktavového spektra na třetiny tak, aby se zachoval stejný převodový poměr mezi krajními frekvencemi každé z třetin. Platí tedy vztah: [1][2]

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} \quad (16)$$

Pro jednu třetinu oktávy platí závislost: [2]

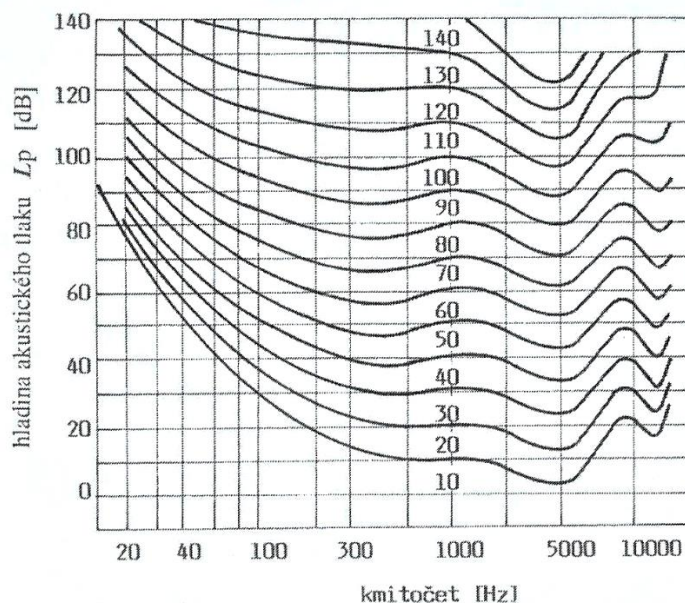
$$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^3 = 2 \quad (17)$$

Pro zobrazení závislosti hladiny akustického tlaku na frekvenci se v grafu nejčastěji používá pro frekvenci logaritmická stupnice. To zajistí zobrazení sloupce pásma v konstantní šířce. [1]

## 2 OBJEKTIVIZOVANÉ MĚŘICÍ POSTUPY

### 2.1 KŘIVKY STEJNÉ HLASITOSTI

Vnímání čistých tónů se u člověka mění se změnou frekvence tónu. Tato závislost je však silně nelineární. [3] Aby bylo dosaženo přehlednosti byly na základě experimentu sestaveny tzv. křivky stejné hlasitosti (Obr.2), které respektují Weber-Fechnerův zákon. Tedy zjištění, že se zvyšující se hlasitostí tónu se zvyšuje jeho intenzita geometrickou řadou. [2]



Obr. 2 - Křivky hladin stejné hlasitosti [1]

Měření byla porovnávána s referenční hodnotou 1000 Hz. Hladina hlasitosti je vyjádřena vztahem: [1]

$$L_N = konst \cdot \log \frac{I}{I_0} \quad (18)$$

### 2.2 VÁHOVÉ FILTRY

Při měření akustických veličin nejsou respektovány závislosti hladin na frekvencích takovým způsobem, jako je tomu u křivek stejné hlasitosti. Proto naměřená veličina neodpovídá lidskému vjemu. Aby bylo dosaženo požadované korekce, jsou hodnoty hladin upravovány tzv. váhovými filtry. Ty fungují na principu zeslabení nebo zesílení záznamu akustické veličiny v těch oblastech, na které je lidský sluch příliš citlivý. [3] Používají se následující filtry: [2][3]

- **Váhový filtr A** je nejčastěji používaným filtrem. Je vhodný pro korekci dle průběhu křivek stejné hlasitosti při nízkých hladinách akustické veličiny. Pomocí korekčních činitelů  $K_{Ai}$  pro jednotlivé frekvence a užitím hodnot hladin akustického výkonu  $L_W$

bez korekce získáme hladinu akustického výkonu váženou filtrem A dosazením do vzorce: [2]

$$L_{WA} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{Wi}+K_{Ai})} \quad (19)$$

- **Váhové filtry B, C** nejsou v praxi tolik používané jako filtr A. Využívá se jich k přizpůsobení naměřených dat křivkám stejné hlasitosti v oblasti středních a vysokých hladin akustických veličin. Hladiny korigované těmito filtry lze vypočítat obdobným způsobem jako v předchozím případě, pouze se zamění  $K_{Ai}$  za korekční činitel daného váhového filtru.
- Pokud nejsou data nijak korigována, mluvíme o **lineárním filtru**. Při takovémto měření je rozsahem obsáhnuto celé slyšitelné pásmo a při měření vibrací je použito pásmo ještě širší.

## 2.3 SNÍMAČE AKUSTICKÝCH VELIČIN

Jednou z nejdůležitějších částí měřicího řetězce pro měření hluku je mikrofon. Mikrofony slouží k přeměně akustického vlnění na elektrický signál a výrazně ovlivňují kvalitu zaznamenaného signálu. [3]

### 2.3.1 DRUHY MIKROFONŮ

Mikrofony pracují na principu přeměny akustického tlaku na změnu výchylky membrány mikrofonu. Elektrický signál je pak získán pomocí elektromechanického měniče, který snímá pohyb membrány. Dle základního rozdělení rozlišujeme tlakové a gradientní mikrofony. U tlakových mikrofonů je akustický tlak přiváděn pouze na jednu stranu membrány a její výchylka proto nezávisí na poloze zdroje vůči mikrofonu. Takovéto mikrofony jsou tedy všesměrové. Gradientní mikrofony mají membránu z obou stran ovlivňovanou akustickým tlakem, proto její výchylka nezávisí na velikosti, ale na rozdílu těchto dvou tlaků. [4][6]

Podle druhu elektromechanického měniče rozdělujeme mikrofony na reciproké a nereciproké. Nereciproké měniče využívají vhodných vlastností materiálů. Např. uhlíkový mikrofon využívá změny odporu vlivem tlaku dopadajícího vlnění. [4][6] Reciproké měniče mohou být použity oběma směry, jak jako přijímač, tak jako vysílač. Jejich princip je založen na fyzikálních pravidlech, především chování magnetů a cívek: [6]

- **Elektrodynamické mikrofony** přenáší výchylku membrány pomocí pohybu cívky v poli permanentního magnetu, čímž se indukuje napětí.
- **Elektrostatické mikrofony s polarizačním napětím** pracují na principu kondenzátoru s proměnnou kapacitou. Změny kapacity je docíleno změnou velikosti prostoru mezi pevnou elektrodou a vodivou membránou. Tento typ mikrofonů je pro své stálé charakteristiky a vysokou citlivost používán v měřicí technice.
- **Elektrostatické elektretové mikrofony** využívají stejného principu jako předchozí polarizační, pouze odpadá nutnost přívodu polarizačního napětí. To je zajištěno vrstvou dielektrického materiálu (elektretu) na jedné z elektrod.
- **Piezoelektrické mikrofony** využívají reakce některých, především krystalických látek, na tlakové nebo ohybové namáhání.



### 2.3.2 INTENZITNÍ SONDA

Intenzitní sonda (Obr. 3) se skládá ze dvou elektrostatických polarizačních mikrofonů, mezi nimiž je umístěno tuhé tělísko (spacer) viz Obr. 4. Celá konstrukce je často doplněna o předzesilovače. [2][4]



Obr. 3 - Intenzitní sonda od firmy Brüel & Kjaer

Pro měření bez zvláštního požadavku na rozsah měřených frekvencí se používají půlpalcové mikrofony. Pro měření vyšších frekvencí se shodnými fázovými charakteristikami se volí spíše mikrofony čtvrtpalcové. Fázový rozdíl mezi použitým mikrofonním párem určuje schopnost rozlišení nejmenšího fázového rozdílu dopadající zvukové vlny, od čehož se odvíjí i nejistota měření. Tato vzdálenost je ovlivňována velikostí spaceru. [2][4]



Obr. 4 – Mikrofonní pár a spacer do intenzitní sondy od firmy Brüel & Kjaer

Elektrostatické polarizační mikrofony patří do skupiny tlakových mikrofonů, jejich snímací charakteristika je proto všesměrová. Mezi další výhody patří i jejich malé rozměry, nízká hmotnost a stálá citlivost. [3][4][6]

## 3 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI UZAVŘENÝCH PROSTOR

### 3.1 TYPY AKUSTICKÝCH POLÍ

Tvar akustického pole zdroje je ovlivňován různými faktory úzce spjatými s rozměry prostoru a polohou zdroje v něm. Mezi hlavní faktory patří počet zdrojů, jejich umístění, tvar jejich vyzářovacích ploch, rozměry a pohltivost stěn. Z tohoto pohledu se akustická pole dělí na volná zvuková pole a difúzní pole. Ve volném zvukovém poli se směr šíření podélných vln shoduje se směrem rychlosti šíření. Pro difúzní zvukové pole platí předpoklad rovnoměrně rozloženého akustického tlaku. Toho je docíleno mnohonásobnými odrazy vlnění od stěn. Tok energie v každém bodě prostoru pak má stejnou intenzitu, ale fáze se liší. Při odrazu vlny od povrchu dochází krom samotného odrazu také k částečné absorpci vlnění. [1][2][15]

### 3.2 ZVUKOVÁ POLE UZAVŘENÝCH PROSTOR

Většina technických měření je realizována v uzavřených místnostech, a to i ta která simulují šíření akustických vln v otevřeném prostoru. K napodobení chování vlnění za takových podmínek se měření provádí ve speciálních normalizovaných zvukových komorách. Při měření parametrů neodražených přímých vln mluvíme o volném zvukovém poli. Pokud je do naměřených údajů zahrnuto také odražené vlnění jedná se o tzv. difúzní pole. [2]

- **Bezdozvuková (anechoická) komora** je místnost uzpůsobená k přesným měřením napodobujícím volné zvukové pole. Odrazům zvuku je zabráněno pohltivými materiály, které tvoří obložení stěn místnosti. Nejčastěji se jedná o minerální vlnu nebo skelnou vatu. Aby byla absorpční plocha komory co největší, je obkladový materiál tvarován do podoby podlouhlých jehlanů (Obr. 5). Vzájemná poloha jehlanů napomáhá utlumení zvukové vlny, a tedy simulaci jejího volného šíření. Bezdozvuková komora nejlépe plní svou funkci při měření zvuku o vysokých frekvencích. Měření v bezdozvukových komorách je vhodné zejména pro určení akustického výkonu zdroje a pro měření směrového diagramu zdroje. [2]
- **Dozvuková komora (difúzní)** se využívá k měření akustického výkonu a absorpčních vlastností různých druhů materiálů. Princip dozvukové komory spočívá ve zvyšování frekvence širokopásmového hluku, až na úroveň přechodové frekvence. Od této frekvence je odezva komory téměř konstantní a je možno ji popsat statistickými vztahy. Dozvuková komora je konstruována tak, aby byla minimalizována oblast stojatého vlnění, toho je docíleno zešikmením stěn komory. Pro co nejdelší dobu dozvuku jsou všechny stěny vysoce odrazivé. [2]



Obr. 5 – Typický tvar obkladu stěn bezdozvukové komory

## 4 METODY URČENÍ AKUSTICKÉHO VÝKONU

Vliv hluku na člověka není příznivý. V extrémních případech může dojít k trvalému porušení sluchového orgánu nebo úplné ztrátě sluchu. K ochraně lidského zdraví tedy byly vydány hygienické limity pro hluk a vibrace, které se v pracovních podmínkách vztahují především k hlučnosti strojů a zařízení. [2][3]

Nejvhodnějším parametrem k popsání hluku strojů a zařízení je akustický výkon, protože je oproti ostatním akustickým veličinám nejméně závislý na okolních vlivech. K určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku se využívá mezinárodní norma ČSN EN ISO 9614, která je rozdělena do tří částí podle použité metody a přesnosti získaných výsledků. Veškeré poznatky a vzorce použité v této kapitole jsou citovány ze zdrojů: [11][19][20]

### 4.1 METODA MĚŘENÍ V BODECH

Tato metoda umožňuje měření akustického výkonu v třídách přesnosti 1, 2 i 3. Měření je realizováno záznamem hladiny akustické intenzity a akustického tlaku. Výsledný akustický výkon je dán sumou všech dílčích akustických výkonů dle vzorce:

$$P = \sum_{i=1}^N P_i \quad (20)$$

Dílčí akustický výkon  $P_i$  je dán jako součin plochy dílčího segmentu  $S_i$  a odpovídající intenzity naměřené v daném bodě dílčího segmentu  $I_{ni}$ :

$$P_i = I_{ni} \cdot S_i \quad (21)$$

Měřicí prostředí není omezeno jen na dozvukovou nebo bezdozvukovou komoru, ale je možné uskutečnit měření také přímo v provozu nebo v testovací místnosti. To je výhodné zejména u prostorově objemných nebo hmotných strojů a zařízení.

Měřený zdroj je spojitě obklopen myšlenou plochou vhodného geometrického tvaru tzv. měřicí plochou, která je rovnoměrně rozdělena na dílčí segmenty. Intenzita je měřena intenzitní sondou bodově, pouze ve středu těchto podoblastí po dobu průměrování 8-12 s, a to kolmo k ploše podoblasti. Na stěnách, které jsou odrazivé, se měření neprovádí.

Pro volbu vhodného postupu měření a případné korekce je nutné vypočítat indikátory zvukového pole. Metoda měření v bodech využívá čtyři indikátory:

- **Indikátor variability zvukového pole v čase** slouží k ověření stacionarity zvukového pole v čase a vhodnosti volby měření v každém měřicím bodě. Je dán vztahem:

$$F_1 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (\bar{I}_{nk} - \bar{I}_n)^2} \quad (22)$$

Kde střední hodnota akustické intenzity  $\bar{I}_n$  je dána jako průměr všech dílčích hodnot  $\bar{I}_{nk}$ .

- **Indikátor akustický tlak-akustická intenzita na měřicí ploše** je důležitým porovnávacím prvkem pro ověření vhodnosti měřicího zařízení. K jeho výpočtu jsou nutné hodnoty střední hladiny akustického tlaku  $\bar{L}_p$  a střední hladiny akustické intenzity  $\bar{L}_{|I_n|}$  na měřicí ploše. Jeho výpočet je dán vzorcem:

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|} \quad (23)$$

Pro výpočet jednotlivých členů rozdílu jsou důležité rovnice:

$$\bar{L}_p = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}} \right) \quad (24)$$

$$\bar{L}_{|I_n|} = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\bar{I}_{ni}| / I_0 \right) \quad (25)$$

Důležité je zmínit, že pro výpočet  $\bar{L}_{|I_n|}$  jsou normálové složky akustické intenzity  $|\bar{I}_{ni}|$  uvažovány bez znaménka, proto je použita absolutní hodnota.

- **Indikátor záporného dílčího akustického výkonu** je dán obdobným vzorcem jako indikátor  $F_2$ , zde je však brán zřetel na orientaci normálové složky akustické intenzity, jak je zřejmé z následujících vzorců:

$$F_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n} \quad (26)$$

Kde střední hladina akustického tlaku  $\bar{L}_p$  je vypočítána dle rovnice (24) a střední hladina normálové složky akustické intenzity  $\bar{L}_{I_n}$  na měřicí ploše podle vztahu:

$$\bar{L}_{I_n} = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{I}_{ni} / I_0 \right) \quad (27)$$

- **Indikátor nerovnoměrnosti zvukového pole** souvisí s volbou měřicí plochy a počtem dílčích segmentů měřicí plochy. Je dán vztahem:

$$F_4 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{I}_{ni} - \bar{I}_n)^2} \quad (28)$$

Střední hodnota normálové složky akustické intenzity  $\bar{I}_n$  je získána z rovnice:

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{I}_{ni} \quad (29)$$

Před začátkem samotného měření je nutné ještě provést tzv. počáteční zkoušku, která ověří, zda je zvukové pole stacionární. K ověření tohoto požadavku je změřena normálová složka akustické intenzity v deseti měřeních na obvyklém místě měřicí plochy. Z těchto dat je vypočítán identifikátor  $F_I$ . Ke splnění počáteční zkoušky nesmí hodnota identifikátoru  $F_I$  přesáhnout 0,6. Pokud je variabilita signálu vyšší, je měřicí postup upraven tak, aby byl tento jev co nejvíce omezen, jak je doporučeno tabulkou Tab.1.

Posouzení vhodnosti použitých měřicích zařízení a určení počtu segmentů měřicí plochy je realizováno dvěma kritérii:

- **Kritérium 1** říká, že index dynamické schopnosti  $L_d$  musí být větší než indikátor  $F_2$ . Musí tedy platit nerovnost:

$$L_d > F_2 \quad (30)$$

Index dynamické schopnosti je vypočítán podle vzorce (31), jako rozdíl indexu zbytkové intenzity  $\delta_{pl_0}$  a korekce na zbytkovou intenzitu  $K$ , která je volena dle třídy přesnosti měření.

$$L_d = \delta_{pl_0} - K \quad (31)$$

Index zbytkové intenzity  $\delta_{pl_0}$  je vypočten odečtením hladiny akustické intenzity  $L_{I_n}$  od hladiny akustického tlaku  $L_p$  za předpokladu, že akustická intenzita je svou hodnotou blízká nule. Sonda je tedy při měření nastavená do takové polohy, aby byla co nejvíce rovnoběžná s pomyslnou měřicí plochou.

- **Kritérium 2** je splněno, pokud je počet měřicích míst větší než hodnota součinu druhé mocniny indikátoru  $F_4$  a součinitele  $C$  daného normou dle pásma a přesnosti měření, jak uvádí závislost:

$$N > CF_4^2 \quad (32)$$

Nesplnění těchto kritérií je korigováno například změnou doby měření v měřicích bodech nebo vzdáleností měřicí plochy. Měřicí postup je ještě doplněn o výpočet rozdílu  $(F_3 - F_2)$ , jehož velikost také ovlivňuje úpravy měřicí plochy. Pokud je rozdíl těchto indikátorů příliš velký, detekuje to přítomnost silně vyzařujícího zdroje vně měřicí plochy. Podrobný popis korekcí je uveden v následující tabulce Tab. 1:

Tab. 1 - Úpravy postupu měření akustického výkonu k dodržení zvolené třídy přesnosti [11]

Kritérium postupu	Označení (viz obrázek B.1)	Postup
$F_1 > 0,6$	e	Užije se postup k omezení kolísání akustické intenzity vnějších zdrojů, nebo se měří v průběhu periody s menší variabilitou, nebo se prodlouží doba měření v každém měřicím místě (je-li to vhodné).
$F_2 > L_d$ nebo $(F_3 - F_2) > 3$ dB	a nebo b	V přítomnosti významných vnějších zdrojů nebo dlouhé doby dozvuku se zmenší průměrná vzdálenost měřicí plochy od zdroje, ne však blíže než 0,25 m. V nepřítomnosti významných vnějších zdrojů nebo dlouhé doby dozvuku se zvětší průměrná vzdálenost měřicí plochy na 1 m. Zastíní se měřicí plocha od vnějších zdrojů nebo se omezi přímé odrazy zvuku.
Kritérium 2 není splněno a $1$ dB $\leq (F_3 - F_2) \leq 3$ dB	c	Zvýší se rovnoměrně hustota měřicích bodů tak, aby bylo vyhověno kritériu 2.
Kritérium 2 není splněno a $(F_3 - F_2) \leq 1$ dB a postup podle 8.3.2 selhal nebo nebyl vybrán	d	Zvětší se průměrná vzdálenost měřicí plochy od zdroje a využije se stejný počet měřicích bodů, nebo se zvýší počet měřicích bodů na měřicí ploše.

## 4.2 METODA MĚŘENÍ SKENOVÁNÍM

Metoda skenování se od metody měření v bodech liší hlavně provedením měření. Pohyb intenzitní sondy je zde plynulý a intenzita je tedy měřena kontinuálně, a ne pouze bodově. Pohyb intenzitní sondy je realizován ručně nebo pomocí pohyblivého mechanismu. Při použití mechanismu je nutné minimalizovat jím vydávaný hluk na hodnotu hladiny akustické intenzity nejméně o 20 dB menší, než je u měřeného zdroje.

Pro tvar měřicí plochy jsou přednostně vybírány jednoduché neoblé geometrické útvary, aby bylo usnadněno kolmé nasměrování intenzitní sondy při jejím pohybu. Měřicí plocha je rozdělena na dílčí plochy, které svým umístěním většinou odpovídají jednotlivým částem zdroje. Toto pravidlo usnadňuje identifikaci částí zdroje s maximálním vyzařováním akustického výkonu. Každou z dílčích ploch vede dráha pohybu intenzitní sondy normou daným způsobem (viz Obr.6), a tak je během měření pokryt celý její povrch.



Obr. 6 - Dráha skenování na dílčí ploše [19]

Vhodný postup a korekce měření je realizována pomocí indikátoru akustický tlak-akustická intenzita na měřicí ploše, který je značen  $F_{pl}$  a indikátoru záporného dílčího akustického výkonu se značkou  $F_{+/-}$ . Vhodnost měřicího zařízení je opět kontrolována kritériem 1, které je totožné jako u předchozí metody. Kritérium 2 je zde dáno porovnáním hodnoty indikátoru záporného dílčího akustického výkonu s hodnotou 3 dB.

Splněním obou kritérií je zajištěno, že získané výsledky měření odpovídají požadované třídě přesnosti. Při použití této metody lze dosáhnout tříd přesnosti 2 a 3. Dále musí být dodrženo, že použité měřicí přístroje budou vždy o třídu přesnější, než je přesnost výsledku měření.

## 4.3 PŘESNÁ METODA PRO MĚŘENÍ SKENOVÁNÍM

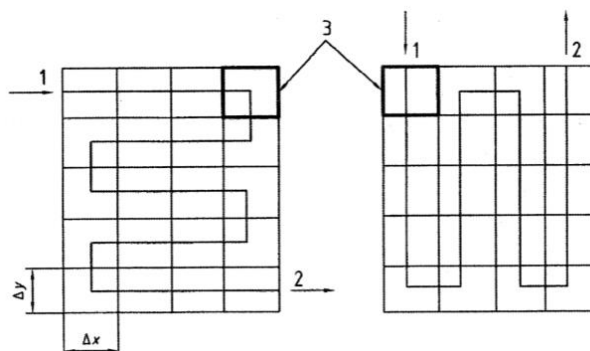
Tato část normy doplňuje a zpřesňuje průběh skenování. Výsledek měření je pak ve třídě přesnosti 1. Od nižších tříd přesnosti se liší především přísnějšími kritérii pro zvukové pole, potřebnými indikátory a nutností provádět měření ve speciálně navržených prostorách, např. v bezdozvukových komorách.

Dalším podstatným rozdílem je vzorkování měřicí plochy. Ta je rozdělena na dílčí plochy, které jsou dále děleny na segmenty, jejichž středem vede dráha intenzitní sondy. Měřicí plocha má při ručním skenování nejčastěji podobu neoblého útvaru s pravouhloú geometrií, díky čemuž mají dílčí plochy tvar čtverců nebo obdélníků. Vzdálenost této myšlené plochy od reálného povrchu zdroje se pohybuje od 0,25 metru a více.

Aby byl při měření obsáhnut celý povrch dílčí plochy, musí pro jednotlivé segmenty plochy platit, že poměr jejich šířky a délky musí být menší nebo roven než 1,2 a větší nebo roven



než 0,83. Pro jejich obsah rovněž platí, že poměr největšího k nejmenšímu segmentu může být maximálně 1,5. Dráha sondy vede středy těchto segmentů jako rovná linka, pouze v rozích dochází k mírnému zaoblení. Při opakování měření jsou na sebe dráhy intenzitní sondy kolmé, jak je znázorněno na Obr. 7. Při ručním skenování je maximální rychlost pohybu sondy 0,5 m/s, při použití pohyblivého mechanismu je rychlost libovolná.



Obr. 7 - Navzájem kolmé dráhy skenování na dílčí ploše [20]

Indikátory zvukového pole použité při přesné metodě měření skenováním se funkčně shodují s indikátory použitými při měření v bodech. Jsou to následující:

- **Indikátor variability pole v čase** je důležitý jako porovnávací hodnota pro stanovení doby skenování na dílčí ploše. Vypočte se pomocí vzorce:

$$F_T = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (\bar{I}_{nm} - \bar{I}_n)^2} \quad (33)$$

Hodnota  $\bar{I}_n$  je vypočítána jako průměr z  $\bar{I}_{nm}$ , kde  $m = 1, 2, 3$  až  $M$ .

- **Indikátor tlak-intenzita bez znaménka** se získá jako rozdíl průměrné hladiny akustického tlaku  $\bar{L}_p$  a průměrné hladiny absolutní hodnoty normálové složky akustické intenzity  $\bar{L}_{|I_n|}$ :

$$F_{p|I_n|} = \bar{L}_p - \bar{L}_{|I_n|} \quad (34)$$

Pro dílčí výpočty jsou důležité rovnice:

$$\bar{L}_p = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \overline{p_j^2} / p_0^2 \right) \quad (35)$$

$$\bar{L}_{|I_n|} = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\bar{I}_n| / I_0 \right) \quad (36)$$

- **Indikátor tlak-intenzita se znaménkem** je dán vzorcem:

$$F_{pI_n} = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n} \quad (37)$$

Pro dílčí výpočty je důležitá hodnota průměrné hladiny akustického tlaku  $\bar{L}_p$  podle rovnice (35) a hodnota průměrné hladiny normálové složky akustické intenzity  $\bar{L}_{I_n}$ , která se získá vzorcem:

$$\bar{L}_{I_n} = 10 \log \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{I}_{n_j} / I_0 \right| \quad (38)$$

- **Indikátor nerovnoměrnosti pole** souvisí ve vzdálenosti dílčí plochy od zdroje a s hustotou skenování. Je vypočten pomocí vzorce:

$$F_S = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (\bar{I}_{n_j} - \bar{I}_n)^2} \quad (39)$$

Hodnota  $\bar{I}_n$  je získána rovnicí:

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{I}_{n_j} \quad (40)$$

V začátku samotného měření je nutné zvolit vhodnou dobu skenování  $T_S$ , ta musí být větší nebo rovna součinu počtu dílčích ploch  $N_S$  a doby průměrování  $T_{F_T < 0,6}$ :

$$T_S \geq N_S \cdot T_{F_T < 0,6} \quad (41)$$

Aby byl výsledek měření v požadované třídě přesnosti je nutné dodržet korekce dané touto částí normy. Ty jsou realizovány pomocí stanovených kritérií:

- **Kritérium 1** kontroluje opakovatelnost skenování na dílčí ploše porovnáním rozdílu dvou hladin normálových složek intenzity, získaných ze dvou skenování, s dovolenou nejistotou měření  $s$ :

$$|\bar{L}_{I_n(1)} - \bar{L}_{I_n(2)}| \leq \frac{s}{2} \quad (42)$$

- **Kritérium 2** slouží k ověření vhodnosti měřicího zařízení pro všechna měřitelná frekvenční pásma. Musí tedy platit:

$$L_d \geq F_{pI_n} \quad (43)$$

- **Kritérium 3** určuje dovolenou míru ovlivnění měření přítomností vnějšího zdroje hluku pomocí nerovnosti:

$$F_{pI_n} - F_{p|I_n|} \leq 3 \quad (44)$$

- **Kritérium 4** kontroluje nerovnoměrnost pole a volbu vzdálenosti dílčí plochy od zdroje. Musí platit:

$$F_S \leq 2 \quad (45)$$

- **Kritérium 5** stanovuje podmínku týkající se vhodné hustoty skenování, pomocí vztahu:

$$0,83 \leq F_{S(1)} / F_{S(2)} \leq 1,2 \quad (46)$$



## 5 PŘÍČINY BUZENÍ AKUSTICKÉHO SIGNÁLU V PŘEVODOVÝCH ÚSTROJÍCH

Převodové ústrojí je možné popsat jako soustavu ozubených kol a hřídelí, která mají za úkol převést vstupní výkon a točivý moment na výstupní výkon s požadovanými parametry. Tedy například zrychlit nebo zpomalit výstupní hnanou část soustavy, nebo změnit směr jejího chodu. Kvůli přenosu velkých výkonů je nutné, aby bylo převodové ústrojí dimenzováno na vysokou životnost, a zvláště ozubená kola na vysokou odolnost na otlačení. [5][8]

Dle konstrukce mechanismu a tvaru ozubení se převodová soukolí dělí na: [16][17]

- **Čelní ozubená soukolí s přímými zuby** jsou používána především v konstrukcích s rovnoběžnými hřídelemi k přenosu točivého momentu z jedné na druhou.
- **Čelní ozubená soukolí s šikmými zuby** jsou používána také k přenosu mechanické energie mezi rovnoběžnými hřídelemi. Šroubovicový tvar boční křivky zubu však zajišťuje plynulejší dotyk a rozpojení kontaktních ploch spoluzabírajících kol, proto je chod tohoto soukolí méně hlučný. Hřídele a ložiska jsou zde ale více namáhána, což je zapříčiněno působením axiálních sil.
- **Kuželová ozubená soukolí** jsou charakteristická různoběžností os jednotlivých kol. Typické je také ozubení na kuželové ploše kola, které může mít buď přímé, šikmé nebo zakřivené zuby.
- Spojuzabírající dvojice **šnekového soukolí** se nazývá šnek a šnekové kolo. Ozubení šneku je vytvořeno do šroubovice podobné závitů šroubu a osa šneku je kolmá na osu šnekového kola.

Přenos momentu je v převodovce realizován různými způsoby. Ovlivňuje ho druh použitého převodu. Z tohoto hlediska jsou rozlišovány převodovky s ozubenými koly, s planetovým převodem, třecí a elektrické nebo kapalinové. [8][18]

Změna rychlostního stupně může být při řazení prováděna přímo řidičem, pak je řeč o převodovkách s přímým řazením (manuální). Pokud je během řazení uvedeno v činnost další pomocné zařízení, které provede samotné přeřazení, jedná se o tzv. nepřímé řazení (poloautomatické). Posledním typem jsou převodovky samočinné (automatické). Ty jsou z velké části ovládány řídicí jednotkou, která zajistí přeřazení rychlostního stupně bez jakéhokoli impulsu od řidiče, pouze na základě aktuálních jízdních podmínek. [8][14]

Velmi často používané manuální převodovky lze rozdělit z hlediska počtu hřídelí, na které je přenášen výkon na: [5]

- **Jednostupňové převodovky** disponují poměrně vysokou účinností. V záběru je vždy pouze jedno soukolí a tím se docílí zmenšení ztrát při tření. Zabírající soukolí je určeno spojením nebo rozpojením zubové spojky. Nevýhodou tohoto typu převodovky je nesouosost vstupního a výstupního hřídele, to může vést k většímu namáhání soukolí a nežádoucí hlučnosti způsobené právě nesouosostí. Hřídele mají také vůči sobě opačný smysl otáčení.
- **Dvoustupňové převodovky** převádí výkon postupně přes tři hřídele. Osa vstupní hřídele bývá často rovnoběžná s osou výstupní hřídele. Mezi nimi je v záběru předloková hřídel. Ta přenáší výkon pomocí zubových spojek na výstupní hřídel. Oproti jednostupňové však dosahuje dvoustupňová převodovka nižší účinnosti, což je

způsobeno záběrem více soukolí kvůli vložené předlohovému hřídeli. Záběr většího množství ozubených kol může vést i ke zvýšení hladiny hluku při jejich provozu.

Většina převodových ústrojí je korigovaná. Korekcí je dosaženo speciálních parametrů a požadovaných vlastností. Nevýhodou je ale nižší únosnost takového soukolí. Naopak soukolí nekorigovaná jsou mnohem odolnější a vydrží zatížení většími momenty. [5][8][13]

Mezi zdroje hluku v převodovkách lze zařadit v podstatě veškeré jejich pohyblivé části. Řada komponentů hluk pouze přenáší a zesiluje (např. synchronizační kroužky, řadící vidlice, řadící táhla), některé se ale stávají přímo zdrojem buzení. Jedná se zejména o ozubená soukolí a ložiska. [1][5][13]

Hlavními důvody akustického buzení je buzení ozubenými převody a rotorové buzení. Souhrnně se jedná především o mechanická buzení. [5]

## 5.1 ROTOROVÉ BUZENÍ

Mezi nejčastější příčiny tohoto typu buzení patří nevyváha a nesouosost. Důležitými faktory ovlivňujícími hluk rotoru jsou i ohnutí hřídele, mechanické a ložiskové uvolnění atd.: [5][10]

- K **nevyváze** dochází v případě, když se osa rotace rotoru neshoduje s hlavní osou setrvačnosti procházející těžištěm.
- O **nesouososti** mluvíme, když jsou osy hřídelí tzv. neustavené. Tento stav nastává, pokud nejsou jejich středy rotace souosé. Nesouosost může být rovnoběžná nebo úhlová. V takovém případě dochází k naklonění jedné z hřídelí.
- Pokud dojde k **ohnutí hřídele**, projeví se to na spektru další jednou až dvěma amplitudami o dvoj- až trojnásobku základní rotorové frekvence. Takováto hřídel se tedy chová jako by byla nesouosá a nevyvážená.
- Při **uvolnění součásti od základu** dochází k častému vzniku několika desítek harmonických frekvencí o vysokých amplitudách.

## 5.2 BUZENÍ OZUBENÝMI PŘEVODY

V ozubených převodech působí velké dynamické síly. Za provozu soukolí se toto působení projevuje jako hlučnost stroje. Hlavní druhy buzení hluku je možno rozdělit na: [1][5][13]

- **Kinematické buzení** je zapříčiněno nepřesnostmi v uložení, často už při montáži soukolí. Dále pak nedodržením výrobních parametrů, což má za následek nevyváhu součásti a její excentricitu.
- **Rázové buzení** je spojeno s periodickými změnami styku ploch zubů spoluzabírajících kol. To se děje při vstupu a odlehnutí aktivních ploch zubů. Toto působení může být minimalizováno vhodným zatížením. Dostatečně velkým, aby udržovalo trvalý dotyk boků právě zabírajících zubů, ale ne tak velkým, aby způsobilo jejich deformaci.
- **Parametrické buzení** je nejvýraznější u čelních a kuželových soukolí. V těchto případech dochází při záběru kol ke změně ohybové tuhosti zubů podle počtu párů

zubů, které jsou právě v záběru. Také dochází k periodickým změnám směru působící třecí síly mezi boky zubů.

- **Modulace signálu** se v naměřeném spektru projevuje vznikem postranních pásem kolem základních a harmonických složek zubového buzení. Modulace nastává často při provozu soukolí s poškozenými zuby nebo při proměnných otáčkách. Snížením buzení modulace se docílí klidnějšího chodu stroje, a tedy i menšího kolísání otáček.

Stav ozubených kol a jejich opotřebení má při měření hluku velký vliv na výstupní signál. Na tvaru spektra se projeví tření, přetížení zubů, boční vůle, ale i nesouosost ozubených kol. Jednotlivé stavy s sebou nesou charakteristické změny spektra, především zesílení harmonických frekvencí a zvýraznění postranních pásem. [5]

### 5.3 REZONANCE

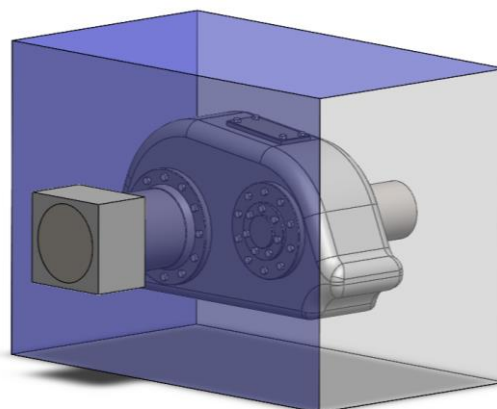
K rezonanci dochází, pokud se vlastní frekvence stroje rovná frekvenci vnějšího buzení. Vlastní frekvenci lze ovlivnit hmotností, tlumením a tuhostí soustavy. Riziko rezonance se zvyšuje u soustav s vnitřní vůlí nebo volnými součástmi. Rezonance bývá doprovázena vznikem intenzivního akustického signálu a vibrací. Dochází k zesílení amplitudy kmitů, což vede k silnému dynamickému namáhání soustavy. Je nutné vhodné tlumení, jinak by došlo k růstu amplitudy nade všechny meze. A to by mělo za následek destrukci stroje. [5]

## 6 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

Zpracovávaná data byla získána ze série měření prováděných na dvou rozdílných jednostupňových průmyslových převodových ústrojích s vyšším výkonem. Pro ilustraci budou v této práci označovány jako převodové ústrojí X1 a převodové ústrojí X2. U každé z převodovek bylo rozvržení měřicích ploch jiné a jiné byly i provozní otáčky. Cílem měření bylo zjistit akustický výkon daných převodovek, určení oblasti převodovky s nejvyšším akustickým výkonem a sestavení akustické mapy pro každou převodovku. Získaná data byla měřena a zpracovávána na základě první části normy ČSN EN ISO 9614, tedy metodou měření v bodech. Úprava dat probíhala v programu Microsoft Excel.

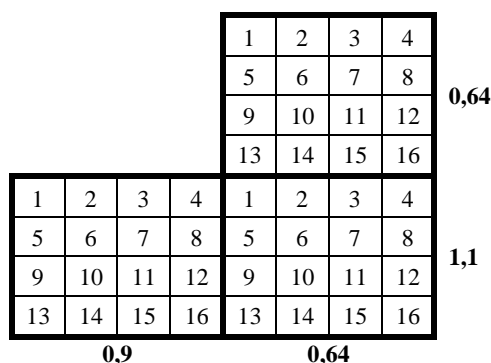
### 6.1 MĚŘENÍ PŘEVODOVÉHO ÚSTROJÍ X1

Data z měření převodovky X1 byla získána měřením v testovací místnosti při jejím maximálním kroutícím momentu a při 24 % jejích maximálních otáček. Jako měřicí plocha byl zvolen pomyslný kvádr, jehož rozměry (v pořadí šířka x výška x hloubka) byly stanoveny 0,9 x 1,1 x 0,64 m, tak aby byla splněna minimální vzdálenost 0,25 m mezi měřicí plochou a povrchem měřeného objektu. Převodovka X1 byla zakotvena v požadované poloze z jedné stany ložiskovým domkem a z druhé napojením hřídelí na referenční převodovku a pohonnou jednotku, díky které bylo zajištěno spuštění a udržování požadovaných otáček.



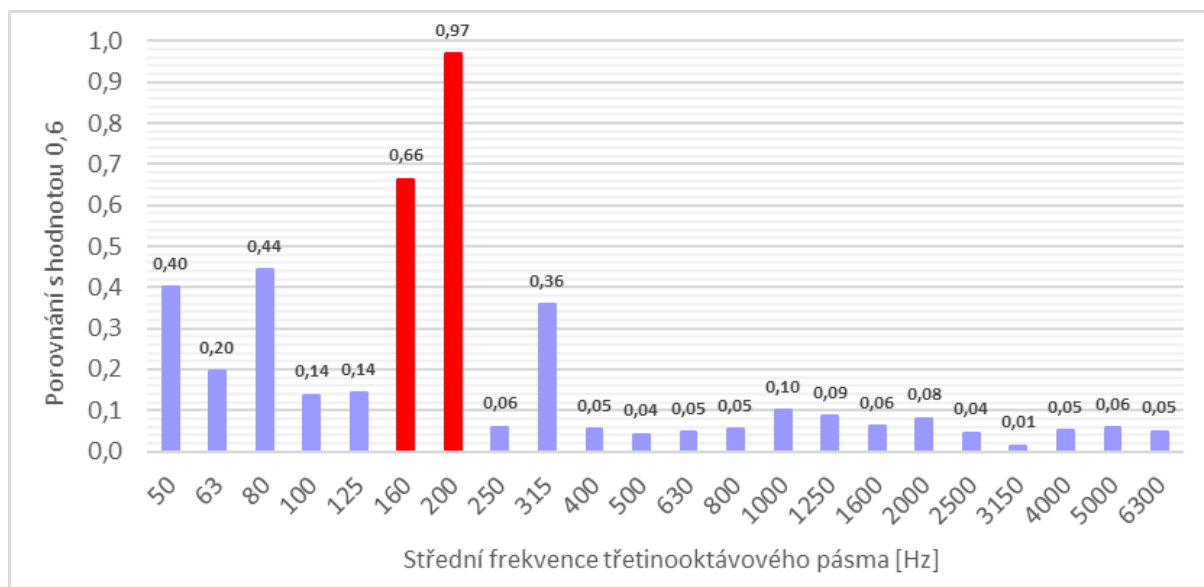
Obr. 8 – Zobrazení měřených a odrazivých stran měřicí plochy

Při měření intenzitní sondou byly snímány tři stěny zvoleného pomyslného kvádrů a to horní, zadní a levá. Ostatní stěny byly odrazivé, proto se na nich měření neprovádělo (Obr. 8). Každá z měřených stěn byla dále rovnoměrně rozdělena na 16 dílčích ploch dle Obr. 9.



Obr. 9 - Rozložení dílčích ploch na měřicí ploše

Pro počáteční zkoušku a výpočet indikátoru  $F_1$  byla vybrána jako obvyklé místo měřicí plochy horní stěna pomyslného kvádrů (měřicí plochy). Uprostřed této stěny bylo provedeno deset měření, při kterých byly bodově změřeny hladiny normálové složky akustické intenzity pro frekvenční pásma se střední frekvencí 50-6300 Hz. Normálové složky akustické intenzity byly získány převodem z naměřených hladin pomocí vzorce (9) a dále pak použitím vzorce (22) byly získány hodnoty indikátoru  $F_1$ , které byly následně porovnány s hodnotou 0,6, jak je znázorněno na Obr. 10. Doba průměrování byla zvolena 8 s, což odpovídá minimu danému normou.



Obr. 10 - Výsledné hodnoty indikátoru  $F_1$

Z Obr. 10 je zřejmé, že pro pásma se střední frekvencí 160 a 200 Hz byla hodnota 0,6 překročena, a tudíž pro ně nemůže být signál považován za stacionární. Jelikož se v případě této práce jedná o zpracování už naměřených dat, nelze ovlivnit podmínky za jakých byla data získána. V opačném případě by byl postup měření upraven dle doporučení tabulky Tab.1.

Výpočet indikátorů  $F_2$ ,  $F_3$  a  $F_4$  proběhl na základě dat o naměřených hladinách normálových složek akustické intenzity a akustického tlaku pro každou z měřených stran měřicí plochy ve stejných frekvenčních pásmech jako počáteční zkouška. Protože analyzovaný soubor dat neobsahoval údaje naměřené v případě, kdy je sonda orientována rovnoběžně s měřicí plochou, nebylo možné vypočítat index dynamické schopnosti, a tudíž ani ověřit platnost kritéria 1. Z literatury je však zřejmé že pásma, která by nespĺnila kritérium 1 by nevyhověla ani kritériu 2, a proto by byla z výpočtů stejně vyloučena. Dalším krokem výpočtu bylo porovnání rozdílu indikátorů ( $F_3 - F_2$ ) s hodnotou 3 dB.

V případě indikátoru  $F_2$  byla nejdříve počítána střední hladina akustického tlaku  $\overline{L_p}$  dle vzorce (24), dále pak střední hladina akustické intenzity  $\overline{L_{In}}$  dle vzorce (25). Rozdílem těchto čísel, jak je uvedeno v rovnici (23), je hodnota indikátoru  $F_2$ .

Pro výpočet indikátoru  $F_3$  bylo potřeba spočítat ještě střední hladinu akustické intenzity  $\overline{L_{In}}$  dle vzorce (27), která se od předchozí liší tím, že v použitém vztahu je brán zřetel

na znaménko normálové složky akustické intenzity. Indikátor  $F_3$  je poté získán rozdílem dle vztahu (26).

Následující tabulka Tab. 2 znázorňuje vypočtený rozdíl ( $F_3 - F_2$ ) pro jednotlivé strany měřicí plochy. V případech, kdy je hodnota vyšší než 3 dB (v tabulce označeno červeně), indikuje to přítomnost dalšího vyzařující akustického zdroje vně měřicí plochy. V tomto případě se ale nejedná o vnější zdroj hluku, ale o odražený signál měřeného převodového ústrojí, protože v testovací místnosti nelze zamezit odrazům tak, jako v bezdozvukových komorách.

Tab. 2 - Výsledky podmínky ( $F_3 - F_2$ )  $\leq 3$  dB

Frekvenční pásmo [Hz]	Horní strana	Zadní strana	Levá strana
50	0,00	<b>3,15</b>	0,00
63	0,03	0,37	0,00
80	0,26	<b>4,39</b>	0,24
100	0,00	0,00	0,00
125	0,00	0,11	0,00
160	<b>4,38</b>	<b>4,72</b>	0,00
200	0,55	0,31	2,33
250	0,02	2,33	0,47
315	0,00	1,77	0,69
400	0,00	0,70	0,39
500	0,04	0,56	0,10
630	0,00	0,08	0,00
800	0,00	<b>3,77</b>	0,04
1000	0,00	<b>3,90</b>	0,00
1250	0,00	0,47	0,00
1600	0,00	1,67	0,00
2000	0,00	0,52	0,00
2500	0,06	0,00	0,00
3150	0,00	1,91	0,00
4000	0,00	<b>8,06</b>	0,00
5000	0,00	2,72	0,00
6300	0,00	<b>5,65</b>	0,00

Indikátor nerovnoměrnosti zvukového pole  $F_4$  se z naměřených dat vypočítal následujícím postupem. Nejdříve se převedly naměřené hladiny normálové složky akustické intenzity vztahem (9), poté byla z těchto dílčích složek vypočítána střední hodnota normálové složky akustické intenzity  $\bar{I}_n$  dle vztahu (29), a tato hodnota pak byla následně dosazena do finálního vztahu (28) pro výpočet indikátoru  $F_4$ .

Indikátor  $F_4$  je důležitý pro kontrolu kritéria 2, tedy ověření vhodnosti počtu měřicích míst. Kritériu 2 je vyhověno splněním podmínky (32), v tomto případě je počet měřicích míst  $N=16$  a hodnota činitele  $C=8$ .

Tab. 3 - Hodnoty pro posouzení kritéria 2

Frekvenční pásmo [Hz]	Horní strana	Zadní strana	Levá strana
50	2,34	2,67	2,13
63	2,88	1,44	3,31
80	8,96	7,38	4,80
100	0,48	1,20	2,33
125	1,74	15,96	5,77
160	3,79	14,29	3,28
200	13,37	20,08	3,65
250	13,40	13,25	4,45
315	4,24	5,20	4,31
400	1,35	3,12	3,58
500	9,96	8,43	8,13
630	6,31	5,77	3,84
800	7,13	5,67	6,12
1000	4,12	9,39	1,46
1250	2,61	8,47	1,28
1600	1,37	4,84	1,79
2000	1,52	7,38	2,29
2500	3,33	15,03	2,74
3150	1,04	4,92	1,02
4000	0,96	9,02	2,50
5000	0,41	6,94	3,38
6300	1,11	10,26	1,63

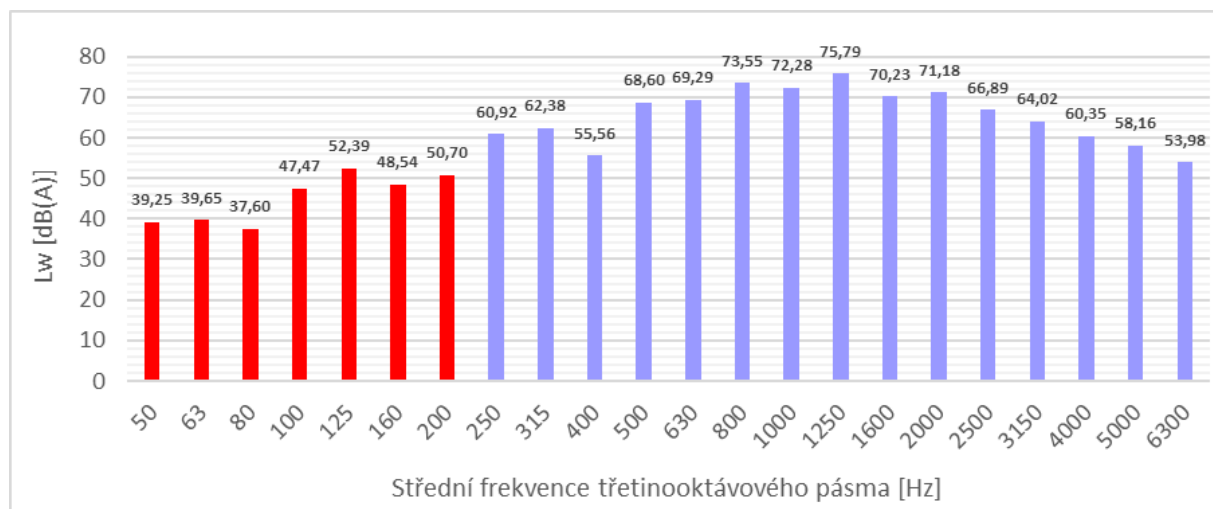
Kritérium 2 nebylo splněno pro zadní stěnu pro pásmo se střední frekvencí 200 Hz, jak je zvýrazněno v Tab. 3. Hladina akustického výkonu vážená filtrem A je zde 63,25 dB(A), nejvyšší hodnota pro zadní stranu je 75,45 dB(A), což je o více jak 10 dB větší. Toto pásmo lze tedy prohlásit za nevýznamné, a proto není zahrnuto do výpočtů celkové hladiny akustického výkonu. Celkové hodnoty hladin akustického výkonu pro každou z měřených stran a pro celý zdroj jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 4.

Tab. 4 – Celkové hodnoty hladin akustického výkonu

	Hladina akustického výkonu [dB]	Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB(A)]
<b>Horní strana</b>	82,18	80,98
<b>Zadní strana</b>	82,82	80,17
<b>Levá strana</b>	82,49	81,14
<b>Celkem</b>	87,28	85,55

Dále byly vypočteny hodnoty hladin akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá třetinooktávová pásma dle vzorce (19). Tyto hodnoty byly zaneseny do grafu Obr. 11. Pásma, ve kterých byl součet dílčích akustických výkonů dle vzorce (20) záporný, jsou označena červeně. Hodnoty hladin akustického výkonu v těchto případech neodpovídají vyznařované

akustické energii, protože dílčími plochami se záporným znaménkem neprochází energie směrem ven od zdroje ale směrem k němu.



Obr. 11 - Hladiny akustického výkonu pro jednotlivá frekvenční pásma vážené filtrem A

Pro identifikaci polohy oblasti, která vyzařuje nejvíce akustické energie byla pro převodovku X1 vytvořena akustická mapa (Obr. 12). Pomocí vzorců (20) a (8) byla vypočtena celková hladina akustického výkonu pro každou dílčí plochu stanovené měřicí plochy. Tyto hodnoty byly následně pomocí vzorce (19) přepočteny na hladiny akustického výkonu vážené filtrem A, aby výsledek lépe odpovídal lidskému vjemu. Oblasti se zvyšujícími se hodnotami jsou rozlišeny červeně.

				73,67	70,34	67,81	67,90	
				72,44	70,52	65,91	67,30	0,64
				72,64	70,18	67,32	67,38	
				71,72	69,98	68,57	68,32	
	67,94	67,54	66,47	70,17	69,73	64,13	67,24	66,92
	65,83	65,41	66,02	71,62	73,01	72,19	70,38	69,12
	68,24	69,24	69,53	70,02	72,02	63,93	67,81	68,64
	67,80	70,16	70,84	67,45	70,73	69,93	66,98	70,07
		0,9				0,64		
								1,1

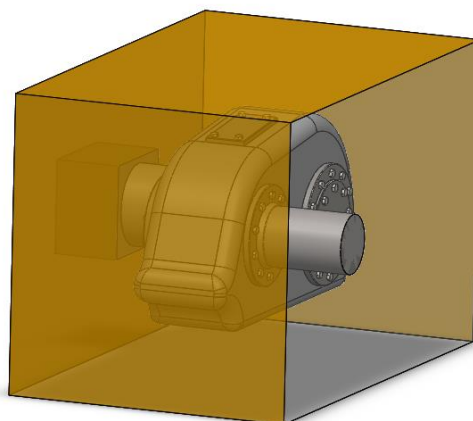
Obr. 12 – Akustická mapa pro měřicí plochu převodovky X1

Z obrázku Obr. 12 je patrné, že nejvyšší hladiny akustického výkonu se nachází na levé straně pomyslné horní stěny a stejně tak na levé straně zadní stěny měřicí plochy. Tato poloha souhlasí i s vysokými hodnotami na levé stěně, především v dolní a zadní oblasti. Ve všech těchto případech se jedná o hladiny vyšší než 70 dB(A). Vzhledem k tomu, že se nepředpokládá porucha na zařízení, je původcem tohoto hluku zřejmě záběr převodového soukolí.



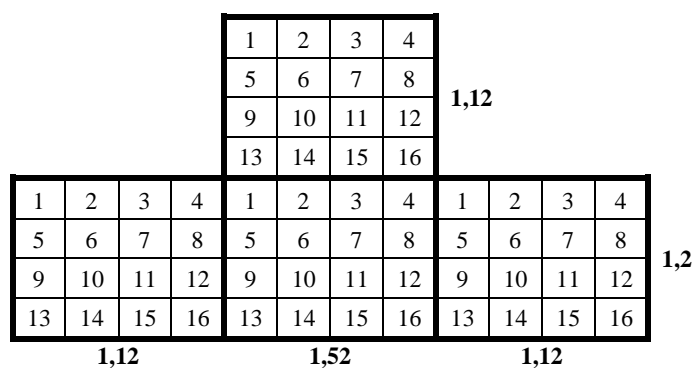
## 6.2 MĚŘENÍ PŘEVODOVÉHO ÚSTROJÍ X2

Data z měření převodovky X2 byla získána obdobným způsobem jako pro převodovku X1. Opět byla převodovka umístěna doprostřed měřicí plochy tvaru pomyslného kvádrů. Jeho rozměry byly dány 1,52 x 1,12 x 1,2 m, ale tentokrát byla odrazivá pouze přední a spodní stěna, ostatní stěny byly zahrnuty do měření měřicí plochy, jak je znázorněno na obrázku Obr. 13. Měření bylo prováděno při 86 % maximálního kroutícího momentu a 81 % maximálních otáček tohoto převodového ústrojí. Tato situace simuluje provozní stav, při kterém je vyzařována největší akustická energie.



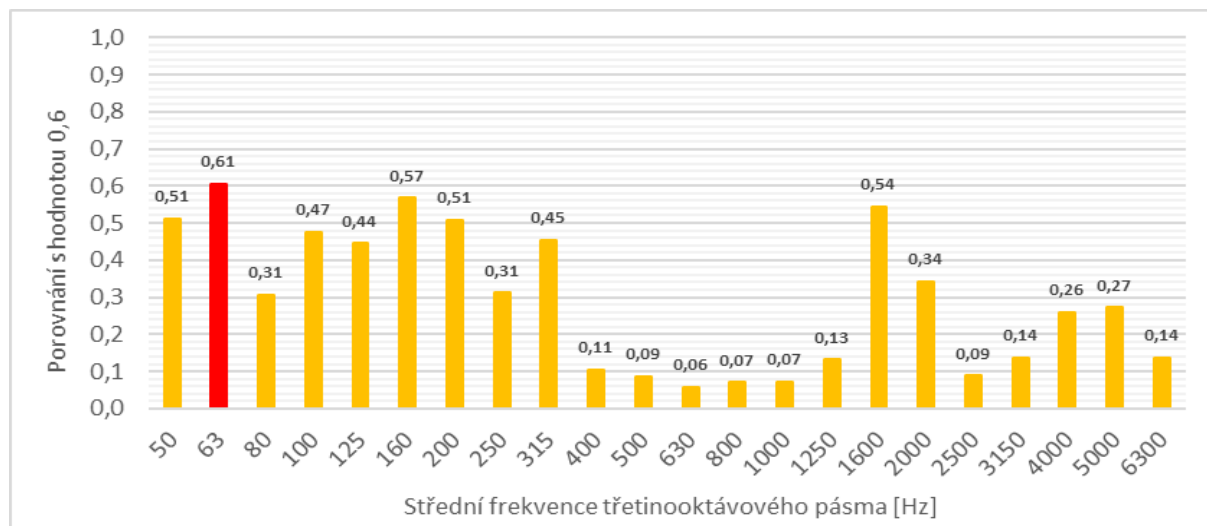
Obr. 13 – Zobrazení měřených a odrazivých stran měřicí plochy

Horní, zadní, levá a pravá strana byly tedy v rámci měření rovnoměrně rozděleny na 16 dílčích ploch, viz schéma Obr. 14.



Obr. 14 - Rozložení dílčích ploch na měřicí ploše

Pro počáteční zkoušku byla opět vybrána horní stěna měřicí plochy, na které se v deseti měřeních získala data s dobou průměrování 8 s. Použitím stejného postupu jako u převodovky X1 byl vypočítán indikátor  $F_1$  pro jednotlivé střední hodnoty třetiooktávkových pásem. Porovnání těchto výsledků s hodnotou 0,6 je zaneseno do grafu Obr. 15. Je zřejmé, že tato hodnota byla překročena jen pro jedno pásmo, a to pouze nepatrně.

Obr. 15 – Výsledné hodnoty indikátoru  $F_1$ 

Následně proběhl výpočet indikátorů  $F_2$ ,  $F_3$  a  $F_4$  dle vzoru v předcházející části. Kritérium 1 nebylo možné z důvodu absence dat zhodnotit. Na detekci akustických signálů vně měřicí plochy bylo opět použito porovnávací podmínky  $(F_3 - F_2) \leq 3 \text{ dB}$ . Hodnoty nesplňující tento předpoklad jsou v následující tabulce Tab. 5 zvýrazněny červeně. Opět se jedná o vnější akustický signál zapříčiněný odrazivostí prostoru testovací místnosti.

Tab. 5 - Výsledky podmínky  $(F_3 - F_2) \leq 3 \text{ dB}$ 

Frekvenční pásmo [Hz]	Horní strana	Zadní strana	Levá strana	Pravá strana
50	2,47	4,02	2,47	0,83
63	0,00	2,61	0,00	0,00
80	0,04	1,98	0,00	0,00
100	1,43	1,97	3,82	0,90
125	0,00	0,81	0,00	8,55
160	0,00	0,32	0,24	9,88
200	0,41	0,20	0,26	0,00
250	2,10	3,27	1,15	2,22
315	0,10	0,00	0,00	0,29
400	0,00	0,07	0,00	0,00
500	0,00	0,00	0,00	0,00
630	0,00	0,00	0,00	0,03
800	0,00	0,00	0,00	0,00
1000	0,15	0,00	0,00	0,00
1250	0,17	0,00	0,00	0,00
1600	1,43	0,14	0,00	0,00
2000	1,41	0,25	0,00	0,00
2500	0,00	0,00	0,00	0,00
3150	0,00	0,38	0,00	0,00
4000	0,00	0,62	0,00	0,00
5000	0,00	0,00	0,00	0,00
6300	0,00	0,00	0,00	0,00

Zjištěním platnosti podmínky (32) bylo ověřeno splnění či nesplnění kritéria 2. Do podmínky byl dosazen počet měřicích míst  $N=16$  a hodnota činitele  $C=8$ . Vypočítané hodnoty jsou znázorněny v tabulce Tab. 6. Je zřejmé, že kritérium 2 nebylo splněno pouze na levé stěně měřicí plochy pro pásmo 50 Hz. Hodnota hladiny akustického výkonu vážená filtrem A je pro toto pásmo na levé stěně 36,74 dB(A), což se od maximální hodnoty pro levou stranu 89,75 dB(A) liší o mnohem více než jen 10 dB, které jsou dány normou. Tato hodnota je tedy nevýznamná a může být zanedbána.

Tab. 6 - Hodnoty pro posouzení kritéria 2

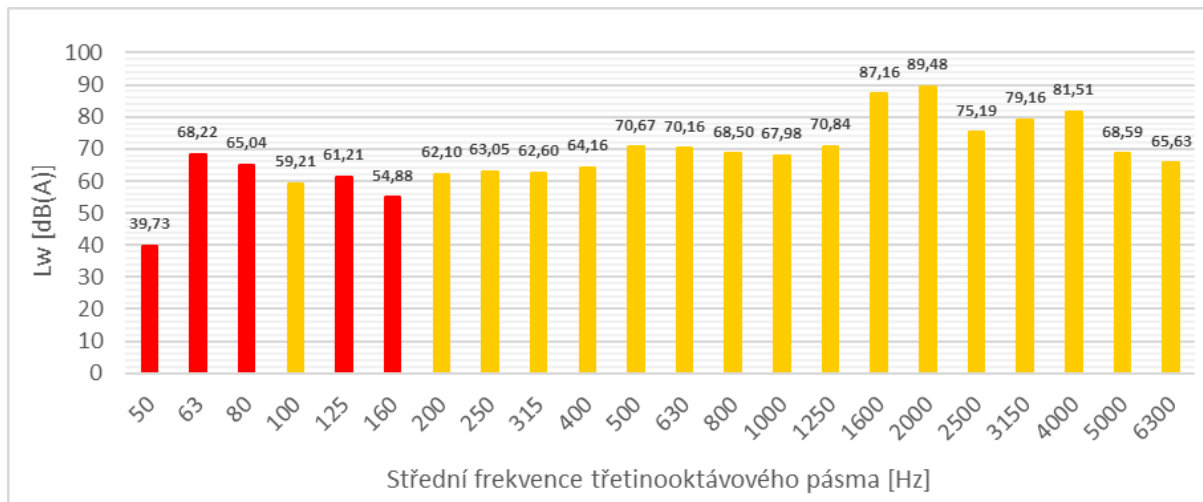
Frekvenční pásmo [Hz]	Horní strana	Zadní strana	Levá strana	Pravá strana
50	6,55	7,02	24,27	3,72
63	1,19	3,52	2,08	2,61
80	0,88	4,16	2,29	2,72
100	8,12	6,77	3,01	8,71
125	2,01	7,59	1,50	3,90
160	2,11	8,17	0,83	4,79
200	7,92	4,49	5,91	2,66
250	6,08	4,84	10,50	5,09
315	5,75	7,29	2,45	10,69
400	12,41	3,26	2,46	2,30
500	4,22	2,26	1,78	3,97
630	1,99	1,79	1,77	3,68
800	2,97	2,15	1,68	1,22
1000	4,58	1,70	2,17	0,52
1250	5,24	3,33	6,54	1,49
1600	12,13	2,32	4,41	3,04
2000	8,54	2,08	3,52	2,68
2500	4,44	0,93	1,07	2,70
3150	4,18	5,64	4,98	3,73
4000	5,44	5,39	6,37	4,73
5000	9,20	2,94	2,68	1,88
6300	5,15	2,23	3,05	0,96

Pro jednotlivé stěny měřicí plochy a celý zdroj byla opět vypočítána souhrnná hodnota dílčího akustického výkonu, jak znázorňuje tabulka Tab. 7.

Tab. 7- Celkové hodnoty hladin akustického výkonu

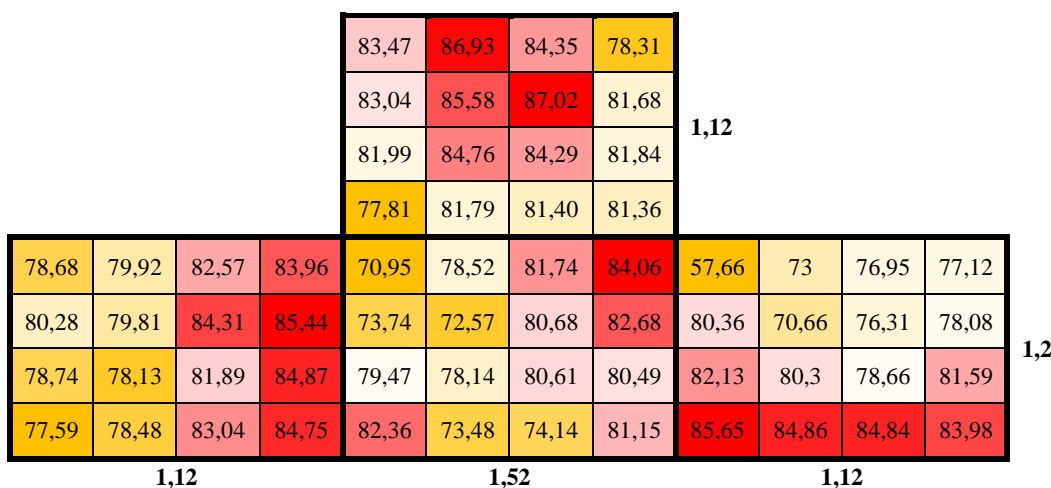
	Hladina akustického výkonu [dB]	Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB(A)]
<b>Horní strana</b>	95,46	91,90
<b>Zadní strana</b>	94,14	92,8
<b>Levá strana</b>	96,52	92,97
<b>Pravá strana</b>	96,89	92,41
<b>Celkem</b>	101,90	98,38

Následně byly vypočítány celkové hodnoty hladin akustického výkonu vážených filtrem A pro jednotlivá třetinooktávová pásma. Výsledky jsou porovnány v grafu Obr. 16. Pro pásma se střední frekvencí 50, 63, 80, 125 a 160 Hz vyšla suma dílčích akustických výkonů záporná (v grafu zaznačeno červeně), tudíž zde byla akustická energie pohlcována.



Obr. 16 - Hladiny akustického výkonu pro jednotlivá frekvenční pásma vážené filtrem A

Stejně jako v předchozím případě, byla i zde následně vytvořena akustická mapa měřicí plochy. Pro jednotlivé dílčí plochy byla vypočtena hladina akustického výkonu vážená filtrem A a oblasti s nejvyššími hodnotami jsou na schématu (Obr. 17) označeny červenou barvou.



Obr. 17 – Akustická mapa pro měřicí plochu převodovky X2

V tomto případě jsou stanovené hladiny akustického výkonu vážené filtrem A výrazně vyšší než u předchozí převodovky X1. Téměř všechny dílčí plochy vykazují hluk okolo 75 až 85 dB(A). Maxima se nachází v přední části horní stěny, v zadní části levé stěny a ve spodní části pravé stěny myšlené měřicí plochy. Poloha vysokých hodnot na horní stěně může ukazovat na hluk vydávaný otáčením hřídele v ložiscích, dle rozptýlené polohy maximálních hodnot na ostatních stěnách měřicí plochy je ale nejpravděpodobnějším původcem hluku opět ozubené soukolí převodovky.

## ZÁVĚR

V rámci rešerše jednotlivých částí normy ČSN EN ISO 9614, která se zabývá stanovením akustického výkonu pomocí měření intenzitní sondou, byly popsány vzorce a postupy používané ke klasifikaci hluku převodových ústrojí. Byl věnován prostor zejména metodě měření v bodech a výpočtu indikátorů a kritérií pro korekci dle požadované přesnosti měření.

K vyhodnocení dat dvojice jednostupňových průmyslových převodových ústrojí měřených v testovací místnosti byla použita právě zmiňovaná metoda měření v bodech. Tato metoda spočívá v obklopení zdroje zvuku imaginární měřicí plochou, která je rovnoměrně rozdělena na dílčí segmenty. V bodech uprostřed těchto segmentů je pak sondou měřena akustická intenzita.

Každý ze souborů analyzovaných dat byl získán při měření jiného převodového ústrojí a při jiné konfiguraci odrazivých a měřicích stěn. V obou případech byla zvolena měřicí plocha tvaru kvádrů, a každá z měřených stěn byla rozdělena na 16 dílčích segmentů. Převodové ústrojí X1 mělo tři stěny měřicí a tři odrazivé, převodové ústrojí X2 mělo čtyři měřicí stěny a odrazivé pouze dvě. Vždy byla jednou z odrazivých stěn přední strana, kde byla měřená převodovka napojena k referenční převodovce a dále pohonnému ústrojí, které zaručovalo požadovaný výkon. Druhou odrazivou stěnou byla podlaha místnosti. Zakotvení převodovky v požadované poloze uprostřed měřicí plochy zajišťovalo uložení hřídele do ložiskového domku.

Pro převodovku X1 byla celková hladina akustického výkonu vážená filtrem A stanovena na 85,55 dB(A). Z měřených třetinooktávových pásem byla nejvyšší hodnota 75,79 dB(A) vypočtena pro pásmo se střední hodnotou 1250 Hz, jež odpovídá zubové frekvenci. Podle výsledků počáteční zkoušky by bylo vhodné prodloužit dobu měření v každém z měřicích bodů tak, aby počáteční zkouška vyšla pro všechna frekvenční pásma a signál tedy mohl být považován za stacionární. Dle výsledků rozdílů indikátorů  $F_3$  a  $F_2$  je zřejmý velký vliv odrazů akustického signálu, proto by mělo být těmto odrazům zamezeno úpravou okolí měřicí plochy. Dále by se měla eliminovat možnost nesplnění kritéria 2 navýšením počtu měřicích bodů. Toto kritérium však nesplnilo pouze jedno pásmo a zjištěná hladina akustického výkonu zde byla velmi nízká. Tak nízká že byla v dalších výpočtech zanedbána. Úprava počtu měřicích bodů proto není nutná.

Vzhledem k větším rozměrům převodového ústrojí X2 a také vyšším otáčkám a krouticímu momentu není překvapivé, že výsledné hladiny akustického výkonu zde dosahují vyšších hodnot než u předchozí převodovky. Celková hladina akustického výkonu vážená filtrem A byla stanovena na 98,38 dB(A) a nejvýraznější bylo pásmo 2000 Hz s hodnotou 89,48 dB(A), což odpovídá zubové frekvenci. Co se týče počáteční zkoušky nevyhovělo zde pouze jedno frekvenční pásmo, a to překročením hodnoty 0,6 pouze o setinu. Také rozdíl indikátorů  $F_3$  a  $F_2$  byl příliš velký pro menší počet pásem. A kritérium 2 nesplnilo jen pásmo 50 Hz, které bylo následně zanedbáno. Lze tedy usuzovat, že vyšší počet měřicích bodů má pozitivní dopad na přesnost získaných výsledků.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 4. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06554-9.
- [2] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. Vyd. 2., V Akademickém nakl. CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
- [3] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901-9362-5.
- [4] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [5] TOMEH, Elias. *Technická diagnostika: vibrační diagnostika strojů a zařízení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-174-0.
- [6] WIRSUM, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-860-5626-0.
- [7] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [8] VLK, František. *Převodová ústrojí motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0025-0.
- [9] ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. Praha: Academia, 2001. ISBN 80-200-0461-0.
- [10] STODOLA, Jiří, Alena BREZNICKÁ a Pavel NOVOTNÝ. *Vibrodiagnostika strojů: monografie*. Brno: MSD, 2017. ISBN 978-80-7392-276-4.
- [11] ČSN EN ISO 9614-1. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity – Část 1\_ Měření v bodech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [12] ČSN EN ISO 1683. *Akustika - Vyvolené referenční hodnoty pro hladiny veličin v akustice a ve vibracích*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [13] VÉR, István L. a Leo L. (Leo Leroy) BERANEK. *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2006, x, 966 s. : obr., tabulky, grafy. ISBN 0-471-44942-3.
- [14] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jiří ČUPERA. *Automobily*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Avid, 2009. ISBN 978-80-87143-12-4.

- [15] BELL, Lewis H. a Douglas H. BELL. *Industrial noise control: fundamentals and applications*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 1994, xiv, 660 s. : il. ISBN 0-8247-9028-6.
- [16] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [17] MORAVEC, Vladimír. *Konstrukce strojů a zařízení II.: čelní ozubená kola : teorie, výpočet, konstrukce, výroba, kontrola*. Ostrava: Montanex, 2001. ISBN 80-7225-051-5.
- [18] BOLEK, Alfred. *Části strojů: Celost. vysokošk. učebnice*. Díl 2, Převody a převodová ústrojí. Praha: ČSAV, 1963. Spisy České matice techn. Roč. 68/1963.
- [19] ČSN EN ISO 9614-2. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity – Část 2\_ Měření skenováním*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [20] ČSN EN ISO 9614-3. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustické intenzity – Část 3\_ Přesná metoda měření skenováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$c$	[m/s]	rychlost šíření vlnění
$c_1, c_2$	[m/s]	rychlost zvuku v materiálu
$C$	[-]	činitel pro kritérium 2
$f$	[Hz]	frekvence vlnění
$f_1, f_2, f_3, f_4$	[Hz]	krajní frekvence pásma
$f_m$	[Hz]	střední frekvence pásma
$F_{+/-}$	[-]	indikátor záporného dílčího akustického výkonu
$F_1$	[-]	indikátor variability zvukového pole v čase
$F_2$	[-]	indikátor akustický tlak-akustická intenzita na měřicí ploše
$F_3$	[-]	indikátor záporného dílčího akustického výkonu
$F_4$	[-]	indikátor nerovnoměrnosti zvukového pole
$F_{pl}$	[-]	indikátor akustický tlak-akustická intenzita na měřicí ploše
$F_{p I_n}$	[-]	indikátor tlak-intenzita se znaménkem
$F_{p I_n }$	[-]	indikátor tlak-intenzita bez znaménka
$F_S$	[-]	indikátor nerovnoměrnosti pole
$F_T$	[-]	indikátor časového kolísání
$I$	[W/m <sup>2</sup> ]	akustická intenzita
$I_0$	[W/m <sup>2</sup> ]	referenční hodnota akustické intenzity
$I_n$	[W/m <sup>2</sup> ]	normálová složka akustické intenzity
$\bar{I}_n$	[W/m <sup>2</sup> ]	střední hodnota z normálové složky akustické intenzity
$k$	[Pa]	modul objemové pružnosti kapaliny
$K$	[dB]	korekce na zbytkovou intenzitu
$K_A$	[dB]	korekční činitel
$konst$	[-]	konstanta
$L_C$	[dB]	celková hladina akustické veličiny
$L_d$	[dB]	index dynamické schopnosti
$L_I$	[dB]	hladina akustické intenzity
$\bar{L}_{I_n}$	[dB]	střední hladina normálové složky akustické intenzity se znaménkem
$\bar{L}_{ I_n }$	[dB]	střední hladina normálové složky akustické intenzity bez znaménka
$L_N$	[dB]	hladina hlasitosti
$L_p$	[dB]	hladina akustického tlaku
$\bar{L}_p$	[dB]	střední hladina akustického tlaku
$L_W$	[dB]	hladina akustického výkonu



$L_{WA}$	[dB]	hladina akustického výkonu vážená filtrem A
$M$	[-]	počet krátkých časových vzorků
$N$	[-]	počet měřicích míst
$N_S$	[-]	počet dílčích ploch
$p$	[Pa]	akustický tlak
$p(t)$	[Pa]	okamžitý akustický tlak
$p_0$	[Pa]	referenční hodnota akustického tlaku
$p_b$	[Pa]	barometrický tlak
$p_c$	[Pa]	celkový tlak
$p_o$	[Pa]	amplituda akustického tlaku
$P$	[W]	akustický výkon
$P_0$	[W]	referenční hodnota akustického výkonu
$R$	[-]	součinitel odrazu
$s$	[dB]	nejistota
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$t$	[s]	čas
$T$	[s]	perioda vlnění
$T_{Fr<0,6}$	[s]	doba průměrování
$T_S$	[s]	doba skenování
$v$	[m/s]	rychlost kmitání částice
$v(t)$	[m/s]	okamžitá rychlost kmitání částice
$\alpha$	[-]	součinitel pohltivosti
$\delta_{pl_0}$	[dB]	index zbytkové intenzity
$\vartheta_1$	[°]	úhel dopadu paprsku
$\vartheta_2$	[°]	úhel odrazu paprsku
$\lambda$	[m]	vlnová délka
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota prostředí
$\tau$	[°C]	teplota
$\varphi$	[rad]	fázový posun

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výsledky pro převodové ústrojí X1	P1
Příloha 2 – Výsledky pro převodové ústrojí X2	P3