



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

PRINCIPY STANOVENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU

SOUND POWER LEVEL ESTIMATION PRINCIPLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Fajt

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Prokop, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Jakub Fajt
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Aleš Prokop, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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 diplomové práce:

Principy stanovení hladiny akustického výkonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat stanovením výsledné hladiny akustického výkonu předem definovaného všesměrového zdroje hluku. Hlavní náplní bude ověření a porovnání různých variant měření hluku dle normy ČSN ISO 9614, kdy se výsledná hladina akustického výkonu stanovuje z měření hladiny akustické intenzity.

Cíle diplomové práce:

- 1) Rešerše zahrnující měřicí vybavení a postupy měření dle adekvátních norem
- 2) Provedení experimentu zahrnující různé uspořádání měřících a plně odrazivých ploch
- 3) Stanovení výsledných hladin akustického výkonu pro jednotlivé varianty experimentů
- 4) Porovnání výsledků vzhledem k přesnosti dosažených výsledků a časové náročnosti experimentu

Seznam doporučené literatury:

BIES, David A. a HANSEN, Colin H. Engineering noise control: theory and practice. 4th edition. London: Spon Press, 2009. 747 s. ISBN 0-203-87240-1.

SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace. 1. vydání. Praha: Sdělovací technika, 1998, 250 s. ISBN 8090193625.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá principy stanovení hladiny akustického výkonu. Na začátku jsou vysvětleny důležité pojmy v akustice. Následuje přehled norem, zabývajících se určením hladiny akustického výkonu, včetně normy ČSN EN ISO 9614-1 použité při provedení experimentu. V neposlední řadě je zde popsán experiment, sestávající z několika měření stejného zdroje hluku, ale vždy s jinou konfigurací měřících a plně odrazivých ploch.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hladina akustického výkonu, akustická intenzita, hluk, bezdozvuková komora

ABSTRACT

This Master's thesis deals with principles of determination of the sound power level. At the very beginning there is an explanation of important concepts. Afterwards there is an overview of standards that deal with the sound power level determination, including the ČSN EN ISO 9614-1 standard which is used for the experiment. Last but not least, there is described the experiment, consisting of several measurements of the same object, but every time with different configuration of measuring and sound reflective surfaces.

KEYWORDS

Sound power level, acoustic intensity, noise, anechoic chamber

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FAJT, J. *Principy stanovení hladiny akustického výkonu*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 104 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Prokop, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Aleše Prokopa, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2017

.....

Jakub Fajt

PODĚKOVÁNÍ

Velmi děkuji Ing. Aleši Prokopovi, Ph.D. za vstřícnost, odborné rady a množství času, který mi věnoval při tvorbě této diplomové práce. Také děkuji svým rodičům za podporu během celého studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Základní pojmy v akustice.....	11
1.1 Zvuk	11
1.2 Hluk	12
2 Vliv hluku na člověka.....	13
2.1 Křivky stejné hlasitosti	13
2.2 Oktávová frekvenční pásma.....	14
2.3 Třetinooktávová frekvenční pásma.....	15
2.4 Váhové filtry	16
3 Základní veličiny v akustice.....	18
3.1 Vlnová délka	18
3.2 Akustická rychlost	19
3.3 Rychlost šíření akustických vln	19
3.4 Akustický tlak	20
3.5 Akustická intenzita	21
3.6 Akustický výkon	21
4 Hladiny akustických veličin	22
4.1 Hladina akustického tlaku.....	22
4.2 Hladina akustické intenzity.....	22
4.3 Hladina akustického výkonu.....	23
5 Úvod do měření hluku	24
5.1 ČSN EN ISO 3741	24
5.2 ČSN EN ISO 3743-1.....	25
5.3 ČSN EN ISO 3743-2.....	25
5.4 ČSN EN ISO 3744	26
5.5 ČSN EN ISO 3745	26
5.6 ČSN EN ISO 3746	27
5.7 ČSN EN ISO 3747	28
6 ČSN EN ISO 9614-1	29
6.1 Měřicí vybavení	30
6.2 Měřicí plocha	32
6.3 Měření	33
6.4 Výpočet hladiny akustického výkonu	37
6.5 Souhrn měřicího postupu	38
7 Měření.....	40

7.1	Měřicí vybavení	41
7.2	Zdroj hluku	44
7.3	Provozní podmínky	45
7.4	Příprava měření	46
7.5	Měření 1	48
7.6	Měření 2	51
7.7	Měření 3	54
7.8	Měření 4	61
7.9	Vyhodnocení experimentu	64
	Závěr	68
	Seznam použitých zkratk a symbolů	72
	Seznam příloh	74

ÚVOD

Naše planeta je stále víc a víc znečišťována věcmi, které jsme my lidé vyrobili. Budeme-li se bavit o automobilovém průmyslu, jako první asi každého napadne, že automobily znečišťují planetu zejména zplodinami, které jsou nedílnou součástí fungování každého spalovacího motoru. Emise ale nejsou jediným doprovodným dějem provozu automobilu, který škodí jak našemu životnímu prostředí, tak i nám, lidem. Často opomíjeným zdrojem znečištění životního prostředí je hluk.

V dnešní době se v automobilovém průmyslu stále častěji setkáváme s normami, které stanovují emisní nebo hlukové limity. Tyto normy se s každou novou verzí snaží povolené limity snižovat, takže automobilky jsou nuceny vyrábět auta, která budou tyto limity splňovat. Nedílnou součástí výroby nového automobilu je tím pádem také série měření, která mají za úkol ověřit, jestli jsou požadované limity splněny. Tato měření se provádějí podle některé z norem, které se touto problematikou zabývají. Každá z norem je však vhodná pro jiné účely, takže je důležité vybrat tu, která pro dané účely bude nejvíce vyhovovat. Normy se liší například předepsaným prostředím, maximální velikostí měřeného objektu, měřenou veličinou nebo třídou přesnosti, které je daným postupem možné dosáhnout.

Tato diplomová práce se zabývá experimentem, který byl proveden dle normy ČSN EN ISO 9614-1, kdy se výsledná hladina akustického výkonu stanovuje z měření hladiny akustické intenzity. V rámci experimentu byla provedena série měření stejného, předem definovaného zdroje hluku, s různými konfiguracemi uspořádání měřících a plně odrazivých ploch.

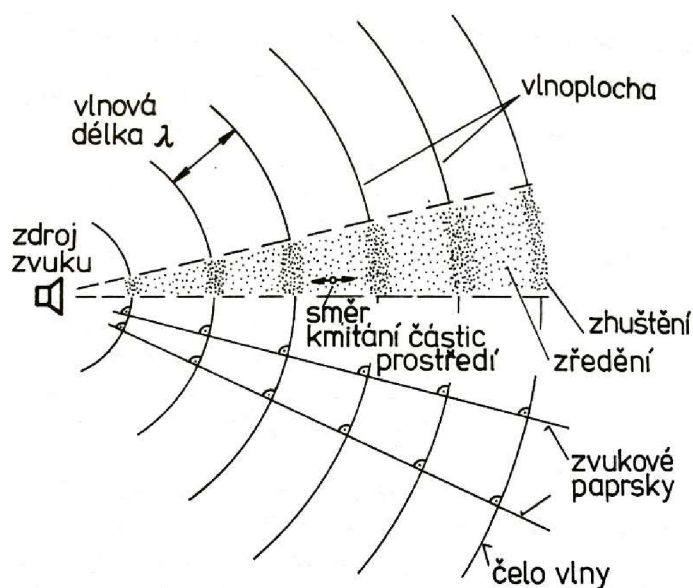
1 ZÁKLADNÍ POJMY V AKUSTICE

V této kapitole budou vysvětleny základní pojmy, se kterými se v akustice setkáváme. Především bude vysvětlen rozdíl mezi zvukem a hlukem.

1.1 ZVUK

Podstatou zvuku je pohyb částic pružného prostředí. Zvuk slyšitelný pro člověka se nachází ve frekvenčním rozsahu 20 až 20 000 kmitů za sekundu. Akustické vlnění o frekvenci menší, než 20 Hz se nazývá infrazvuk, a akustické vlnění o frekvenci vyšší než 20 000 Hz se nazývá ultrazvuk. Infrazvuk a ultrazvuk nejsou pro lidské ucho slyšitelné. Frekvenčnímu rozsahu 20 až 20 000 Hz říkáme slyšitelné pásmo. Tyto hodnoty nemusejí být pro každého člověka stejné, každý má ucho jinak citlivé. Záleží také na věku. [3]

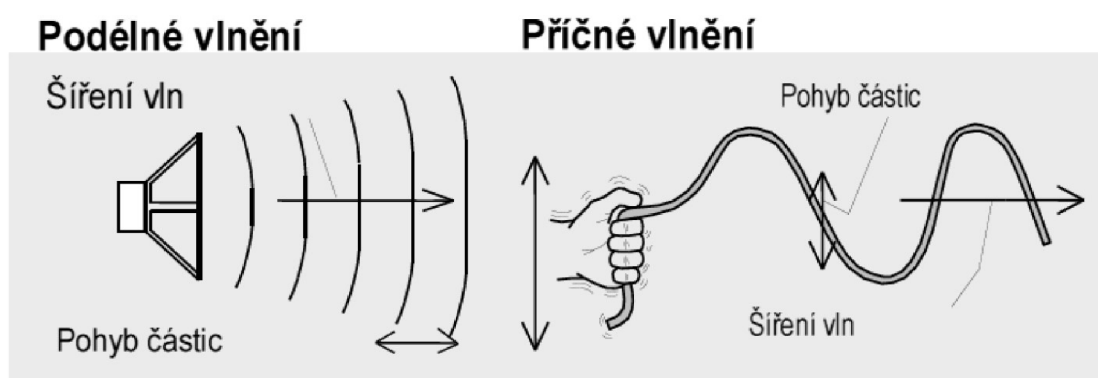
Zdrojem zvuku je tedy určitá část prostředí, kde vlivem budícího kmitání plochy objektu vzniká akustická energie. Odsud se potom tato energie šíří do okolního prostředí prostřednictvím akustických vln. Prostřednictvím vzduchu, případně vody, se kmity dostanou až k uším, kde rozkmitají ušní bubínky, což mozek vyhodnotí jako zvuk. Vlnění se šíří ve vlnoplochách, což jsou plochy se stejnými akustickými veličinami, ve směru zvukového paprsku rychlostí zvuku.



Obr. 1 Šíření zvukové vlny [1]

Částice daného prostředí vzhledem k postupující akustické vlně houstnou a řídnou. Částice se nikam nepřemísťují, nepohybují se s vlnou, pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh, jak je to znázorněno na obrázku 1. Podle způsobu kmitání se vlnění dělí na:

- příčné vlnění (transverzální) – částice prostředí kmitají kolmo na směr šíření vlnění
- podélné vlnění (longitudinální) – částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění.



Obr. 2 Podélné a příčné vlnění [8]

Jestli se prostředím budou šířit vlny podélné nebo příčné, záleží na typu (skupenství) daného prostředí. [1]

1.2 HLUK

Hluk nelze nijak přesně fyzikálně definovat, protože vždy záleží na vztahu konkrétního člověka k danému zvuku. Obecně lze říci, že hluk je každý nežádoucí, rušivý zvuk. Pro lidské ucho je většinou také nepříjemný.

Hluk se dělí podle příčiny vzniku akustické energie na: [1]

- Mechanický hluk – kmitající povrchy těles způsobí akustický rozruch většinou plynného prostředí. Prostřednictvím akustických vln se potom akustická energie šíří do celého akustického prostředí.
- Aerodynamický hluk – hluk vzniká v oblastech nestacionárního proudění plynu nebo kapaliny, nebo kde jsou výrazné změny tlaku (sání a výfuk spalovacích motorů).

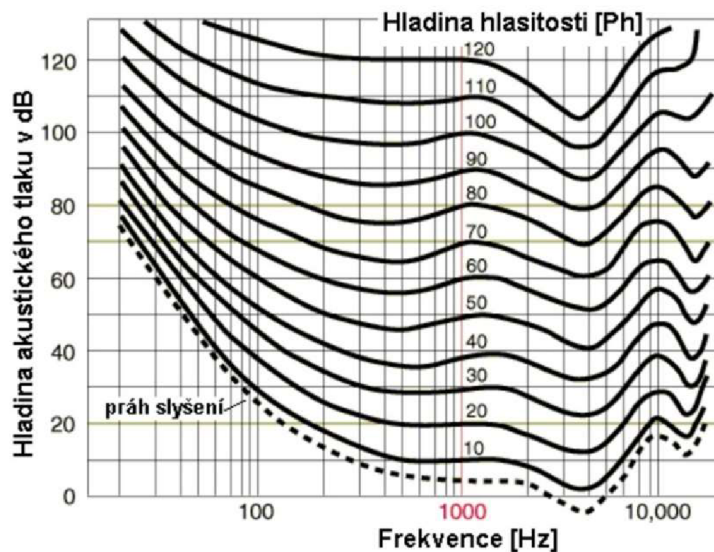
2 VLIV HLUKU NA ČLOVĚKA

Je-li řeč o hluku, máme tím na mysli nepříjemný zvuk, který není žádoucí a je většinou průvodním jevem nějakého jiného, požadovaného jevu (chod motoru). Už z této definice je zřejmé, že hluk nebude mít na člověka pozitivní vliv. Způsobuje například ztrátu koncentrace nebo snížení pracovní aktivity, což jsou ty méně závažné případy. Nadměrný hluk může vést i k poruchám spánku, ztrátě sluchu nebo srdeční chorobě. Je však důležité zmínit, že tyto symptomy se mohou projevit až po dlouhé době pobytu v hlučném prostředí. [15]

Hladinu akustického tlaku kolem 30 dB vnímá většina lidí jako příjemné ticho. Hladina vyšší než 65 dB už může být člověku nepříjemná. Při dlouhodobém pobytu v prostředí, kde hladina akustického tlaku přesahuje 85 dB už vznikají trvalé poruchy sluchu. Při 130 dB už se dá hovořit o prahu bolesti a účinky hluku se projevují bolestí sluchového orgánu. Při 160 dB dochází k protržení bubínku. Nepříjemné může ale být naopak i hluboké ticho. O takovém stavu hovoříme při hladině akustického tlaku pod 20 dB. Při takto nízké hladině akustického tlaku se člověk necítí dobře. Po nějaké době, strávené v takovém tichu, může člověk začít slyšet i tlukot svého srdce. Tento stav může nastat například v bezdozvukové komoře nebo v kosmické kabině. Proto je v kosmických kabinách nutné vytvářet vhodné zvukové pozadí, aby se kosmonauti cítili jako v přirozeném prostředí. Přirozeným prostředím se myslí takové prostředí, ve kterém není hluboké ticho, ale zároveň člověk není vystaven žádným nepříjemným, rozptylujícím zvukům. [3]

2.1 KŘIVKY STEJNÉ HLASITOSTI

Bylo zjištěno, že člověk vnímá zvuk o frekvenci 1 000 Hz a určité hladině akustického tlaku jinak než ten stejný zvuk o rozdílné frekvenci. Konkrétně jeho hladinu hlasitosti. Hladina hlasitosti čistých tónů o rozdílné frekvenci byla předmětem bádání řady vědců. Míra podráždění sluchu zvukem totiž není přímo úměrná fyzikální energii. Proto byly navrženy svazky křivek stejné hlasitosti, které jsou výsledkem velkého počtu psychoakustických měření. Tyto křivky zobrazují závislost vjemu hladiny hlasitosti na frekvenci: [3]



Obr. 3 Křivky stejné hlasitosti [6]

Je zřetelné, že hodnoty hladiny akustického tlaku a hladiny hlasitosti si odpovídají pouze při frekvenci 1 kHz. Z grafu můžeme vyvodit závěr, že aby byl subjektivní vjem hlasitosti zvuku pro člověka stejný u zvuku nízkofrekvenčního, jako u zvuku vysokofrekvenčního, musí být nízkofrekvenční zvuk mnohem silnější.

Hluk má tedy při různých frekvencích různou hladinu akustického tlaku. Při vyhodnocování měření hluku je tedy dobré vědět, při jakých frekvencích daný hluk dosahuje jaké hladiny. Není přímo nutné měřit s frekvenčním krokem 1 Hz, v praxi není taková přesnost požadována. Pro tyto účely jsou zavedena frekvenční pásma. Mohou být buď pásma o konstantní šířce pásma, nebo o procentuálně konstantní šířce. Nás budou zajímat ta druhá zmíněná, která mohou být buď oktávová nebo třetinooktávová. [3]

2.2 OKTÁVOVÁ FREKVENČNÍ PÁSMO

Oktávové frekvenční pásmo je vymezeno krajními frekvencemi, pro které platí: [3]

$$\frac{f_2}{f_1} = 2, \quad (1)$$

kde f_1 [Hz] je spodní frekvence oktávového pásma a

f_2 [Hz] je horní frekvence oktávového pásma.

Oktávová pásma označujeme střední frekvencí $f_{stř}$ [Hz], pro kterou platí vztah: [3]

$$f_{stř} = \sqrt{f_1 f_2}. \quad (2)$$

Střední frekvence jsou dány normou ČSN 35 6870. Pro spodní a horní frekvenci platí následující vztahy: [3]

$$f_1 = \frac{f_{stř}}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

$$f_2 = f_{stř} \sqrt{2}. \quad (4)$$

2.3 TŘETINOOKTÁVOVÁ FREKVENČNÍ PÁSMA

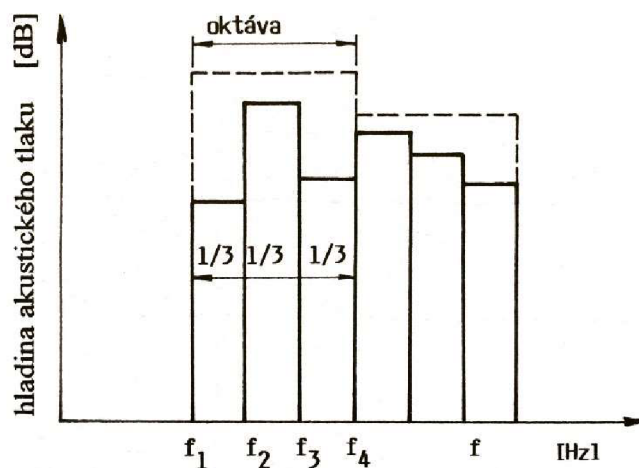
Pro větší hustotu rozdělení frekvenčních pásem se oktávové pásmo rozdělí na třetiny podle vztahu: [3]

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} \quad (5)$$

a tím se získá třetinooktávové pásmo. Pro tento vztah platí, že f_1 a f_4 jsou krajní frekvence oktávového pásmo. Pro třetinooktávové pásmo platí vztah: [3]

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2} \cong 1,26. \quad (6)$$

Třetinooktávové pásmo je dobře znázorněno na tomto obrázku:



Obr. 4 Třetinooktávové pásmo [3]

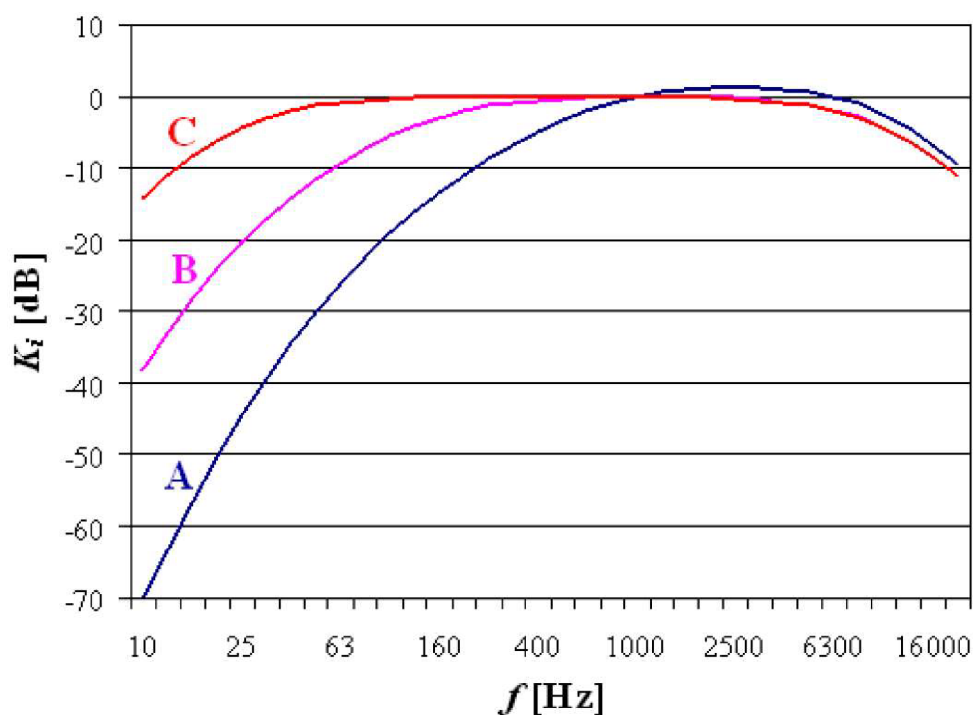
Na základě normy ČSN 35 6870 byla vytvořena následující tabulka, shrnující střední oktávové a třetinooktávové frekvence:

Tab. 1 Přehled oktávových a třetinooktávových pásem [11]

Střední frekvence pásma $f_{stř}$ [Hz]		Mezní frekvence	
oktávového	třetinooktávového	dolní f_1 [Hz]	horní f_2 [Hz]
31,5	25	22	28
	31,5	28	35
	40	35	44
63	50	44	57
	63	57	71
	80	71	88
125	100	88	113
	125	113	141
	160	141	176
250	200	176	225
	250	225	283
	315	283	353
500	400	353	440
	500	440	565
	630	565	707
1 000	800	707	880
	1 000	880	1 130
	1 250	1 130	1 414
2 000	1 600	1 414	1 760
	2 000	1 760	2 250
	2 500	2 250	2 825
4 000	3 150	2 825	3 530
	4 000	3 530	4 400
	5 000	4 400	5 650
8 000	6 300	5 650	7 070
	8 000	7 070	8 800
	10 000	8 800	11 300
16 000	12 500	11 300	14 140
	16 000	14 140	17 600
	20 000	17 600	22 500

2.4 VÁHOVÉ FILTRY

Jak již bylo řečeno, lidské ucho nevnímá zvuk stejně při různých frekvencích. Proto byly zavedeny váhové filtry, které ke změřené hladině zvuku přičtou určitou korekci a tím přepočtou hladinu zvuku na hodnotu, kterou vnímá lidský sluch. Váhové filtry jsou tři: A, B a C. V praxi se nejčastěji používá filtr A. Na následujícím obrázku je srovnání jednotlivých filtrů: [11]



Obr. 5 Průběhy váhových křivek filtrů typu A, B a C [11]

Při známé hladině akustického výkonu pro jednotlivá frekvenční pásma a při známých korekcích můžeme vypočítat výslednou hladinu akustického výkonu podle vzorce: [11]

$$L_{WA} = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Wi} + K_{Ai}}{10}}, \quad (7)$$

kde L_{WA} [dB] je hladina akustického výkonu vážená filtrem A,

L_{Wi} [dB] je hladina akustického výkonu v i -tém frekvenčním pásmu a

K_{Ai} [dB] je korekce při dané střední frekvenci v daném pásmu.

Jednotlivé korekce pro váhový filtr typu A jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 2 Korekce váhového filtru typu A [11]

$f_{stř}$ [Hz]	K_i [dB]	$f_{stř}$ [Hz]	K_i [dB]	$f_{stř}$ [Hz]	K_i [dB]	$f_{stř}$ [Hz]	K_i [dB]	$f_{stř}$ [Hz]	K_i [dB]
10	-70,4	50	-30,2	250	-8,6	1 250	0,6	6 300	-0,1
12,5	-63,4	63	-26,2	315	-6,6	1 600	1	8 000	-1,1
16	-56,7	80	-22,5	400	-4,8	2 000	1,2	10 000	-2,5
20	-50,5	100	-19,1	500	-3,2	2 500	1,3	12 500	-4,3
25	-44,7	125	-16,1	630	-1,9	3 150	1,2	16 000	-6,6
31,5	-39,4	160	-13,4	800	-0,8	4 000	1	20 000	-9,3
40	-34,6	200	-10,9	1 000	0	5 000	0,5		

3 ZÁKLADNÍ VELIČINY V AKUSTICE

V této kapitole budou popsány základní akustické veličiny, jako jsou akustický tlak, intenzita a výkon. Nejprve ale bude pozornost věnována vlnové délce.

3.1 VLNOVÁ DÉLKA

Vlnová délka je jednou ze základních charakteristických veličin periodického vlnění. Periodické vlnění se vyznačuje tím, že se v čase opakuje s určitou periodou. A právě vzdálenost, kterou vlnění urazí za tuto periodu, se nazývá vlnová délka. Nejlépe se to dá znázornit jako vzdálenost dvou nejbližších bodů se stejným akustickým stavem, například dvou maxim. [3]

Vlnová délka je definována vztahem: [4]

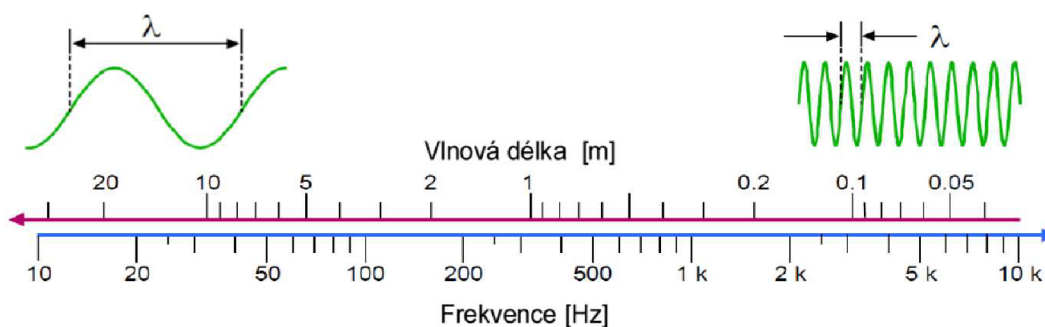
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{1}{T}, \quad (8)$$

kde λ [m] je vlnová délka,

T [s] je perioda,

c [m·s⁻¹] je rychlost šíření zvuku a

f [Hz] je frekvence vlnění.



Obr. 6 Vlnová délka [7]

3.2 AKUSTICKÁ RYCHLOST

Akustická rychlost nebo také rychlost částice, nesmí být zaměňována s rychlostí šíření zvuku. Akustická rychlost udává rychlost kmitání částic prostředí kolem rovnovážné polohy. Pohyb částic vytváří v čase proměnné tlakové změny. Poměr mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí je pro rovinnou vlnu stálý a závisí na konstantách prostředí podle následujícího vztahu: [2]

$$\frac{p}{v} = konst = \rho_0 \cdot c, \quad (9)$$

kde v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je akustická rychlost,

p [Pa] je tlak,

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

součin $\rho_0 \cdot c$ [$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$] je vlnový odpor nebo také impedance prostředí.

3.3 RYCHLOST ŠÍŘENÍ AKUSTICKÝCH VLN

Rychlost šíření akustických vln, nebo také rychlost zvuku, na rozdíl od akustické rychlosti udává, jakou rychlostí se zvuková vlna bude šířit prostředím. Tato veličina je tedy závislá na charakteru prostředí. Částice prostředí vzhledem k postupující akustické vlně houstnou a řídnu. Rychlost šíření akustických vln v tekutinách záleží na modulu objemové pružnosti a hustotě prostředí a je popsána vztahem: [4]

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (10)$$

kde c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] rychlost zvuku,

K [Pa] je modul objemové pružnosti a

ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je hustota prostředí.

Pro výpočet rychlosti zvuku v plynném prostředí lze tento vztah upravit do tvaru:

$$c = c_L = \sqrt{\mu \frac{p_b}{\rho}}, \quad (11)$$

kde c_L [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] je rychlost šíření akustických vln pro vlnění podélné,

μ je Poissonova konstanta a

p_b [Pa] je barometrický tlak.

Za předpokladu adiabatické změny vzduchu v průběhu vlnění, je pro vzduch možné vztah zjednodušit na následující:

$$c = 331,6 \sqrt{1 + \frac{t}{273,1}}, \quad (12)$$

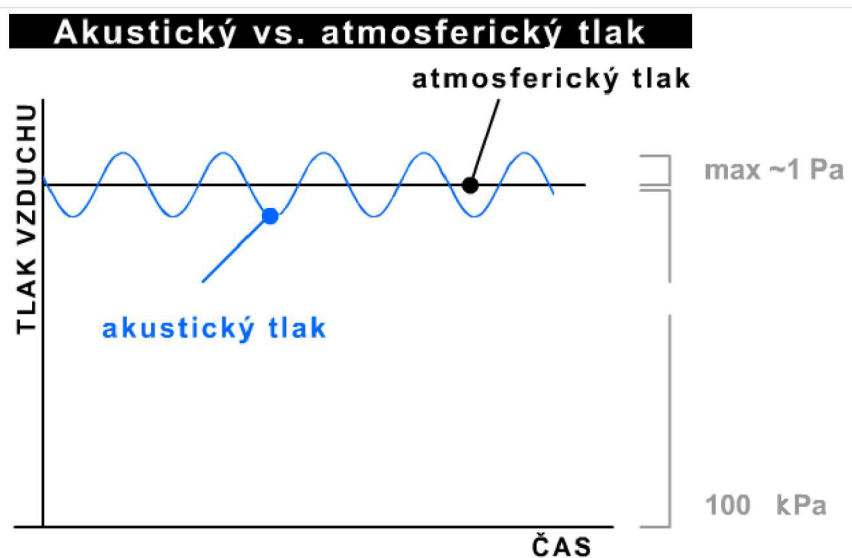
kde t [$^{\circ}\text{C}$] je teplota vzduchu.

Z tohoto vztahu vyplývá, že rychlost šíření akustických vln ve vzduchu a ostatních plynech, je závislá pouze na teplotě.

3.4 AKUSTICKÝ TLAK

Změna akustického tlaku je to, co rozechvívá bubínek v lidském uchu a díky tomu jsme schopni slyšet zvuky. Lidské ucho je přímo přizpůsobeno pro registrování odchylek tlaku vzduchu od barometrického tlaku. Barometrický tlak má hodnotu přibližně 101 325 Pa, zatímco zdravé lidské ucho začíná vnímat i malé změny akustického tlaku od hodnot přibližně $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Zhuštění a zředění částic prostředí má za následek zvýšení či snížení tlaku plynu či kapaliny. Celkový tlak tedy kolísá kolem původního barometrického tlaku. Akustický tlak p_c [Pa] vyjadřuje tuto odchylku.



Obr. 7 Znárodnění akustického tlaku vzhledem k atmosférickému [8]

Pro výpočet akustického tlaku tedy platí vztah: [4]

$$p_c = p_b + p(t), \quad (13)$$

kde p_c [Pa] je akustický tlak a

$p(t)$ je okamžitý akustický tlak.

U harmonického průběhu nepotřebujeme znát okamžitou hodnotu tlaku, stačí nám hodnota efektivní, která je dána vztahem: [4]

$$p_{ef} = \frac{p_a}{\sqrt{2}}, \quad (14)$$

kde p_{ef} [Pa] je efektivní hodnota akustického tlaku a

p_a [Pa] je amplituda akustického tlaku.

3.5 AKUSTICKÁ INTENZITA

Akustická intenzita je vektorová veličina, která popisuje velikost a směr toku akustické energie v určitém místě prostředí. Je to vlastně výkon na jednotkovou plochu a je definována vztahem: [4]

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)}, \quad (15)$$

kde I [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je akustická intenzita,

$p(t)$ je okamžitý tlak a

$v(t)$ je okamžitá rychlost.

3.6 AKUSTICKÝ VÝKON

Akustický výkon vyjadřuje množství akustické energie, která projde myšlenou prostorovou plochou za jednotku času a je definován vztahem: [4]

$$P = p \cdot v \cdot S, \quad (16)$$

kde P [W] je akustický výkon,

v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost kmitání částic a

S [m^2] je obsah plochy.

Akustický výkon je základním parametrem každého zdroje hluku. Je velmi důležitý při porovnávání více akustických zdrojů. Na rozdíl od akustického tlaku nebo akustické intenzity, je totiž akustický výkon nezávislý na vnějších podmínkách.

4 HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN

Je známo, že lidské ucho nereaguje na akustický tlak lineárně, nýbrž logaritmičtě. Spodní hodnota akustického tlaku (práh slyšení) je pro zdravého člověka při frekvenci 1 000 Hz kolem $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (tato hodnota byla stanovena jako referenční pro odvozování ostatních akustických veličin) a nejvyšší hodnota akustického tlaku (práh bolesti) je kolem 100 Pa. Rozdíl mezi těmito hodnotami je příliš velký, proto se pro všechny akustické veličiny používají logaritmičká měřítka. Byl zaveden pojem **hladina akustické veličiny**, který je vyjádřen jako dekadický logaritmus poměru sledované veličiny k příslušné referenční hodnotě:

$$L = \log \frac{A}{A_0} = \frac{\text{hodnota porovnávané veličiny}}{\text{referenční hodnota}} \quad (17)$$

Základní jednotkou hladiny akustických veličin je bel, ale v praxi se hodnoty uvádějí v decibelech [dB]. [4]

4.1 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU

Hladina akustického tlaku je definována vztahem: [4]

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0}, \quad (18)$$

kde L_p [dB] je hladina akustického tlaku a

p_0 [Pa] je referenční hodnota $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Pro opačný postup, když známe hladinu akustického tlaku a chceme dopočítat akustický tlak, můžeme použít vztah: [4]

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}. \quad (19)$$

4.2 HLADINA AKUSTICKÉ INTENZITY

Hladina akustické intenzity se značí L_I [dB] a je definována vztahem: [4]

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}, \quad (20)$$

kde I_0 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] je referenční hodnota $I_0 = 10^{-12}$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Opět pro opačný postup, když potřebujeme vypočítat akustickou intenzitu při známé hladině akustické intenzity, můžeme použít vztah: [4]

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L_I}{10}}. \quad (21)$$

4.3 HLADINA AKUSTICKÉHO VÝKONU

Hladina akustického výkonu je definována vztahem: [4]

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0}, \quad (22)$$

kde L_W [dB] je hladina akustického výkonu a

P_0 [W] je referenční hodnota $P_0 = 10^{-12}$ W.

Když opět známe hladinu akustického výkonu a potřebujeme vypočítat akustický výkon, můžeme vzorec upravit do tvaru: [4]

$$P = P_0 \cdot 10^{\frac{L_W}{20}}. \quad (23)$$

5 ÚVOD DO MĚŘENÍ HLUKU

Jak již bylo zmíněno dříve, hluk má na člověka neblahý vliv, v horším případě může vystavení vysokému hluku způsobit nevratné poranění sluchového orgánu. Z tohoto důvodu byly v České republice vypracovány hygienické limity pro hluk a vibrace, které se vztahují na:

- chráněné venkovní prostory
- chráněné venkovní prostory staveb
- chráněné vnitřní prostory staveb
- pracoviště.

Těmito limity se zabývá Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. [16]

Pro měření hluku je možné v současné době použít některou z více norem, které se touto problematikou zabývají. Každá z norem je vhodná pro jiný typ měření. Výběr nejvhodnější normy záleží například na místě, kde bude měření probíhat nebo na měřeném objektu (pro měření hluku silniční dopravy se použije jiná norma než pro měření hluku převodovky). V této kapitole budou popsány normy, které se zabývají určováním hladiny akustického výkonu.

5.1 ČSN EN ISO 3741

Tato mezinárodní norma, zabývající se metodami určení hladiny akustického výkonu zdroje, vychází z měření hladiny akustického tlaku. Měření musí probíhat v dozvukové zkušební místnosti o předepsaných akustických vlastnostech. Pomocí naměřených hodnot se vypočítá hladina akustického výkonu zdroje hluku v třetinooktávových pásmech (o střední frekvenci 100 Hz až 10 000 Hz), včetně korekcí beroucích v úvahu rozdíly mezi meteorologickými podmínkami v době a místě zkoušky a odpovídajících referenční charakteristické impedanci. Tato norma stanovuje metody, které jsou vhodné pro všechny typy hluku: stacionární, nestacionární nebo proměnný. Zdroj hluku je omezený pouze svou velikostí, která nesmí být větší než 2 % objemu zkušební místnosti. [17]

Tab. 3 Shrnutí normy ČSN EN ISO 3741 [12]

Třída přesnosti:	Přesná (třída 1)
Zkušební prostředí:	Dozvuková místnost
Kritéria vhodnosti zkušebního prostředí:	Objem místnosti a doba dozvuku musí být způsobilé
Objem zdroje zvuku:	Menší než 2 % objemu místnosti
Charakter hluku vyzařovaný zdrojem:	Ustálený, širokopásmový, úzkopásmový nebo s diskrétními kmitočty
Hladiny akustického výkonu, které lze získat:	Vážené funkcí A a v třetinooktávových nebo oktávových pásmech
Volitelné dostupné informace:	Další vážené hladiny akustického výkonu

5.2 ČSN EN ISO 3743-1

V této části mezinárodní normy je popsán způsob určení hladiny akustického výkonu zdroje pomocí porovnání hladin akustického tlaku zkoušeného zdroje hluku v oktávových pásmech s odpovídajícími hladinami kalibrovaného referenčního zdroje zvuku se známým akustickým výkonem. Hladiny akustického tlaku jsou prostorově průměrovány. Tato metoda je určena pro měření v místnosti s tuhými – odrazivými stěnami o předepsaných vlastnostech. Kvůli tomu je metoda vhodná pro měření menších zdrojů hluku. Pomocí metody, popsané v této části normy, je možné dosáhnout třídy přesnosti 2 – technická třída. Pro dosažení vyšší míry přesnosti je zapotřebí použít jiné metody. [18]

Tab. 4 Shrnutí normy ČSN EN ISO 3743-1 [12]

Třída přesnosti	Technická (třída 2)
Zkušební prostředí	Místnost s tuhými stěnami
Kritéria vhodnosti zkušebního prostředí	Objem $\geq 40 \text{ m}^3$ Činitel pohltivosti $\leq 0,20$
Objem zdroje zvuku	Menší než 1 % objemu místnosti
Charakter hluku vyzařovaný zdrojem	Libovolný, ale nikoli jednotlivé sledy impulzů hluku
Hladiny akustického výkonu, které lze získat	Vážené funkce A a v oktávových pásmech
Volitelné dostupné informace	Další vážené hladiny akustického výkonu

5.3 ČSN EN ISO 3743-2

Tato část normy se oproti předchozí liší v tom, že se místo porovnávání hladin akustických tlaků (měřeného zdroje hluku se zdrojem hluku o známém akustickém výkonu) měří hladiny akustického tlaku zdroje v oktávových pásmech ve stanovených pevných polohách mikrofonů nebo na stanovených drahách. Z těchto hodnot se potom určuje hladina akustického výkonu zdroje. Metoda je vhodná pro malé, přemístitelné zdroje hluku. Dosažitelná třída přesnosti je opět technická. Pro měření podle této metody je zapotřebí použití speciální dozvukové místnosti o předepsaných vlastnostech. [19]

Tab. 5 Shrnutí normy ČSN EN ISO 3743-2 [12]

Třída přesnosti	Technická (třída 2)
Zkušební prostředí	Speciální dozvuková místnost
Kritéria vhodnosti zkušebního prostředí	$70 \text{ m}^3 \leq \text{objem} \leq 300 \text{ m}^3$ $0,5 \text{ s} \leq T_{\text{nom}} \leq 1 \text{ s}$
Objem zdroje zvuku	Menší než 1 % objemu místnosti
Charakter hluku vyzařovaný zdrojem	Libovolný, ale nikoli jednotlivé sledy impulzů hluku
Hladiny akustického výkonu, které lze získat	Vážené funkce A a v oktávových pásmech
Volitelné dostupné informace	Další vážené hladiny akustického výkonu

5.4 ČSN EN ISO 3744

Tato mezinárodní norma popisuje metodu určování hladiny akustického výkonu zdroje pomocí měření hladin akustického tlaku ve volném zvukovém poli nad odrazivou rovinou. Lze tedy měřit v bezdozvukové místnosti s odrazivou podlahou, uvnitř průmyslové budovy nebo venku. Díky neomezeným rozměrům měřicí místnosti je tato metoda vhodná i pro velké zdroje hluku. V případě, že prostor pro měření není ideální, jsou v normě uvedeny postupy pro použití korekcí. Třída přesnosti, které je pomocí této metody možné dosáhnout, je technická. [20]

Tab. 6 Shrnutí normy ČSN EN ISO 3744 [12]

Třída přesnosti	Technická (třída 2)
Zkušební prostředí	Přibližně volné pole nad odrazivou rovinou
Kritéria vhodnosti zkušebního prostředí	$K_2 \leq 2$ dB*
Objem zdroje zvuku	Bez omezení; omezen jen dostupným zkušebním prostředím
Charakter hluku vyzařovaný zdrojem	Libovolný
Hladiny akustického výkonu, které lze získat	Vážené funkcí A a v třetinooktávových nebo oktávových pásmech
Volitelné dostupné informace	Informace o směrovosti a hladiny akustického tlaku jako funkce času; hladiny akustického tlaku jednotlivé zvukové události; jinak vážené hladiny akustického výkonu
* K_2 je korekce na prostředí	

5.5 ČSN EN ISO 3745

Metoda, popsaná v této mezinárodní normě, je založena na předpokladu, že akustický výkon je přímo úměrný střední kvadratické hodnotě akustického tlaku přes hypotetickou měřicí plochu obklopující zdroj. Na základě měření hladiny akustického tlaku na měřicí ploše obklopující zdroj se vypočítá výsledná hladina akustického výkonu, která obsahuje korekce zohledňující rozdíly mezi meteorologickými podmínkami v místě zkoušky a referenčními meteorologickými podmínkami. Tato metoda vyžaduje, aby bylo měření provedeno v bezodrazové nebo polobezodrazové místnosti o stanovených akustických vlastnostech. Pomocí této metody lze dosáhnout třídy přesnosti 1. [21]

Tab. 7 Shrnutí normy ČSN EN ISO 3745 [12]

Třída přesnosti	Přesná (třída 1)
Zkušební prostředí	Bezodrazová nebo polobezodrazová místnost
Kritéria vhodnosti zkušebního prostředí	Stanovené požadavky
Objem zdroje zvuku	Charakteristický rozměr menší než polovina měřicího poloměru
Charakter hluku vyzařovaný zdrojem	Libovolný
Hladiny akustického výkonu, které lze získat	Vážené funkce A a v třetinooktávových nebo oktávových pásmech
Volitelné dostupné informace	Informace o směrovosti a hladiny akustického tlaku jako funkce času; hladiny akustického tlaku jednotlivé zvukové události; jinak vážené hladiny akustického výkonu, hladiny akustické energie

5.6 ČSN EN ISO 3746

Tato mezinárodní metoda je vhodná pro měření například v průmyslových budovách nebo ve venkovním prostředí, tedy prostředí s alespoň jednou odrazivou rovinou. Dosažitelná třída přesnosti je pouze provozní (třída 3). Pomocí měření hladin akustického tlaku na měřicí ploše, která obklopuje zdroj hluku, se určí hladina akustického výkonu. Měřený zdroj hluku nemá přímo omezenou velikost, díky čemuž se dá tato metoda použít pro měření velkých strojních zařízení. [22]

Tab. 8 Shrnutí normy ČSN EN ISO 3746 [12]

Třída přesnosti	Provozní (třída 3)
Zkušební prostředí	Bez zvláštního zkušebního prostředí
Kritéria vhodnosti zkušebního prostředí	$K_2 \leq 7 \text{ dB}^*$
Objem zdroje zvuku	Bez omezení; omezen jen dostupným zkušebním prostředím
Charakter hluku vyzařovaný zdrojem	Libovolný
Hladiny akustického výkonu, které lze získat	Vážené funkce A
Volitelné dostupné informace	Hladiny akustického tlaku jako funkce času
* K_2 je korekce na prostředí	

5.7 ČSN EN ISO 3747

Tato mezinárodní norma, stejně jako norma ISO 3743-1, je založena na srovnání hladin akustického tlaku zkoušeného zdroje hluku v oktákových frekvenčních pásmech s hladinami referenčního zdroje zvuku. Z těchto hodnot je potom vypočítána hladina akustického výkonu daného zdroje hluku. Metoda, popsaná v této normě se od normy ISO 3743-1 liší tím, že je vhodná pro větší zařízení, která nemohou být přemístěna do speciální místnosti a musí se měřit přímo na místě. Dosažitelná třída přesnosti může být buď technická nebo provozní, podle toho, jak jsou splněny požadavky ohledně zkušebního prostředí. [23]

Tab. 9 Shrnutí normy ČSN EN ISO 3747 [12]

Třída přesnosti	Technická (třída 2) nebo provozní (třída 3)
Zkušební prostředí	Přibližně volné pole nad odrazivou rovinou <i>in situ</i> , závislé na stanovených požadavcích
Kritéria vhodnosti zkušebního prostředí	Stanovené požadavky
Objem zdroje zvuku	Bez omezení; omezen jen dostupným zkušebním prostředím
Charakter hluku vyzařovaný zdrojem	Ustálený, širokopásmový, úzkopásmový nebo s diskrétními kmitočty
Hladiny akustického výkonu, které lze získat	Vážené funkcí A z oktákových pásem
Volitelné dostupné informace	Hladiny akustického tlaku jako funkce času

6 ČSN EN ISO 9614-1

Pro účely našeho experimentu byla vybrána norma ČSN EN ISO 9614-1, zejména díky její univerzálnosti. V následující tabulce je přehled této normy:

Tab. 10 Shrnutí normy ČSN EN ISO 9614-1 [12]

Třída přesnosti	Přesná (třída 1), technická (třída 2) nebo provozní (třída 3)
Zkušební prostředí	Libovolné
Kritéria vhodnosti zkušebního prostředí	Stanovené požadavky pro: - vnější intenzitu - vítr, proudění, vibrace, teplotu - uspořádání okolí
Objem zdroje zvuku	Bez omezení
Charakter hluku vyzařovaný zdrojem	Širokopásmový, úzkopásmový nebo s diskrétními kmitočty, je-li v čase stálý
Hladiny akustického výkonu, které lze získat	Kmitočtové pásmo je omezené (1/3 oktávy 50 až 6 300 Hz) vážené funkcí A a v třetinooktávových nebo oktávových pásmech. Třída přesnosti je určena indikátory pole
Volitelné dostupné informace	Koncentrace kladného a/nebo záporného toku akustického výkonu

Dřívější mezinárodní normy (ISO 3740 až ISO 3747), zabývající se metodami určení akustického výkonu, jsou založené na měření akustického tlaku. Postupy uvedené v této sérii norem jsou velmi nákladné, protože je potřeba přesně stanovit charakteristiky zdrojů a prostředí, kvalifikační postupy a měřicí metody, které omezují nejistotu určení hladiny akustického výkonu na přijatelné meze. Proto tyto postupy nejsou vždy vhodné. Není také možné tyto postupy použít při vysoké hladině hluku vyzařovaného jinými zdroji než zdrojem, který je předmětem zkoušky.

Z těchto důvodů byla vytvořena tato norma, která doplňuje řadu mezinárodních norem ISO 3740 až ISO 3747. Zásadní rozdíly normy ISO 9614-1 od norem ISO 3740 až ISO 3747 jsou následující:

- Měřena je akustická intenzita i akustický tlak.
- Nejistota určení hladiny akustického výkonu metodou stanovenou v této části normy ISO 9614 je klasifikována podle výsledků předběžných měření a výpočtů provedených v souvislosti se zkušebním měřením.
- Běžné zařízení na měření akustické intenzity má omezený frekvenční rozsah daný třetinooktávovými pásmy se středními frekvencemi od 50 Hz do 6,3 kHz. Hodnoty vážené funkcí A v pásmech nejsou přímo měřeny, ale jsou vypočteny z omezeného rozsahu oktávových nebo třetinooktávových pásem.

V této části normy je popsán způsob měření hladiny akustického výkonu zdroje stacionárního hluku. Výsledná hladina akustického výkonu je vypočtena z akustické intenzity, akustický tlak

je měřen za účelem výpočtu indikátorů, které udávají, zda byl zvolen dostatečný počet měřících míst nebo jestli měření není ovlivněno jinými vnějšími zdroji. Měření probíhá v bodech, rovnoměrně rozmístěných na měřící ploše. [5]

6.1 MĚŘICÍ VYBAVENÍ

Musejí být použity přístroje a sondy vyhovující požadavkům IEC 1043. Při určování akustického výkonu ve třídě přesnosti 1 a 2 se musí použít přístroj třídy 1. Na měření akustické intenzity musí být použit přístroj, který poskytuje možnost korekce naměřených veličin v závislosti na teplotě a tlaku vzduchu okolí v souladu s IEC 1043. Pro každé měřené frekvenční pásmo také musí být zaznamenán index zbytkové intenzity použitého přístroje. [5]

6.1.1 MĚŘICÍ SONDA

Tato kapitola se bude v první části zabývat měřicími mikrofony a ve druhé části intenzitní sondou, která byla použita pro provedení měření.

MĚŘICÍ MIKROFONY

V dnešní době se pro komerční využití dá vybírat z několika různých mikrofonů, které se liší svým provedením a také principem měření hluku. Podle principu měření hluku se mikrofony dají rozdělit na: [2]

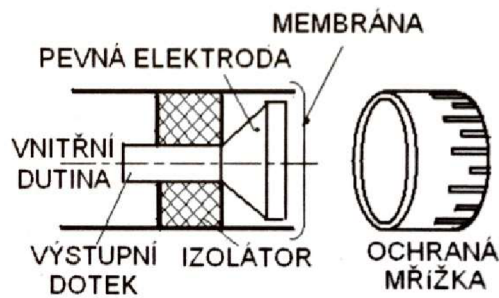
- magnetoelektrické
- uhlíkové
- elektretové
- kondenzátorové

Nás bude nejvíce zajímat mikrofon kondenzátorový, který funguje na základě zachytávání akustické tlakové vlny. Tento typ mikrofonu je pro měřicí účely nejvhodnější. [2]

KONSTRUKCE KONDENZÁTOROVÉHO MIKROFONU

Kondenzátorové (nebo také kapacitní) mikrofony jsou určeny zejména pro účely měření hluku, takže jsou na ně kladeny vysoké požadavky, jako například necitlivost na teplotní změny, vlhkost, vibrace a jiné vnější vlivy.

Mikrofon se skládá ze dvou elektrod, které při dopadu akustické tlakové vlny mění svoji vzdálenost, a tím se mění kapacita mikrofonu. Je to vlastně akusticko-mechanicko-elektrický měnič, který převádí akustické tlakové vlny na elektrický signál. Skládá se ze dvou elektrod, přičemž jedna elektroda je tvořena tenkou, kovovou membránou, která při dopadnu tlakové vlny pruží. Druhá elektroda je pevná, kruhového tvaru, s mnoha otvory. Důležité je, aby byla od zbytku tělesa mikrofonu dobře odizolovaná. Mezi oběma elektrodami, které jsou od sebe jen ve velmi malé vzdálenosti, se nachází dielektrikum v podobě vzduchu. [2]



Obr. 8 Řez kondenzátorovým mikrofonem [2]

Při dopadu akustické vlny na membránu mikrofonu se membrána rozechvěje, čímž začne měnit vzdálenost vzhledem k pevné elektrodě. Při konstantním náboji na obou elektrodách se začne měnit napětí podle vzorce: [2]

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (24)$$

kde U [V] je napětí,

Q [C] je náboj a

C [F] je kapacita mikrofonu.

Dosažením za kapacitu podle vzorce: [2]

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad (25)$$

kde $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ je permitivita vzduchu a

S [m²] je plocha membrány

získáme vztah mezi výstupním napětím a vzdáleností elektrod. Tento vztah je lineární: [2]

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \frac{S}{d}} = konst \cdot d, \quad (26)$$

kde d [m] je vzdálenost elektrod.

Tento typ mikrofonu je pro měřicí účely preferovaný mimo jiné i pro svou stálou citlivost, která se nemění ani po mnoha letech používání. Dalším důvodem mohou být i jeho malé rozměry a nízká hmotnost. Tyto mikrofony se vyrábí ve velikostech o průměru 1“, 1/2“, 1/4“ a 1/8“.

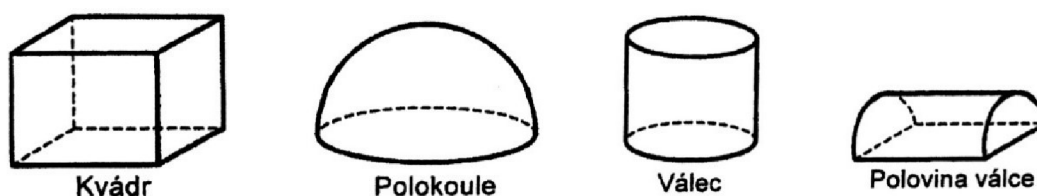
Důležitou vlastností mikrofonů je také jejich směrová charakteristika. To je závislost citlivosti mikrofonu na úhlu, který svírá akustická osa mikrofonu s osou akustického zdroje. Tato charakteristika se dá ovlivnit konstrukcí mikrofonu. Díky svým malým rozměrům má kondenzátorový mikrofon všesměrovou snímací charakteristiku. [1]

INTENZITNÍ SONDA

Intenzitní sonda se skládá ze dvou kondenzátorových mikrofonů, které jsou umístěny naproti sobě a oddělené spacerem o dané délce. Sonda musí být při měření orientována kolmo k měřenému objektu. Vlnění postupně projde přes oba mikrofony s časovým rozdílem. Díky známé vzdálenosti obou mikrofonů je následně vypočtena akustická rychlost, která je nezbytná pro výpočet akustické intenzity. Určení akustické intenzity se může uskutečnit analogově nebo digitálně, pomocí Fourierovy analýzy (FFT). [1]

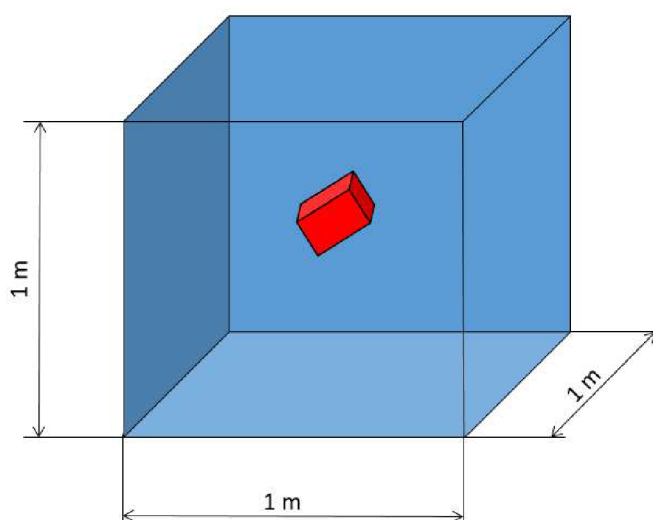
6.2 MĚŘICÍ PLOCHA

Měřicí plocha musí obklopotvat zkoušený zdroj hluku. Počítá se s tím, že spodní strana je odrazivá a na ní měření neprobíhá. Pro výběr měřicí plochy jsou doporučené tyto základní tvary:



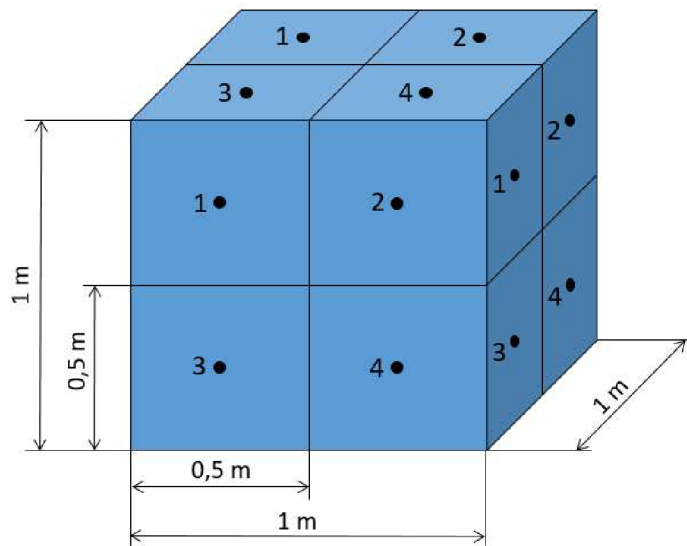
Obr. 9 Vhodné tvary měřicí plochy [5]

Mezi měřicí plochou a zkoušeným zdrojem hluku musí být průměrná vzdálenost větší než 0,5 m. V našem případě je zdrojem hluku elektrický motor z křovinořezu o rozměrech 0,1 x 0,12 x 0,2 m. Pro náš experiment se tedy nejvíce hodí měřicí plocha ve tvaru krychle o délce strany 1 m, přičemž zkoušený zdroj hluku bude zavěšen uprostřed tohoto tělesa. [5]



Obr. 10 Návrh měřicí plochy (zdroj hluku zavěšený uprostřed)

Podle normy je minimum 10 měřicích míst rozložených rovnoměrně na měřicí ploše nebo minimálně jedno měřicí místo na m^2 . Naše měřicí plocha má povrch $5 m^2$, takže minimum je 10 měřicích míst. Na obrázku 11 je zobrazen návrh rozložení měřicích bodů na měřicí ploše. Při rovnoměrném rozložení to vychází na 20 měřicích bodů. Jsou vždy 4 body na stranu měřicí plochy, rozložené rovnoměrně. Na každé straně jsou body 1 až 4, přičemž číslování začíná vždy v levém horním rohu, viz obr. 11.



Obr. 11 Jednotlivé segmenty měřicí plochy

Při takovém rozložení má každý segment obsah $0,25 m^2$.

6.3 MĚŘENÍ

Měření sestává z počáteční zkoušky, která spočívá ve změření hladiny normálové složky akustické intenzity, ze které se vypočítá indikátor F_1 . Následně se z hodnot hladiny normálové složky akustické intenzity a hladiny akustického tlaku vypočítají indikátory F_2 , F_3 a F_4 . Indikátory se porovnají s kritérii, a když splní všechny předpoklady, může se přejít k výpočtu hladiny akustického výkonu.

Celá tato kapitola včetně rovnic čerpá z normy ČSN EN ISO 9614-1.

6.3.1 POČÁTEČNÍ ZKOUŠKA

Začne se změřením normálové složky akustické intenzity na „obvyklém místě“ měřicí plochy k odhadu, zda je zvukové pole stacionární. Jako „obvyklé místo“ je dobré zvolit například místo uprostřed horní strany. Pro všechna změřená frekvenční pásma se vypočítá indikátor variability zvukového pole z následující rovnice:

$$F_1 = \frac{1}{\bar{I}_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - \bar{I}_n)^2}, \quad (27)$$

kde F_1 je indikátor variability zvukového pole,

M je počet krátkých časových vzorků a

\bar{I}_n je střední hodnota normálové složky akustické intenzity, z M krátkých časových vzorků I_{nk} , vypočítaná z rovnice:

$$\bar{I}_n = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M I_{nk}. \quad (28)$$

Doporučená hodnota M je 10.

Dále se změří hladiny normálové složky akustické intenzity a hladiny akustického tlaku ve všech měřicích bodech. Veličiny se měří ve všech frekvenčních pásmech, ve kterých se určuje akustický výkon.

Následuje výpočet indikátoru akustického tlaku-akustické intenzity pro každou stranu měřicí plochy podle následujícího vztahu:

$$F_2 = \bar{L}_p - \overline{L_{|I_n|}}, \quad (29)$$

kde F_2 je indikátor akustického tlaku-akustické intenzity,

\bar{L}_p je střední hladina akustického tlaku na dané straně měřicí plochy vypočítaná z rovnice:

$$\bar{L}_p = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}} \right) a \quad (30)$$

$\overline{L_{|I_n|}}$ je střední hladina akustické intenzity na dané straně měřicí plochy vypočítaná z rovnice:

$$\overline{L_{|I_n|}} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|I_{ni}|}{I_0} \right), \quad (31)$$

kde $|I_{ni}|$ je absolutní hodnota normálové složky akustické intenzity, změřená v i -tém měřicím místě na dané straně a

N značí počet měřicích míst na straně.

Jako další se vypočítá indikátor záporného dílčího akustického výkonu podle vztahu:

$$F_3 = \overline{L_p} - \overline{L_{I_n}}, \quad (32)$$

kde F_3 je indikátor záporného dílčího akustického výkonu a

$\overline{L_{I_n}}$ je střední hladina normálové složky akustické intenzity včetně znaménka vypočítaná z rovnice:

$$\overline{L_{I_n}} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_{ni}}{I_0} \right), \quad (33)$$

kde I_{ni} je normálová složka akustické intenzity změřená v i -tém měřicím místě na dané straně.

Nakonec se vypočítá indikátor nerovnoměrnosti zvukového pole podle vztahu:

$$F_4 = \frac{1}{\overline{I_n}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{ni} - \overline{I_n})^2}, \quad (34)$$

kde F_4 je indikátor nerovnoměrnosti zvukového pole a

$\overline{I_n}$ je střední hodnota normálové složky akustické intenzity vypočítané z rovnice:

$$\overline{I_n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{ni}. \quad (35)$$

6.3.2 POSTUP K DOSAŽENÍ POŽADOVANÉ TŘÍDY PŘESNOSTI

Při měření je možné zaznamenat na různých místech na měřicí ploše vysokou variabilitu zvukového pole. Pro dodržení horního limitu pravděpodobnosti určení hladiny akustického výkonu je nutné zkontrolovat vhodnost použitých přístrojů a parametrů měření, jako například rozměry měřicí plochy nebo počet měřicích míst vzhledem ke zvukovému poli a podmínkám prostředí. K tomu právě slouží vypočítané identifikátory, které určují, zda jsou zvolené podmínky pro měření dostačující. [5]

KONTROLA VHODNOSTI MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Aby mohly být naměřené hodnoty považovány za vhodné, musí být pro každé frekvenční pásmo a každý měřicí bod splněno **kritérium 1**:

$$F_2 > L_d, \tag{36}$$

kde L_d [dB] je index dynamické schopnosti, který se vypočítá z rovnice:

$$L_d = \delta_{pl_0} - K, \tag{37}$$

kde δ_{pl_0} [dB] je index zbytkové intenzity a

K [dB] je korekce na zbytkovou intenzitu, vybraná podle tabulky:

Tab. 11 Korekce na zbytkovou intenzitu [5]

Třída přesnosti	Korekce na zbytkovou intenzitu [dB]
Přesná (třída 1)	10
Technická (třída 2)	10
Provozní (třída 3)	7

Pro index zbytkové intenzity platí tento vztah:

$$\delta_{pl_0} = L_p - L_{In}. \tag{38}$$

V tomto případě malý index „n“ znamená směr osy sondy.

KONTROLA PŘIMĚŘENOSTI VÝBĚRU POČTU MĚŘICÍCH MÍST

Aby mohl být počet měřicích míst N považován za vhodný, musí být splněno **kritérium 2**:

$$N > CF_4^2, \tag{39}$$

kde C je činitel, určený podle následující tabulky:

Tab. 12 Hodnoty činitele C [5]

Střední frekvence oktávového pásma	Střední frekvence třetinooktávového pásma	činitel C		
		Přesná (třída 1)	Technická (třída 2)	Provozní (třída 3)
Hz	Hz			
63 až 125	50 až 60	19	11	
250 až 500	200 až 630	29	19	
1 000 až 4 000	800 až 5 000	57	29	
	6 300	19	14	
vážení funkcí A^1)				8
¹⁾ 63 Hz až 4 kHz nebo 50 Hz až 6,3 kHz				

INDIKACE VARIABILITY ZVUKOVÉHO POLE V ČASE

Je důležité, aby měřený hluk byl v čase dostatečně stacionární. Jestli tomu tak je, či nikoli, stanovuje indikátor F_1 podle následujícího kritéria:

$$F_1 > 0,6. \quad (40)$$

INDIKACE PŘÍTOMNOSTI SILNĚ SMĚROVÝCH VNĚJŠÍCH ZDROJŮ

Další důležitý faktor, který musí být pro správné měření splněn je, aby v blízkosti nebyly jiné zdroje hluku, které by mohly zkreslovat výsledky. Naměřené hodnoty mohou být považovány za použitelné, je-li splněno kritérium:

$$F_3 - F_2 > 3 \text{ dB}. \quad (41)$$

Pokud jsou všechna kritéria splněna, mohou se naměřené hodnoty hladiny akustické intenzity použít k výpočtu hladiny akustického výkonu.

6.4 VÝPOČET HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU

Nejprve je nutné vypočítat dílčí akustický výkon pro jednotlivé segmenty měřicí plochy a pro všechna změřená frekvenční pásma podle rovnice:

$$P_i = I_{ni} S_i, \quad (42)$$

kde P_i je dílčí akustický výkon pro i -tý segment,

I_{ni} je normálová složka akustické intenzity pro i -tý segment a

S_i je obsah i -tého segmentu měřicí plochy.

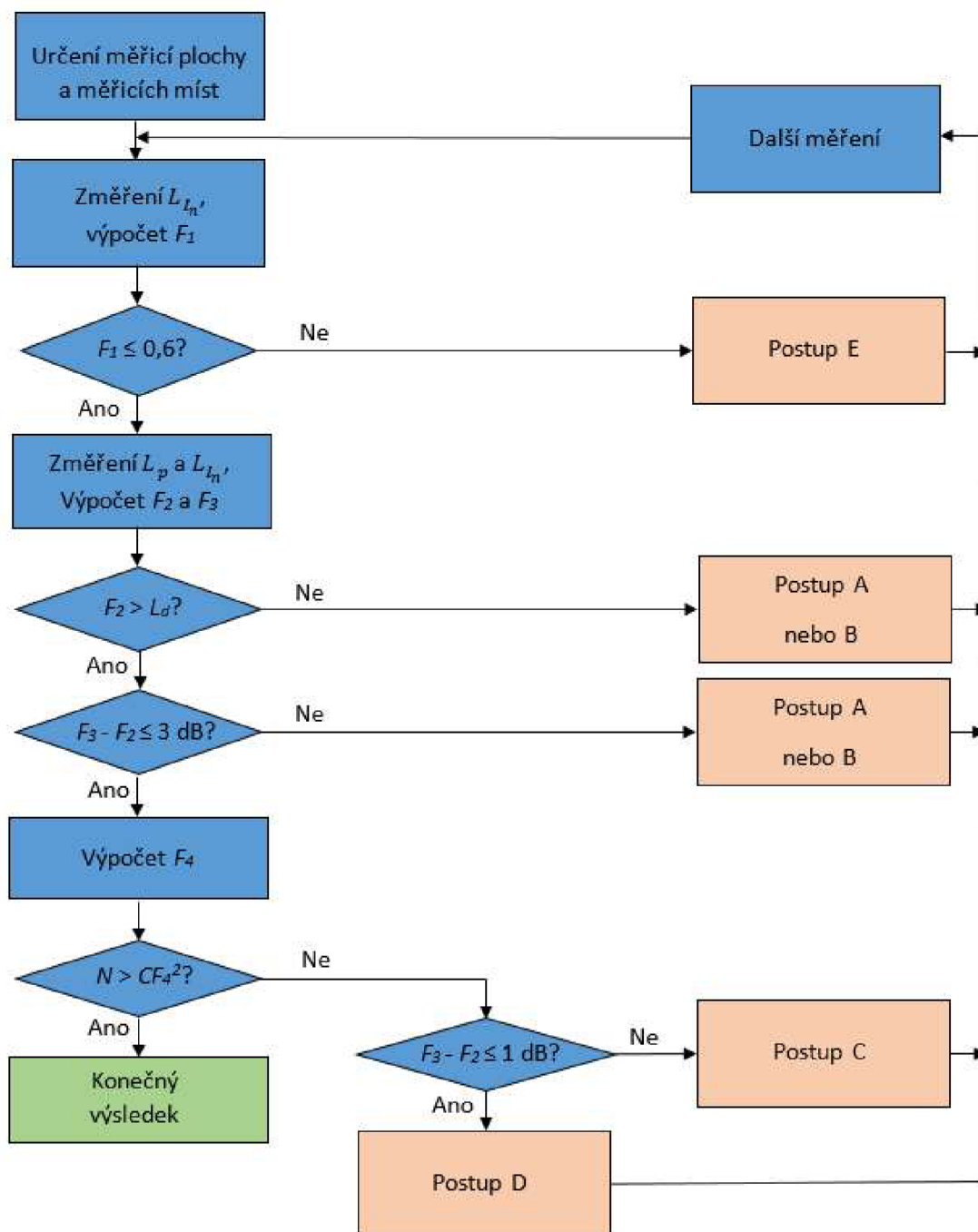
Následně se vypočítá výsledná hladina akustického výkonu zdroje hluku pro všechna změřená frekvenční pásma podle rovnice:

$$L_W = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_0}. \quad (43)$$

Nakonec se vypočítá výsledná hladina akustického výkonu zvážená filtrem A podle rovnice (7).

6.5 SOUHRN MĚŘICÍHO POSTUPU

Na následujícím obrázku je celý postup měření jednoduše shrnutý:



Obr. 12 Schéma měřicího postupu

V tabulce níže jsou jednotlivé postupy vysvětleny:

Tab. 13 Postupy k obr. 10 [5]

Označení podle obrázku	Postup
a	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.
b	Zastíní se měřicí plocha od vnějších zdrojů nebo se omezí přímé odrazy zvuku.
c	Zvýší se rovnoměrně hustota měřicích bodů tak, aby bylo vyhověno kritériu 2.
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
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 bodě.

7 MĚŘENÍ

Měření probíhalo v laboratořích ústavu automobilního a dopravního inženýrství v interiéru plně bezdozvukové komory za použití školního měřicího vybavení. Celé měření trvalo zhruba měsíc, kdy byly postupně měřeny jednotlivé konfigurace měřících a odrazivých ploch a na základě změřených hodnot byly vypočteny výsledky.

Byly zvoleny celkem 3 konfigurace uspořádání:

- spodní strana plně odrazivá
- spodní a zadní strana plně odrazivé
- spodní, zadní a levá strana plně odrazivé

Pro poslední konfiguraci, která by mohla být z důvodu nízkého počtu měřících ploch, a tím pádem i nízkého počtu měřících bodů problematická, byla provedena 3 stejná měření, jejichž účelem je poukázat na rozdílnost výsledků i při naprosto stejných podmínkách.

Pro poslední konfiguraci bylo nakonec provedeno měření se zhuštěnou sítí měřících bodů, na jehož základě byla vypracována „akustická mapa“ pro vizualizaci závislosti hladiny akustického výkonu na měřicím bodě.

Nakonec byl pořízen snímek akustickou kamerou, díky kterému je možné velmi přesně lokalizovat místo, odkud vychází největší hluk.

Měření probíhalo ve frekvenčním rozsahu třetinooktávových pásem se středními frekvencemi od 50 Hz do 6,3 kHz, což je dáno normou. Pro ověření, zda se nevyskytují významné hladiny ve vyšších pásmech, bylo provedeno měření v charakteristickém bodě uprostřed horní plochy se středními frekvencemi až do 20 kHz. Měření bylo provedeno desetkrát, ale výsledek byl vždy velmi podobný:



Obr. 13 Závislost hladiny akustického výkonu na frekvenci

Ve vyšších frekvenčních pásmech než 6,3 kHz se nevyskytují významné hladiny.

Je také důležité zmínit, že účelem celého experimentu není provést sérii měření, která budou následovat přesný postup podle normy. To by totiž mohlo vyžadovat například úpravy měřicí plochy nebo počtu měřicích míst, čímž by nebyly zachovány stejné podmínky všech měření. Účelem tohoto experimentu je naopak provést sérii měření se stejnými podmínkami a pouze poukázat na odlišnosti jednotlivých variant uspořádání měřicích a odrazivých ploch.

7.1 MĚŘICÍ VYBAVENÍ

Měřicí vybavení, použité pro provedení experimentu podle ČSN EN ISO 9614-1 musí dle normy splňovat certifikaci IEC 1043. V následujících kapitolách bude měřicí vybavení postupně popsáno.

7.1.1 MĚŘICÍ PROSTŘEDÍ

Dle použité normy ISO 9614-1 je měřicí prostředí libovolné. To je právě jedna z výhod použití této normy oproti některé normy ze série norem ISO 3740 až ISO 3747. Tato norma počítá s měřením jak ve volném prostranství, tak například ve výrobní hale. Musí být pouze splněna kritéria, popsaná v předchozí kapitole. Pro náš experiment byla vybrána plně bezdozvuková komora, která se nachází v budově školy fakulty strojího inženýrství v laboratořích ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Tohle měřicí prostředí bylo vybráno na základě předpokladu zachování stejných akustických podmínek při všech provedených měřeních.

TECHNICKÁ SPECIFIKACE PLNĚ BEZDOZVUKOVÉ KOMORY

Jedním ze základních faktorů, určujících charakter zkušebního prostředí, je součinitel akustické pohltivosti. Tento součinitel může nabývat hodnot 0 až 1, přičemž 0 znamená žádné pohlcení zvuku, dopadajícího na stěnu místnosti a 1 naopak znamená úplné pohlcení zvuku materiálem. Tato bezdozvuková komora má součinitel akustické pohltivosti 0,99 ve frekvenčním rozsahu 100 Hz – 20 kHz.

Dalším důležitým faktorem je celková hladina hluku pozadí, která je u této komory do 20 dB. Tato hodnota je vážena filtrem A a odpovídá frekvenčnímu rozsahu 20 Hz – 20 kHz.

Doba dozvuku je:

- do 0,1 s pro 100 Hz
- do 0,02 s pro 1 000 Hz
- do 0,005 s pro 10 000 Hz

Rozměry komory:

- délka 3,55 m
- šířka 2,76 m
- výška 3,6 m

Komora je obložena klíny, které jsou ze zvukpohltivého materiálu, který je tepelně odolný do 300 °C. Klíny jsou i na spodní ploše komory a nad nimi je vytvořena průzvučná podlaha, díky které je i spodní strana komory bezdozvuková.

Tato plně bezdozvuková komora splňuje podmínky normy ISO 3745.

7.1.2 MĚŘICÍ SNÍMAČ

Pro měření byla použita intenzitní sonda od firmy G.R.A.S., která se skládá ze dvou kondenzátorových mikrofonů o průměru 1/4“, které jsou odděleny spacerem o délce 12 mm.



Obr. 14 Intenzitní sonda od firmy G.R.A.S.

Tab. 14 Specifikace intenzitní sondy

Výrobce	G.R.A.S.
Typ	26CB
Sériové číslo Mikrofonu 1	122447
Sériové číslo Mikrofonu 2	122444

7.1.3 KALIBRÁTOR

S intenzitní sondou souvisí také kalibrátor. Ten je od firmy Brüel & Kjær. Je to tónový kalibrátor, který obsahuje komůrku, do které se zastrčí oba kondenzátorové mikrofony. Kalibrátor vydává tón o frekvenci 1 000 Hz a hladině akustického tlaku 93,8 dB.



Obr. 15 Kalibrátor od firmy Brüel & Kjær [13]

Tab. 15 Specifikace kalibrátoru

Výrobce	Brüel & Kjær
Typ	4297

7.1.4 ANALYZÁTOR

Analyzátor je zařízení, které je v měřicím řetězci umístěno mezi intenzitní sondou a počítačem. Toto zařízení převádí informace od intenzitní sondy na digitální signál, který je pomocí LAN kabelu přenesen do počítače, kde je dále zpracováván softwarem, který je dodáván spolu s analyzátozem. [14]

Tab. 16 Specifikace analyzátoru

Výrobce	Brüel & Kjær
Typ	3560-B-020
Sériové číslo	2426230

7.1.5 SOFTWARE

Software, použitý k získání naměřených údajů o hladině akustického tlaku a intenzity, byl Pulse Labshop ve verzi 10. Pro tento software existují moduly, pomocí kterých lze naměřená data zpracovat tak, jak to vyžaduje norma. Tento modul však kvůli absenci licence nebyl k dispozici, takže veškeré výpočty byly provedeny v programu Excel 2016.

7.2 ZDROJ HLUKU

Ve většině případů je daný zdroj hluku, který je potřeba změřit, a na základě jeho vlastností se přizpůsobí podmínky měření. V našem případě je to naopak. Je dána norma, podle které má být měření provedeno, a zdroj hluku má být zvolen tak, aby normě vyhovoval. Hlavní požadavek na zdroj hluku je, aby zdroj vydával v čase stacionární hluk bez vysoké míry variability. Zdroj by také neměl být příliš velký, aby byla umožněna snadná manipulace a aby měřicí plocha nemusela být příliš velká, kvůli omezeným rozměrům měřicí místnosti. Dále by zdroj neměl být spalovací motor, z důvodu tvorby výfukových plynů a jejich složitého odvodu. Poslední, možná nejdůležitější požadavek je, aby byl na zdroji štítek, na kterém bude uvedena jeho hladina akustického výkonu, aby bylo možné naměřené hodnoty porovnat právě s touto hodnotou. Jako ideální zdroj se jeví nějaké elektrické nářadí, které obecně splňuje výše uvedené požadavky.

Jako zdroj hluku byl tedy vybrán elektrický křovinořez od výrobce IKRA:



Obr. 16 Křovinořez od firmy IKRA

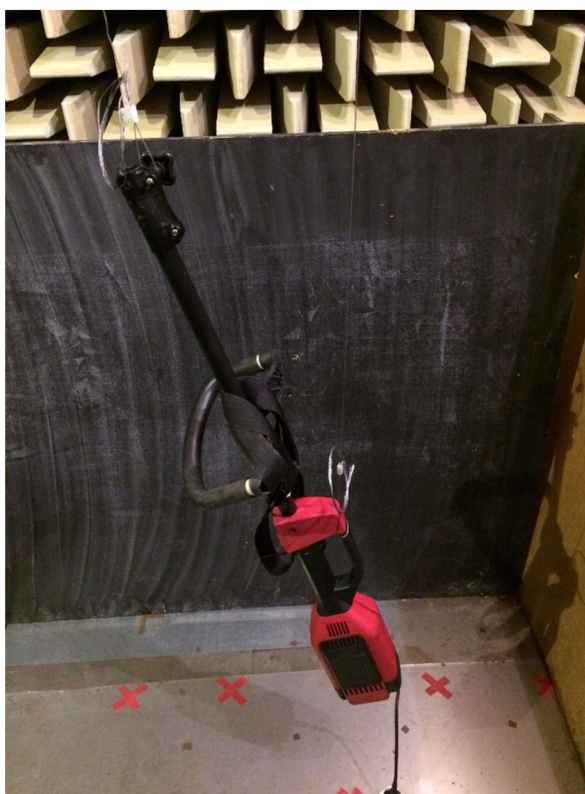
V následující tabulce jsou shrnuty informace ze štítku, umístěného na zdroji hluku:

Tab. 17 Specifikace zdroje hluku

Výrobce	IKRA
Typ	ESN 900
Rozměry motorové části [m]	0,1 x 0,12 x 0,2
Výkon [W]	900
Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB]	96

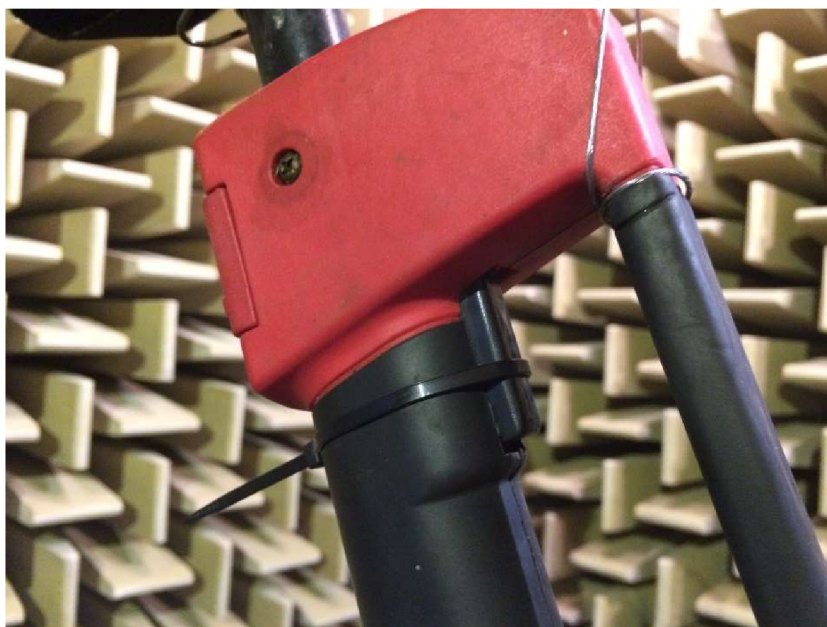
7.3 PROVOZNÍ PODMÍNKY

Provozní podmínky byly z důvodu srovnatelnosti jednotlivých měření zachovány po celou dobu experimentu stejné. Zkoušený zdroj hluku byl zavěšen za ocelová lanka zhruba uprostřed bezdozvukové komory, ve výšce 0,5 m nad zemí (nad odrazivou plochou.) Tento způsob montáže je vhodný zejména díky tomu, že ocelová lanka nezpůsobují přenos vibrací do žádného dalšího tělesa. Zároveň je tento stav podobný provoznímu stavu, kdy má člověk křovinořez pověšený přes rameno.



Obr. 17 Způsob zavěšení zdroje hluku

Zdroj hluku by měl být zkoušen při plném výkonu. V tomto stavu je vyzařováno největší množství akustické energie. Výkon zkoušeného zdroje se dá regulovat stiskem tlačítka. Z důvodu zachování stejných podmínek pro každé měření bylo tlačítko zafixováno v poloze při maximálním stlačení pomocí plastového stahovacího pásku:



Obr. 18 Způsob zajištění spouštěcího tlačítka

Provozní podmínky jako teplota, tlak a vlhkost vzduchu mohou být vzhledem k povaze experimentu a pouze velmi malým změnám, považovány za konstantní:

Tab. 18 Fyzikální vlastnosti vzduchu v komoře

Teplota	18,5 °C
Tlak	997 hPa
Vlhkost	64 %

7.4 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Vzhledem k povaze měřicího prostředí, ve kterém jsou všechny plochy bezdozvukové, musela být vytvořena odrazivá podlaha. Nebo alespoň určitá část, větší než spodní strana měřicí plochy. Na tohle se ideálně hodily plechové pláty, nalezené v budově školy.

Další „problém“, který bylo nutné vyřešit, byla skutečnost, že na měření budu sám. Měření tohoto typu se obvykle provádějí ve dvou lidech, kdy jeden člověk obsluhuje počítač, a druhý člověk obsluhuje sondu, kterou je vždy potřeba držet po určitou dobu na jednom bodě. Tento problém byl vyřešen tak, že byla sonda upevněna do držáku, a ten byl vždy nastaven na požadovanou pozici. Na zemi byla vyznačena místa, nad kterými se nacházejí měřicí body, a pomocí olovnice s provázkem byla sonda vždy nastavena na právě měřený bod.



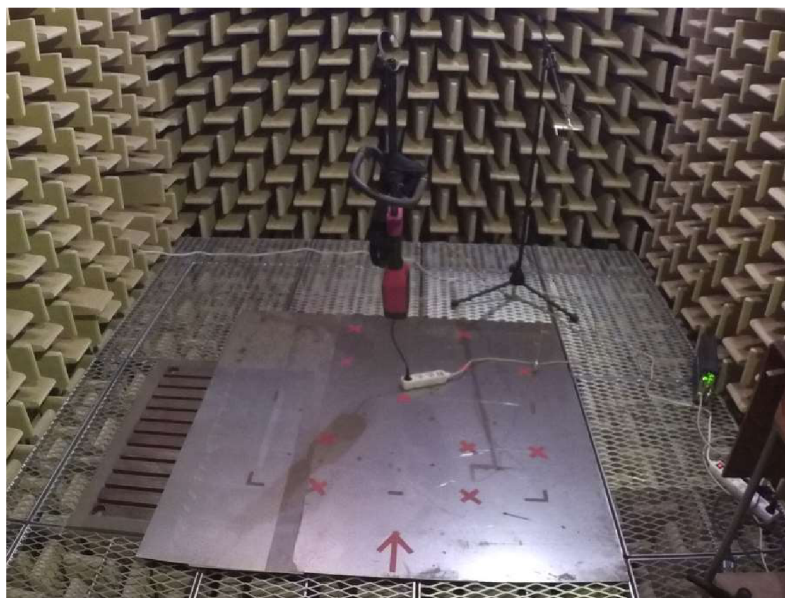
Obr. 19 Spodní strana měřicí plochy s vyznačenými pozicemi měřících bodů

7.4.1 KALIBRACE

Před prvním měřením bylo potřeba provést kalibraci sondy k zajištění správného měření. Kalibrace se provádí pomocí CPB analýzy (Constant Percent Bandwidth), která je použitelná pro třetinooktávová pásma, přičemž měřené střední frekvence jsou 50 Hz až 6,3 kHz. Při kalibraci není použit žádný filtr. Doba průměrování byla nastavena na 12 s. Kalibrační hodnota, která by správně měla být naměřena na obou mikrofonech, je 93,8 dB. Po zkalibrování byla na mikrofonu 1 naměřena hodnota 93,6 dB a na mikrofonu 2 hodnota 93,5 dB, což jsou pro naše účely dostatečně přesné výsledky.

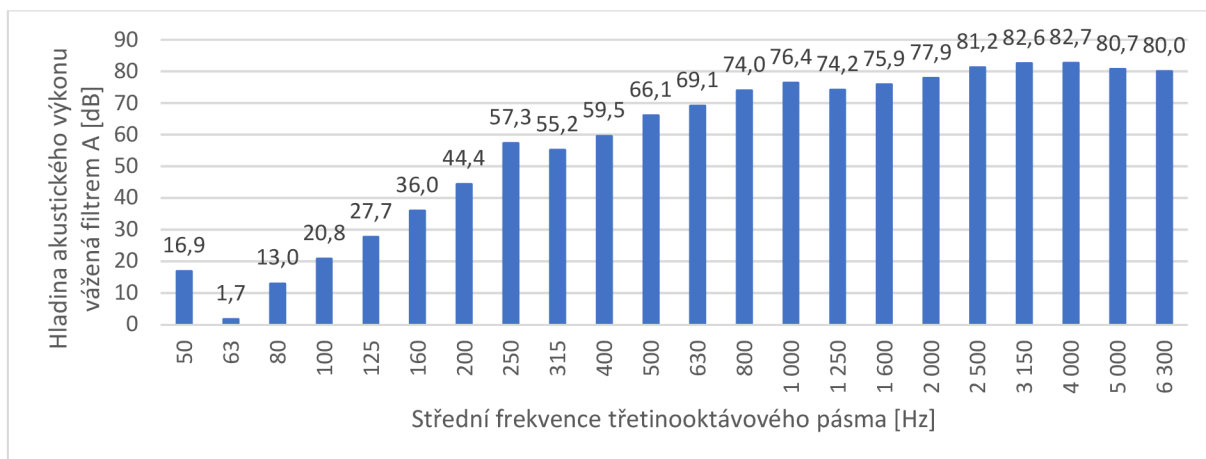
7.5 MĚŘENÍ 1

První měření bylo provedeno s plně odrazivou spodní stranou. Ostatní strany byly měřicí. Měřicí plocha měla tvar krychle o délce strany 1 m. Na každé měřicí straně byly rovnoměrně rozmístěny 4 měřicí body, takže celkově bylo na ploše 20 měřicích míst. V plně bezdozvukové komoře musela být vyřešena odrazivost spodní strany, což bylo zajištěno pomocí kovových plátů umístěných na podlahu, jak je vidět na následujícím obrázku.



Obr. 20 Měření 1 s odrazivou spodní stranou

Doba průměrování byla nastavena na 12 s, což je maximum. Nejprve bylo provedeno měření pro výpočet indikátoru F_1 . Sonda byla umístěna doprostřed horní strany, přímo nad měřený zdroj hluku, a bylo provedeno 10 měření. Výsledky z měření indikátoru F_1 jsou uvedeny v příloze. Poté bylo provedeno měření v každém bodě na každé měřicí straně a byly vypočteny indikátory F_2 , F_3 a F_4 , jejichž hodnoty jsou opět uvedeny v příloze. Na základě naměřených hodnot hladin akustické intenzity byly následně vypočteny hodnoty hladin akustického výkonu vážené filtrem A v každém frekvenčním pásmu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následujícím grafu:



Obr. 21 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Následující tabulka uvádí, zda je splněno kritérium 1 a 2 v daném frekvenčním pásmu:

Tab. 19 Kritéria 1 a 2 pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	kritérium 1	kritérium 2
50	X	X
63	✓	X
80	X	X
100	X	X
125	✓	✓
160	✓	X
200	✓	✓
250	✓	X
315	✓	✓
400	✓	X
500	✓	✓
630	✓	✓
800	✓	✓
1 000	✓	✓
1 250	✓	✓
1 600	✓	✓
2 000	✓	✓
2 500	✓	✓
3 150	✓	✓
4 000	✓	✓
5 000	✓	✓
6 300	✓	✓

Hladiny, které nesplňují kritérium 2, je při určování výsledné hladiny akustického výkonu možné zanedbat, jelikož hladina součtu akustických výkonů vážených funkcí A v těchto pásmech je o 10 dB nebo více nižší než nejvyšší hladina vážená funkcí A. Nejvyšší hladina vážená funkcí A má hodnotu 82,7 dB a hladina součtu akustických výkonů vážených funkcí A, nesplňujících kritérium 2, je 61,6 dB. Tyto hladiny se tedy dají považovat za nevýznamné.

V následující tabulce jsou uvedeny všechny hladiny akustického výkonu zvážené funkcí A včetně těch, které nesplňují kritérium 2, a jsou tedy zanedbána. Tato pásma jsou vyznačena červeně.

Tab. 20 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB]
50	16,9
63	1,7
80	13,0
100	20,8
125	27,7
160	36,0
200	44,4
250	57,3
315	55,2
400	59,5
500	66,1
630	69,1
800	74,0
1 000	76,4
1 250	74,2
1 600	75,9
2 000	77,9
2 500	81,2
3 150	82,6
4 000	82,7
5 000	80,7
6 300	80,0

Výsledná hladina akustického výkonu vážená filtrem A pro měření 1 s odrazivou spodní stranou nakonec vyšla **89,7 dB**.

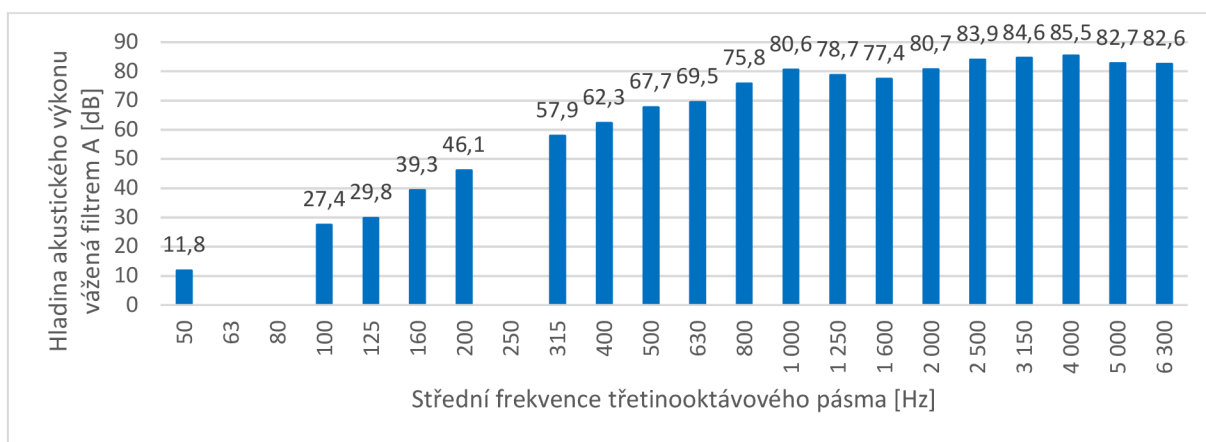
7.6 MĚŘENÍ 2

Druhé měření bylo provedeno se dvěma odrazivými stranami. Zůstala odrazivá spodní strana a k ní přibyla levá strana. Levá odrazivá strana byla vytvořena pomocí školní tabule, jak je vidět na následujícím obrázku.



Obr. 22 Měření 2 s odrazivou spodní a levou stranou

Ostatní podmínky byly zachovány stejné jako při prvním měření. Doba průměrování byla opět 12 sekund. Jako první bylo provedeno měření k určení indikátoru F_1 v místě uprostřed horní měřicí plochy, přímo nad měřeným zdrojem hluku. Následně bylo postupně provedeno měření ve všech měřicích bodech, samozřejmě kromě bodů, nacházejících se na levé straně, která je pro tohle měření nahrazena odrazivou plochou. Vypočtené hodnoty indikátorů F_1 až F_4 jsou v příloze. Z naměřených hodnot hladin akustické intenzity byly vypočteny hodnoty hladin akustického výkonu vážené filtrem A pro všechna frekvenční pásma. Výsledky jsou znázorněny v následujícím grafu:



Obr. 23 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Ve frekvenčních pásmech se střední frekvencí 63, 80 a 250 Hz vyšly záporné hodnoty součtu dílčích akustických výkonů, takže pro tato pásma nemohla být vypočtena hladina akustického výkonu. V následující tabulce jsou výsledky kritérií 1 a 2.

Tab. 21 Kritéria 1 a 2 pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	kritérium 1	kritérium 2
50	X	X
63	X	X
80	X	X
100	✓	X
125	✓	X
160	✓	X
200	✓	X
250	✓	X
315	✓	✓
400	✓	✓
500	✓	✓
630	✓	✓
800	✓	✓
1 000	✓	X
1 250	✓	✓
1 600	✓	✓
2 000	✓	✓
2 500	✓	✓
3 150	✓	✓
4 000	✓	✓
5 000	✓	✓
6 300	✓	✓

Podle normy je při určování celkové hladiny akustického výkonu vážené funkcí A možné zanedbat ty hladiny, které nesplňují kritérium 2, a hladina součtu akustických výkonů vážených funkcí A v těchto pásmech je o 10 dB nebo více nižší než nejvyšší hladina vážená funkcí A. Nejvyšší hladina vážená funkcí A má hodnotu 85,5 dB a hladina součtu akustických výkonů vážených funkcí A, nesplňujících kritérium 2, je 80,6 dB. Tyto hladiny se tedy za nevýznamné považovat nedají. Je to způsobeno tím, že kritérium 2 není splněno ve frekvenčním pásmu o střední frekvenci 1 000 Hz. Pokud tohle pásmo zůstane zanedbáno, hladina součtu akustických výkonů vážených funkcí A ve zbylých zanedbatelných pásmech vyjde 47,1 dB. Při výpočtu výsledné hladiny akustického výkonu vážené funkcí A budou tedy zanedbána pouze pásma o střední frekvenci 0 až 250 Hz.

V následující tabulce jsou uvedeny všechny hladiny akustického výkonu vážené funkcí A včetně těch, které nesplňují kritérium 2, a jsou tedy zanedbány. Tato pásma jsou vyznačena červeně.

Tab. 22 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB]
50	11,8
63	-
80	-
100	27,4
125	29,8
160	39,3
200	46,1
250	-
315	57,9
400	62,3
500	67,7
630	69,5
800	75,8
1 000	80,6
1 250	78,7
1 600	77,4
2 000	80,7
2 500	83,9
3 150	84,6
4 000	85,5
5 000	82,7
6 300	82,6

Výsledná hladina akustického výkonu vážená filtrem A pro měření 2 s odrazivou spodní a levou stranou vyšla **92,2 dB**.

7.7 MĚŘENÍ 3

Pro třetí měření byly použity tři odrazivé strany a tři strany měřicí. Na zadní stranu byla přidána další tabule, takže odrazivé strany byly spodní, levá a zadní. Přidáním další odrazivé strany došlo ke snížení počtu měřicích míst, takže tohle měření proběhlo pouze se dvanácti měřicími body.

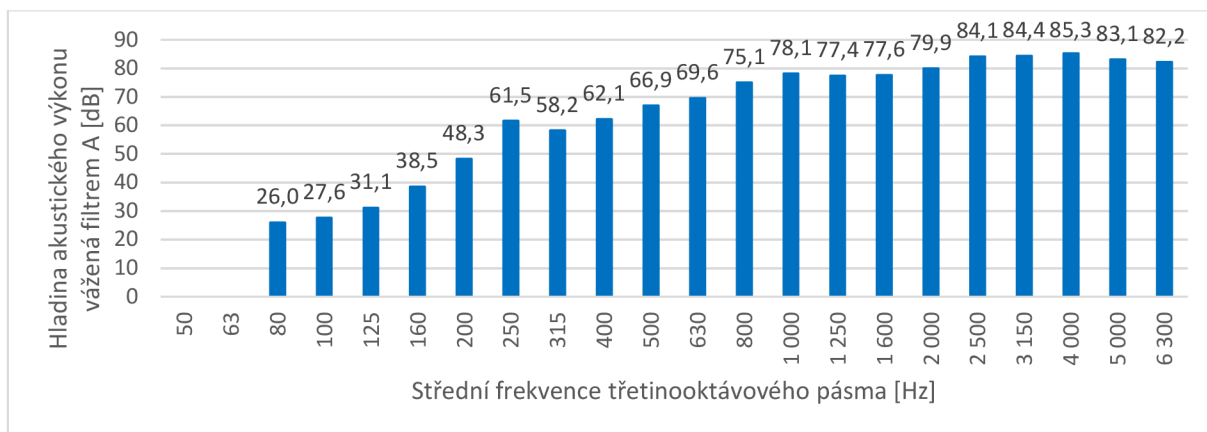


Obr. 24 Měření 3 s odrazivou spodní, levou a zadní stranou

Další postup zůstal stejný jako u dvou předchozích měření, pouze s tím rozdílem, že tohle měření bylo provedeno třikrát po sobě. Díky tomu je možné porovnat variabilitu měření při stejné konfiguraci a naprosto stejných podmínkách. Každé měření začalo měřením v bodě uprostřed horní plochy pro výpočet indikátoru F_1 . Potom následovalo měření postupně ve všech bodech, vždy ve stejném pořadí, nejprve na horní straně, potom na pravé straně a nakonec na přední straně. Ze všech měření byly opět vypočteny indikátory F_2 až F_4 , jejichž hodnoty jsou uvedeny v příloze. V následujících podkapitolách jsou jednotlivá měření podrobněji rozebrána.

7.7.1 MĚŘENÍ 3_1

V následujícím grafu jsou vyneseny hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma. V některých pásmech vyšly záporné hodnoty součtu dílčího akustického výkonu, takže v těchto pásmech nemohla být vypočítána výsledná hodnota hladiny akustického výkonu.



Obr. 25 Hladiny akustického výkonu vážené funkci A pro jednotlivá frekvenční pásma

Výsledky kritérií 1 a 2 pro měření 3_1 jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 23 Kritéria 1 a 2 pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	kritérium 1	kritérium 2
50	✓	X
63	X	X
80	✓	X
100	✓	✓
125	✓	✓
160	✓	✓
200	✓	X
250	✓	X
315	✓	X
400	✓	✓
500	✓	X
630	✓	✓
800	✓	X
1 000	✓	X
1 250	✓	✓
1 600	✓	✓
2 000	✓	✓
2 500	✓	✓
3 150	✓	✓
4 000	✓	✓
5 000	✓	✓
6 300	✓	✓

Nejvyšší hladina vážená funkcí A má hodnotu 85,3 dB a hladina součtu akustických výkonů vážených funkcí A, nesplňujících kritérium 2, je 80,2 dB. Tyto hladiny se tedy za nevýznamné považovat nedají. Je to způsobeno tím, že kritérium 2 není splněno ve frekvenčních pásmech o středních frekvencích 800 a 1 000 Hz. Pokud tedy tato pásma zůstanou zanedbána, hladina součtu akustických výkonů vážených funkcí A ve zbylých zanedbatelných pásmech vyjde 68,5 dB. Níže je tabulka se všemi hladinami akustického výkonu, váženými funkcí A včetně těch, která byla zanedbána. Tato pásma jsou v tabulce vyznačena červeně.

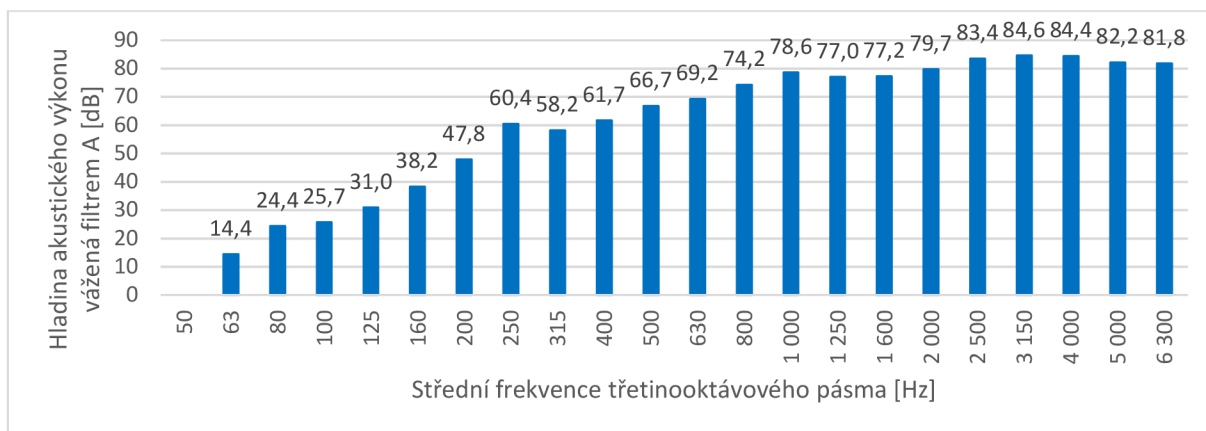
Tab. 24 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB]
50	-
63	-
80	26,0
100	27,6
125	31,1
160	38,5
200	48,3
250	61,5
315	58,2
400	62,1
500	66,9
630	69,6
800	75,1
1 000	78,1
1 250	77,4
1 600	77,6
2 000	79,9
2 500	84,1
3 150	84,4
4 000	85,3
5 000	83,1
6 300	82,2

Výsledná hladina akustického výkonu vážená filtrem A pro měření 3_1 s odrazivou spodní, levou a zadní stranou vyšla **91,9 dB**.

7.7.2 MĚŘENÍ 3_2

Graf s hladinami akustického výkonu váženými filtrem A pro jednotlivá frekvenční pásma:



Obr. 26 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Tab. 25 Kritéria 1 a 2 pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	kritérium 1	kritérium 2
50	X	X
63	X	X
80	X	X
100	✓	X
125	✓	X
160	✓	X
200	✓	X
250	✓	X
315	✓	X
400	✓	✓
500	✓	✓
630	✓	✓
800	✓	✓
1 000	✓	X
1 250	✓	✓
1 600	✓	✓
2 000	✓	✓
2 500	✓	✓
3 150	✓	✓
4 000	✓	✓
5 000	✓	✓
6 300	✓	✓

V pásmu o střední frekvenci 50 Hz opět vyšel součet dílčích akustických výkonů záporný, jak je vidět na obrázku 26.

Hladiny, které nesplňují kritérium 2 je možné zanedbat, pokud jejich součet je o 10 dB nebo více nižší, než nejvyšší hladina vážená funkcí A. V tomto případě má nejvyšší hladina vážená funkcí A hodnotu 84,6 dB a součet hladin, nesplňujících kritérium 2, je 78,7 dB. Tyto hladiny se tedy zanedbat nedají. Je to opět způsobeno tím, že kritérium 2 není splněno ve frekvenčním pásmu o střední frekvenci 1 000 Hz. Když tohle pásmo zůstane zanedbáno, tak součet ostatních hladin, nesplňujících kritérium 2, bude 62,6 dB, takže tato pásma se dají považovat za nevýznamná. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty akustických hladin vážených funkcí A pro všechna frekvenční pásma. Pásma, která byla zanedbána jsou vyznačena červeně:

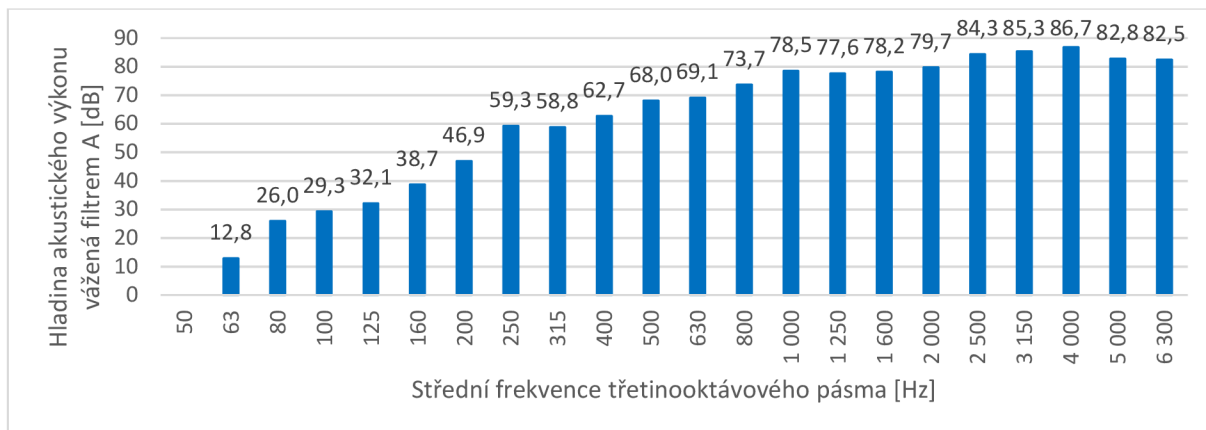
Tab. 26 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB]
50	-
63	14,4
80	24,4
100	25,7
125	31,0
160	38,2
200	47,8
250	60,4
315	58,2
400	61,7
500	66,7
630	69,2
800	74,2
1 000	78,6
1 250	77,0
1 600	77,2
2 000	79,7
2 500	83,4
3 150	84,6
4 000	84,4
5 000	82,2
6 300	81,8

Výsledná hladina akustického výkonu vážená filtrem A pro měření 3_2 s odrazivou spodní, levou a zadní stranou vyšla **91,5 dB**.

7.7.3 MĚŘENÍ 3_3

I při třetím měření vyšel součet dílčích akustických výkonů pro frekvenční pásmo 50 Hz záporný, jak je vidět v následujícím grafu:



Obr. 27 Hladiny akustického výkonu vážené funkci A pro jednotlivá frekvenční pásma

Tab. 27 Kritéria 1 a 2 pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	kritérium 1	kritérium 2
50	✓	X
63	✓	✓
80	X	X
100	✓	X
125	✓	X
160	✓	X
200	✓	✓
250	✓	X
315	✓	X
400	✓	✓
500	✓	✓
630	✓	✓
800	✓	✓
1 000	✓	✓
1 250	✓	✓
1 600	✓	✓
2 000	✓	✓
2 500	✓	✓
3 150	✓	✓
4 000	✓	X
5 000	✓	✓
6 300	✓	✓

Při tomto měření nevyšlo kritérium 2 ve frekvenčním pásmu 4000 Hz, což je nečekaný výsledek.

Opět není možné zanedbat všechny hladiny, ve kterých kritérium 2 nevyšlo. Nejvyšší hladina akustického výkonu, vážená filtrem A, má hodnotu 86,7 dB. Shodou okolností je to právě ve frekvenčním pásmu se střední frekvencí 4 000 Hz. Součet hladin, nesplňujících kritérium 2, je 86,8 dB, což je dokonce o 0,1 dB více, než je nejvyšší hladina. Pokud ovšem frekvenční pásmo 4 000 Hz zůstane zanedbáno, součet ostatních hladin bude 62,1 dB, což už je o 10 a více dB méně, než je nejvyšší hladina. Hodnoty hladiny akustického výkonu vážené filtrem A pro všechna frekvenční pásma jsou uvedeny v následující tabulce. Zanedbaná frekvenční pásma jsou vyznačena červeně:

Tab. 28 Hladiny akustického výkonu vážené funkci A pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB]
50	-
63	12,8
80	26,0
100	29,3
125	32,1
160	38,7
200	46,9
250	59,3
315	58,8
400	62,7
500	68,0
630	69,1
800	73,7
1 000	78,5
1 250	77,6
1 600	78,2
2 000	79,7
2 500	84,3
3 150	85,3
4 000	86,7
5 000	82,8
6 300	82,5

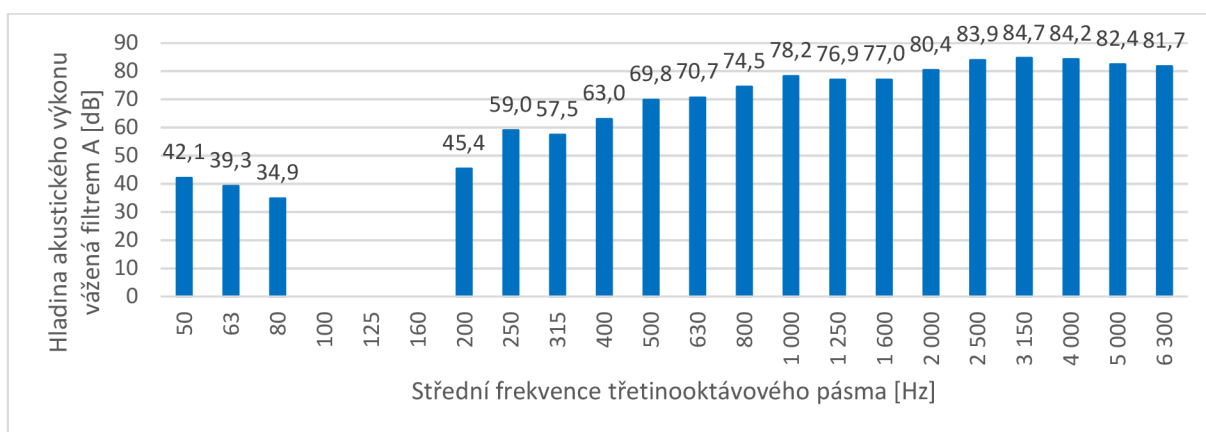
Výsledná hladina akustického výkonu vážená filtrem A pro měření 3_3 s odrazivou spodní, levou a zadní stranou vyšla **92,5 dB**.

7.8 MĚŘENÍ 4

Čtvrté a poslední měření bylo provedeno se stejnou konfigurací odrazivých a měřicích ploch jako měření třetí. To znamená, že odrazivá byla spodní, levá a zadní strana. Ostatní strany byly měřicí, ale s tím rozdílem, že tentokrát bylo na každé straně šestnáct měřicích míst místo původních čtyř. Velikost jednoho segmentu se z původních $0,25 \text{ m}^2$ zmenšila na $0,0625 \text{ m}^2$. Díky tomu by sice měla být zaručena vyšší přesnost měření, ale měření s tolika body trvalo podstatně déle.

V grafu níže jsou uvedeny výsledné hladiny akustického výkonu vážené funkcí A v jednotlivých frekvenčních pásmech. Ve frekvenčních pásmech se střední frekvencí 100, 125 a 160 Hz nejsou žádné výsledky, jelikož v těchto pásmech vyšel součet dílčích akustických výkonů záporně. Pozoruhodné jsou ovšem spíše výsledky ve frekvenčních pásmech se střední frekvencí 50, 63 a 80 Hz. Hodnoty v těchto frekvenčních pásmech jsou podstatně vyšší než u předchozích měření. Ve většině měření sice právě v těchto pásmech výsledná hodnota chybí, ale při porovnání s měřením 1 se tyto hodnoty liší v každém pásmu o více jak 20 dB. To může být způsobeno tím, že při navýšení počtu měřicích bodů, se nějaké body nacházejí blíže k měřenému zdroji hluku než při předchozích měřeních.

Ve vyšších frekvenčních pásmech už hladina akustického výkonu vážená filtrem A dosahuje obvyklých hodnot.



Obr. 28 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Vyšší počet měřicích míst měl vliv také na výsledky kritéria 2, které nevyšlo pouze v sedmi frekvenčních pásmech, a to pouze v nízkých pásmech, která se většinou dají zanedbat. Výsledky obou kritérií jsou uvedeny v následující tabulce:

Tab. 29 Kritéria 1 a 2 pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásma [Hz]	kritérium 1	kritérium 2
50	X	X
63	X	X
80	X	X
100	X	X
125	✓	X
160	✓	X
200	✓	✓
250	X	X
315	✓	✓
400	✓	✓
500	✓	✓
630	✓	✓
800	✓	✓
1 000	✓	✓
1 250	✓	✓
1 600	✓	✓
2 000	✓	✓
2 500	✓	✓
3 150	✓	✓
4 000	✓	✓
5 000	✓	✓
6 300	✓	✓

Frekvenční pásma, ve kterých nevyšlo kritérium 2, mohou být všechna zanedbána. Součet těchto pásem je 59,2 dB a nejvyšší hladina akustického výkonu vážená funkcí A je 84,7 dB. Hodnoty hladin akustického výkonu vážené funkcí A pro všechna frekvenční pásma jsou uvedena v následující tabulce. Frekvenční pásma, která byla zanedbána, jsou vyznačena červeně:

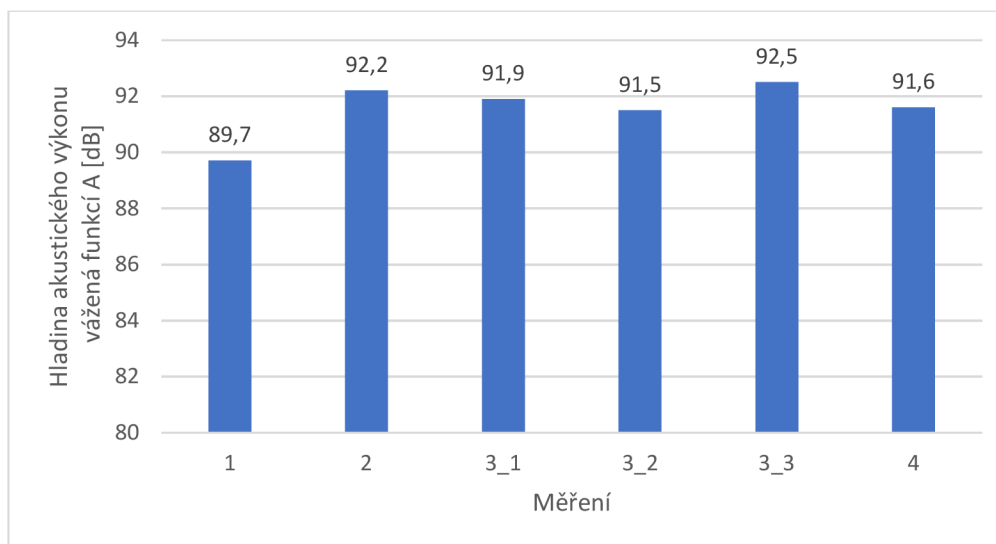
Tab. 30 Hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá frekvenční pásma

Frekvenční pásmo [Hz]	Hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB]
50	42,1
63	39,3
80	34,9
100	-
125	-
160	-
200	45,4
250	59,0
315	57,5
400	63,0
500	69,8
630	70,7
800	74,5
1 000	78,2
1 250	76,9
1 600	77,0
2 000	80,4
2 500	83,9
3 150	84,7
4 000	84,2
5 000	82,4
6 300	81,7

Výsledná hladina akustického výkonu vážená filtrem A pro měření 4 se šestnácti body na stranu s odrazivou spodní, levou a zadní stranou vyšla **91,6 dB**.

7.9 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Bylo provedeno celkem 6 měření se třemi konfiguracemi měřících a plně odrazivých ploch. Na základě naměřených hodnot hladin akustické intenzity byly vypočteny výsledné hladiny akustického výkonu vážené funkcí A. Tyto hodnoty jsou pro jednotlivá měření vyneseny v grafu níže. Nejvyšší naměřená hodnota hladiny akustického výkonu vážená filtrem A vyšla 92,5 dB. To je o 3,5 dB méně, než udává výrobce. Tento výsledek lze nejspíš zdůvodnit tím, že při měření nebyl na křovinořezu namontován žací nástroj, který také způsobuje nezanedbatelný hluk.

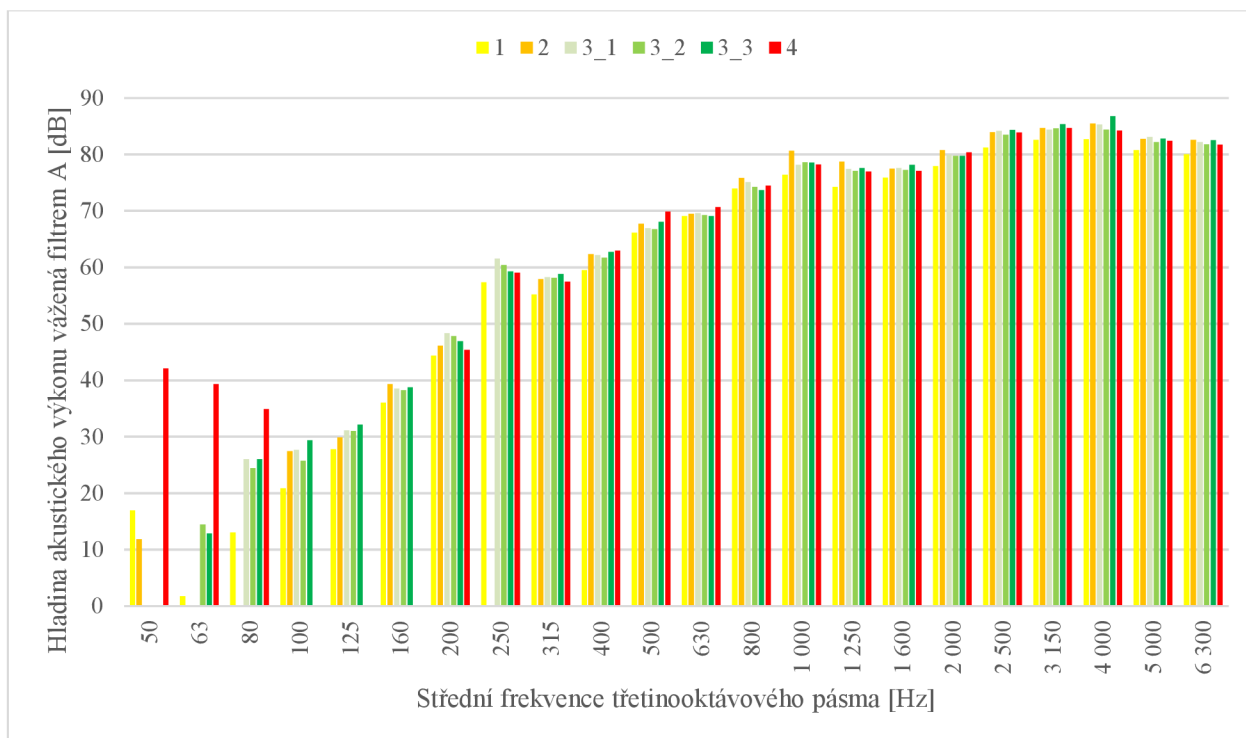


Obr. 29 Výsledné hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro jednotlivá měření

Z těchto výsledků se dá usoudit, že celé měření bylo poměrně přesné, protože variabilita výsledků je velmi nízká. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hladinou akustického výkonu váženou funkcí A je pouze 2,8 dB. O přesnosti měření ale ještě lépe vypovídají výsledky ze třetí série měření, kdy byla použita naprosto stejná konfigurace pro všechna tři měření. Zde je rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hladinou akustického výkonu váženou funkcí A pouze 1 dB.

Dále se dá vyvodit závěr, že s jednou odrazivou stranou vyjde výsledná hladina akustického výkonu vážená funkcí A nižší než s více odrazivými stranami. Neplatí zde však, že čím víc odrazivých ploch, tím vyšší hladina akustického výkonu.

V následujícím grafu je vidět, jak vycházely hladiny akustického výkonu vážené funkcí A ve frekvenčních pásmech pro jednotlivá měření. Jediné výsledky, které se od ostatních zřetelně liší, jsou hodnoty v nízkých frekvenčních pásmech pro čtvrté měření.

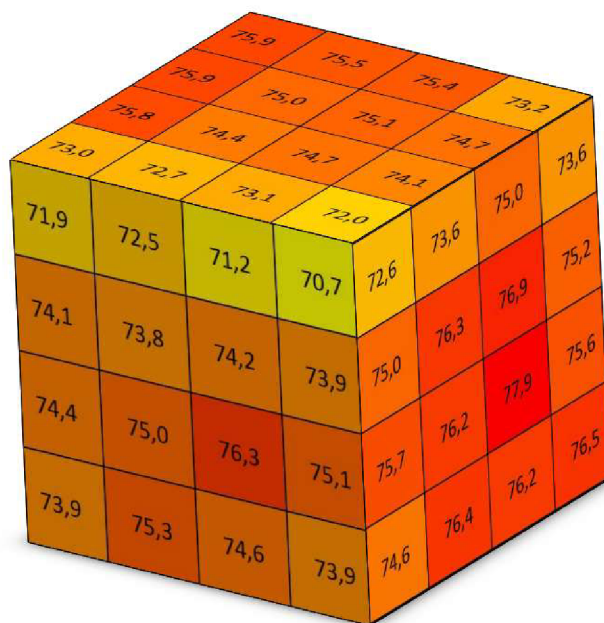


Obr. 30 Výsledné hladiny akustického výkonu vážené funkcí A pro všechna měření

Kritéria 1 a 2 vycházela, až na některé výjimky, podle očekávání. Kritérium 1, což je kritérium vhodnosti měřicího zařízení, nebylo splněno při měřeních 1–3 pouze ve velmi nízkých pásmech – do 100 Hz. Pouze při čtvrtém měření tohle kritérium nevyšlo i v pásmu 250 Hz, což je ale stále nízké pásmo. Pásma, ve kterých kritérium 1 nebylo splněno, byla ale stejně pokaždé zanedbána, protože v těchto pásmech nebylo splněno ani kritérium 2.

Kritérium 2, což je kritérium přiměřenosti výběru počtu měřicích míst, při vysokém počtu měřicích míst nevycházelo pouze v nízkých pásmech. Nejvyšší pásmo, ve kterém toto kritérium nevyšlo, bylo při měření 1 s celkem dvaceti měřicími místy, pásmo se střední frekvencí 400 Hz. Při druhém měření, když počet měřicích míst klesl na 16, nevyšlo kritérium 2 ve všech frekvenčních pásmech do 250 Hz, což se dalo očekávat, ale nevyšlo také ve frekvenčním pásmu 1 000 Hz. Kdyby bylo účelem provést korektní měření, bylo by potřeba zvýšit počet měřicích míst a provést měření znovu. To však není předmětem tohoto experimentu. V tomto případě toto pásmo zanedbáno nebylo a bylo zahrnuto do výpočtu celkové hladiny akustického výkonu vážené funkcí A. Při sérii měření 3 se třemi odrazivými plochami a dvanácti měřicími body vycházelo kritérium 2 podle očekávání ještě hůř. Výsledky kritérií jsou k vidění v tabulkách Tab. 23, Tab. 25 a Tab. 27. Pokud se budeme zajímat zejména o vyšší pásma, která nemohou být zanedbána, tak při měření 3_1 nebylo splněno kritérium 2 v pásmech o střední frekvenci 800 a 1 000 Hz. Při měření 3_2 to bylo pouze pásmo 1 000 Hz, ale při měření 3_3 vyšel nečekaný výsledek. Kritérium 2 nebylo splněno v pásmu se střední frekvencí 4 000 Hz, což je pásmo velmi významné a rozhodně nezanedbatelné. Při čtvrtém měření, kdy byl zachován stejný počet odrazivých stran jako při předchozím měření, už žádné nečekané výsledky nevyšly. Nejvyšší pásmo, ve kterém kritérium 2 nebylo splněno (stejně jako kritérium 1), bylo pásmo o střední frekvenci 250 Hz, takže tato pásma mohla být bez problému zanedbána.

Jak již bylo řečeno v úvodu měření, tak pro poslední konfiguraci se třemi odrazivými stranami, třemi měřicími stranami a šestnácti body na jednu měřicí stranu, byla vypracována akustická mapa, která je znázorněna na následujícím obrázku:



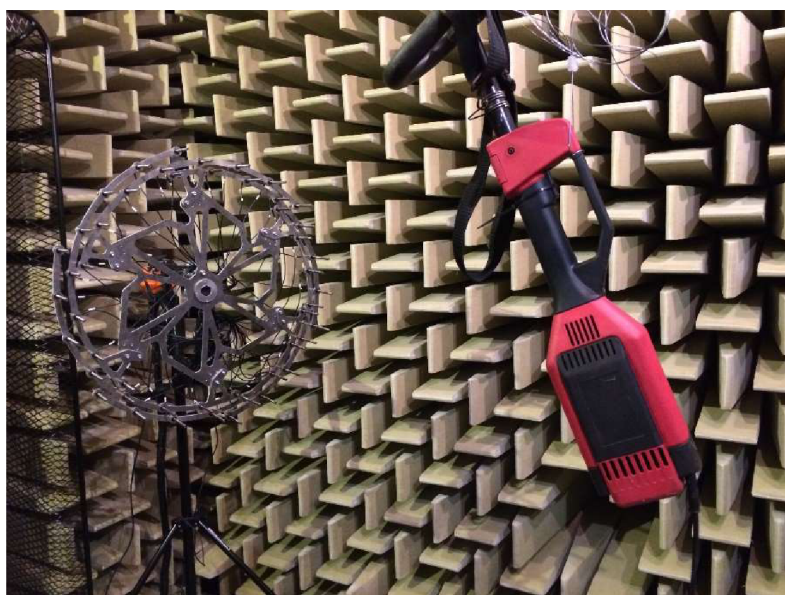
Obr. 31 Akustická mapa

Hodnoty, uvedené v obrázku, jsou již zvážené hodnoty hladiny akustického výkonu v decibelech pro jednotlivé měřicí body. Jak je na této akustické mapě vidět, tak v rohu, který je nejdál od všech odrazivých ploch, je hladina akustického výkonu vážená funkcí A nejnižší. Naopak v rozích, kde se setkávají dvě odrazivé plochy, jsou hodnoty hladiny akustického výkonu oproti zbytku měřicí plochy vyšší.

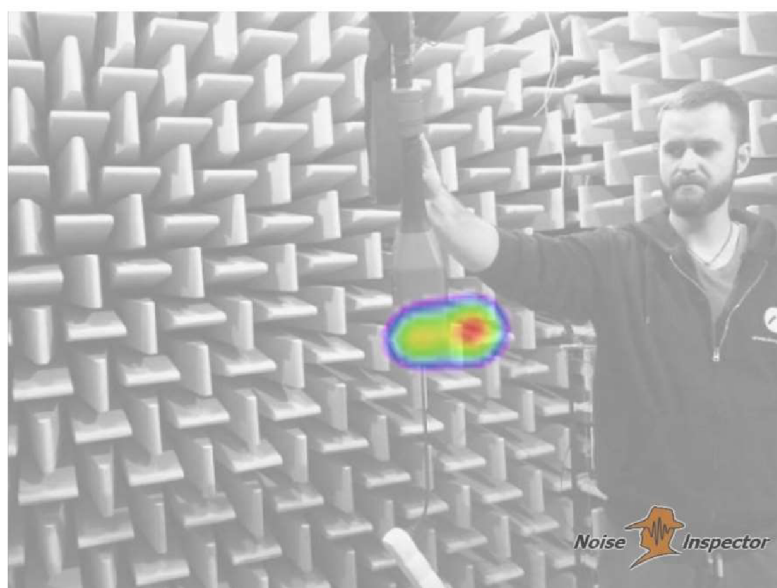
Jak je na akustické mapě vidět, tak oblast s nejvyšší hladinou akustického výkonu je uprostřed pravé měřicí plochy, kde hladina akustického výkonu vážená funkcí A dosahuje hodnoty 77,9 dB. Při pomyslném propojení právě hodnoty 77,9 dB z pravé strany a hodnoty 76,3 dB ze přední strany můžeme lokalizovat přesné místo zdroje nejvyššího hluku.

Pro ověření této teorie bylo nakonec provedeno měření pomocí akustické kamery, díky které je možné zdroj hluku velmi přesně lokalizovat.

Podle fotografie pořízené akustickou kamerou, vychází největší množství hluku „výdechy“ na stranách motoru. Tím se vysvětlují údaje z akustické mapy. Elektrický křovinořez, který byl při měření zavěšen na ocelových lankách, byl totiž natočen tak, že mřížkování v motorové části směřovalo právě na pravou stranu.



Obr. 32 Lokalizace zdroje hluku pomocí akustické kamery



Obr. 33 Fotografie z akustické kamery

Měření 1 až 3 nekladla díky relativně nízkému počtu měřicích bodů velké nároky na čas strávený měřením. Nejvíce času zabrala příprava prvního měření a obecně seznámení se s měřicími postupy. Při čtvrtém měření byl však hodně navýšen počet měřicích bodů, takže čas strávený tímto měřením byl o dost delší než u předchozích měření. V praxi je vždy lepší mít více měřicích bodů než méně, aby bylo vyhověno druhému kritériu a nemuselo se měření případně provádět znovu.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provedení experimentu, který spočívá v několika měřeních hladiny akustického výkonu předem definovaného zdroje s různým uspořádáním měřících a plně odrazivých ploch, a následného vyhodnocení jednotlivých variant. Měření bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 9614-1, kdy se výsledná hladina akustického výkonu stanovuje z měření akustické intenzity v bodech rovnoměrně rozmístěných na měřicí ploše.

V první části se práce věnuje popisu zvuku a hluku a rozdílu mezi těmito dvěma pojmy. Na tohle téma navazuje kapitola, která se zabývá vlivem hluku na člověka. Následuje popis nejdůležitějších veličin, použitých dále při výpočtech hladiny akustického výkonu. Pozornost je věnována zejména akustickému tlaku, intenzitě a výkonu. Je také vysvětlen pojem hladina akustické veličiny.

Po vysvětlení nejdůležitějších pojmů následuje rešerše mezinárodních norem, které se zabývají určováním hladiny akustického výkonu. Tyto normy se liší zejména měřicím prostředím, které musí být použito, rozměry, omezujícími velikost měřeného zdroje hluku nebo třídou přesnosti, které lze daným způsobem měření dosáhnout. Následně je důležitá část této práce věnována popisu postupu měření, měřicího vybavení a výpočtů dle již zmíněné normy. Na základě tohoto postupu byl vytvořen excelový soubor, který slouží pro analýzu naměřených dat a také pro výpočet výsledné hladiny akustického výkonu vážené funkcí A.

Hlavní část práce se věnuje samotnému experimentu. Byla navržena měřicí plocha ve tvaru krychle a byly stanoveny následující konfigurace měřících a plně odrazivých ploch: spodní strana odrazivá, spodní a levá strana odrazivá a spodní, levá a zadní strana odrazivá. Dle normy byl stanoven také počet měřících míst na plochu. Pro danou velikost měřicí plochy byly použity 4 měřicí body na jednu stranu měřicí plochy. Po provedení měření byla data vyhodnocena. Hodnotícím prvkem byla výsledná hladina akustického výkonu vážená funkcí A a dále výsledky kritérií 1 a 2, na základě kterých se posuzuje, zda je měření provedeno správně nebo se musí po určitých úpravách provést znovu.

Při měření 1 s plně odrazivou spodní stranou a celkem dvaceti měřícími místy vyšla hladina akustického výkonu vážená funkcí A 89,7 dB. To je poměrně nízký výsledek vzhledem k tomu, že hladina akustického výkonu vážená funkcí A stanovená výrobcem zdroje hluku, čímž byl elektromotor z elektrického křovinořezu, je 96 dB. Výsledky kritérií 1 a 2 vyšly víceméně podle očekávání. Nejvyšší frekvenční pásmo, ve kterém nebylo splněno kritérium 2, je pásmo se střední frekvencí 400 Hz, takže toto i všechna nižší pásma nesplňující kritérium 2 mohla být zanedbána.

Pro měření 2 byla přidána druhá odrazivá plocha na levou stranu pomyslné krychle. S odebráním měřicí plochy klesl počet měřících bodů na 16. Nejspíš kvůli tomu ve třech frekvenčních pásmech vyšel záporný součet dílčích akustických výkonů, takže v těchto pásmech nebylo možné vypočítat výslednou hladinu akustického výkonu. Kritéria 1 a 2 již také vyšla o něco hůř než při prvním měření. Kritérium 2 nebylo splněno ve frekvenčním pásmu 1 000 Hz a ve všech pásmech pod 250 Hz. Při ověření, zda mohou být všechna tato pásma zanedbána, vyšlo, že nemohou. Byla tedy zanedbána pouze pásma do 250 Hz a výsledná hladina akustického výkonu vážená funkcí A vyšla 92,2 dB.

Třetí měření bylo provedeno se třemi odrazivými stranami, a aby bylo možné porovnat variabilitu měření při stejných podmínkách, bylo tohle měření provedeno třikrát. Výsledky dokazují, že měření je poměrně přesné, jelikož nejnižší a nejvyšší hladina akustického výkonu vážená filtrem A se od sebe liší o pouhý 1 dB. Konkrétně měření 3_2 vyšlo 91,5 dB a měření 3_3 vyšlo 92,5 dB. Překvapivě však vyšlo kritérium 2 při měření 3_3, které nebylo splněno ve frekvenčním pásmu 4 000 Hz. Nejvyšší frekvenční pásmo, ve kterém kritérium 2 nevyšlo u zbylých dvou měřeních, bylo frekvenční pásmo 1 000 Hz.

Pro poslední konfiguraci měřících a plně odrazivých ploch bylo provedeno ještě druhé měření, přičemž byl počet měřících bodů na stranu zvýšen na 16. Díky vysokému počtu měřících bodů vyšlo dobře kritérium 2. Nejvyšší frekvenční pásmo, ve kterém nebylo splněno, bylo 250 Hz. Překvapivé výsledky hladiny akustického výkonu však byly zaznamenány v nízkých pásmech. V těchto pásmech vyšla hladina akustického výkonu vážená filtrem A přibližně o 20 dB vyšší než při ostatních měřeních. Díky navýšení počtu měřících bodů mohla také být vytvořena akustická mapa, znázorňující rozložení akustické energie na měřící ploše. Na základě těchto údajů lze vyvodit závěr, že nejvyšší hladina akustického výkonu byla naměřena v blízkosti odrazivých ploch, naopak oblast s nejnižší hladinou akustického výkonu je v rohu nejdál od odrazivých ploch. Výsledná hladina akustického výkonu pro čtvrté měření vyšla 91,6 dB.

Při všech měřeních vyšla výsledná hladina akustického výkonu vážená filtrem A nižší, než jakou předepisuje výrobce. Je to však nejspíš kvůli tomu, že při experimentu nebyl na křovinořezu namontován žací nástroj, který se také podílí na celkovém hluku zařízení. Z logiky měření lze usoudit, že čím víc bude měřících bodů a čím méně bude odrazivých ploch, tím přesnějších výsledků bude možné dosáhnout. Je to ovšem na úkor času, jelikož každé přenastavení sondy do jiného měřícího bodu zabere nějaký čas a potom následuje měření, které v závislosti na nastavení délky průměrování trvá 8 až 12 s.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] SMETANA, Ctírad. *Hluk a vibrace, měření a hodnocení*. Sdělovací technika, První vydání, Praha, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [2] BERAN, Vlastimil. *Chvění a hluk*. Západočeská univerzita v Plzni, První vydání, Plzeň, 2010. ISBN 978-80-7043-916-0.
- [3] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. České vysoké učení technické v Praze, Třetí vydání, Praha, 2009. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [4] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. Vyd. 2., V Akademickém nakl. CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
- [5] 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.
- [6] *homen.vsb.cz* [online]. [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [7] NOVOTNÝ, Pavel. VUT. *Základy problematiky hluku: Vibrace a hluk vozidel, QDZ přednášky*. Brno, 2014. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/lide/pavel-novotny-15379/publikace>.
- [8] Electronic music. *elektronicka-hudba.telotone.cz/* [online]. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/o-zvuku>
- [9] JACOBSEN, Finn. *State of the Art of Sound Intensity and Its Measurement and Applications* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://www.icacommission.org/Proceedings/ICA2001Rome/4_10.pdf
- [10] Mikrofony. *fyzika.jreichl.com* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/377-mikrofony>
- [11] Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma. *ufmi.ft.utb.cz* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
- [12] ČSN EN ISO 3740. *Akustika – Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku – Směrnice pro užití základních norem*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [13] Type 4297 – Brüel & Kjær Sound and Vibration. *bksv.com* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/calibrators/4297>
- [14] *bksv.com* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/bu0228.pdf>
- [15] The effects of Noise Pollution to Your Health. *articles.mercola.com* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://articles.mercola.com/sites/articles/archive/2015/06/20/noise-pollution.aspx>

- [16] Hlukové limity, měření hluku a hlukové studie. *atelier-dek.cz* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://atelier-dek.cz/hlukove-limity-mereni-hluku-hlukove-studie-194>
- [17] 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: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [18] ČSN EN ISO 3743-1. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Technické metody pro malé a přemístitelné zdroje v dozvukovém poli – Část 1: Srovnávací metoda pro zkušební místnosti s tuhými stěnami*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [19] 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: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [20] ČSN EN ISO 3744. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Technická metoda pro přibližně volné pole nad odrazivou rovinou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [21] 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: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [22] ČSN EN ISO 3746. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Provozní metoda s měřicí obalovou plochou nad odrazivou rovinou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [23] ČSN EN ISO 3747. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Technické/provozní metody pro použití in situ v dozvukovém prostředí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c	[m·s ⁻¹]	rychlost šíření zvuku
C	[F]	kapacita
c_L	[m·s ⁻¹]	rychlost šíření akustických vln pro vlnění podélné
d	[m]	vzdálenost elektrod
f	[Hz]	frekvence
F_1	[-]	indikátor variability zvukového pole
F_2	[-]	indikátor akustický tlak-intenzita
F_3	[-]	indikátor záporného dílčího akustického výkonu
F_4	[-]	indikátor nerovnoměrnosti zvukového pole
I	[W·m ⁻²]	akustická intenzita
I_0	[W·m ⁻²]	referenční hodnota akustické intenzity
I_n	[W·m ⁻²]	normálová složka akustické intenzity
\bar{I}_n	[W·m ⁻²]	střední hodnota normálové složky akustické intenzity
K	[Pa]	modul objemové pružnosti
K	[dB]	korekce na zbytkovou intenzitu
K_A	[dB]	korekce váhového filtru A
L_d	[dB]	index dynamické schopnosti
L_I	[dB]	hladina akustické intenzity
\bar{L}_{In}	[dB]	střední hladina akustické intenzity
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
P	[W]	akustický výkon
p	[Pa]	tlak
P	[W]	akustický výkon
$p(t)$	[-]	okamžitý akustický tlak
p_0	[Pa]	referenční hodnota akustického tlaku
P_0	[W]	referenční hodnota akustického výkonu
p_a	[Pa]	amplituda akustického tlaku

p_b	[Pa]	barometrický tlak
p_c	[Pa]	akustický tlak
p_{ef}	[Pa]	efektivní hodnota akustického tlaku
P_i	[W]	dílčí akustický výkon
Q	[C]	náboj
S	[m ²]	obsah plochy
T	[s]	perioda
t	[°C]	teplota
U	[V]	napětí
v	[m·s ⁻¹]	rychlost
$v(t)$	[-]	okamžitá rychlost
v_p	[m·s ⁻¹]	rychlost kmitání částic
δ_{pl_0}	[dB]	index zbytkové intenzity
ε_0	[Fm ⁻¹]	permitivita vakua
ε_r	[-]	relativní permitivita
λ	[m]	vlnová délka
μ	[-]	Poissonova konstanta
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota prostředí

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výsledky měření 1	P1
Příloha 2 – Výsledky měření 2	P7
Příloha 3 – Výsledky měření 3_1	P12
Příloha 4 – Výsledky měření 3_2	P16
Příloha 5 – Výsledky měření 3_3	P20
Příloha 6 – Výsledky měření 4	P24

Frekvenční pásmo [Hz]	F_1	$F_1 \leq 0,6$
50	0,96	X
63	0,58	✓
80	0,33	✓
100	0,25	✓
125	0,52	✓
160	0,20	✓
200	0,03	✓
250	0,08	✓
315	0,04	✓
400	0,05	✓
500	0,08	✓
630	0,03	✓
800	0,05	✓
1 000	0,12	✓
1 250	0,06	✓
1 600	0,08	✓
2 000	0,01	✓
2 500	0,02	✓
3 150	0,07	✓
4 000	0,06	✓
5 000	0,01	✓
6 300	0,04	✓

HORNÍ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-6,82	✓	✓	✓	✓	-6,82	0,00	✓	0,92	6,75	X	
63	2,33	✓	✓	✓	✓	10,72	8,39	X	0,60	2,88	✓	
80	2,07	✓	✓	✓	✓	3,21	1,13	✓	0,66	3,49	✓	
100	4,26	✓	✓	X	✓	4,26	0,00	✓	0,74	4,35	X	
125	4,83	✓	✓	✓	✓	4,83	0,00	✓	0,42	1,40	✓	
160	2,84	✓	✓	✓	✓	2,84	0,00	✓	0,22	0,40	✓	
200	1,68	✓	✓	✓	✓	1,68	0,00	✓	0,40	1,25	✓	
250	1,65	✓	✓	✓	✓	1,65	0,00	✓	0,96	7,30	X	
315	0,92	✓	✓	✓	✓	0,92	0,00	✓	0,22	0,38	✓	
400	1,66	✓	✓	✓	✓	1,66	0,00	✓	0,17	0,22	✓	
500	1,38	✓	✓	✓	✓	1,38	0,00	✓	0,67	3,60	✓	
630	1,58	✓	✓	✓	✓	1,58	0,00	✓	0,20	0,33	✓	
800	1,51	✓	✓	✓	✓	1,51	0,00	✓	0,31	0,76	✓	
1 000	1,29	✓	✓	✓	✓	1,29	0,00	✓	0,26	0,56	✓	
1 250	1,64	✓	✓	✓	✓	1,64	0,00	✓	0,16	0,21	✓	
1 600	1,81	✓	✓	✓	✓	1,81	0,00	✓	0,07	0,04	✓	
2 000	1,65	✓	✓	✓	✓	1,65	0,00	✓	0,11	0,09	✓	
2 500	1,36	✓	✓	✓	✓	1,36	0,00	✓	0,21	0,36	✓	
3 150	1,14	✓	✓	✓	✓	1,14	0,00	✓	0,23	0,42	✓	
4 000	0,80	✓	✓	✓	✓	0,80	0,00	✓	0,63	3,21	✓	
5 000	1,32	✓	✓	✓	✓	1,32	0,00	✓	0,37	1,09	✓	
6 300	1,78	✓	✓	✓	✓	1,78	0,00	✓	0,29	0,66	✓	

PŘEDNÍ STRANA											
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²
50	-4,48	✓	✓	✓	✓	-3,57	0,91	✓	0,91	6,61	X
63	1,48	✓	✓	✓	✓	2,27	0,79	✓	1,14	10,34	X
80	1,95	✓	✓	✓	✓	1,95	0,00	✓	0,74	4,33	X
100	4,07	✓	✓	✓	✓	4,07	0,00	✓	0,26	0,54	✓
125	1,52	✓	✓	✓	✓	1,52	0,00	✓	0,69	3,76	✓
160	2,33	✓	✓	✓	✓	2,33	0,00	✓	0,92	6,77	X
200	2,57	✓	✓	✓	✓	2,57	0,00	✓	0,38	1,14	✓
250	2,30	✓	✓	✓	✓	2,30	0,00	✓	0,28	0,64	✓
315	2,23	✓	✓	✓	✓	2,23	0,00	✓	0,46	1,70	✓
400	2,10	✓	✓	✓	✓	2,10	0,00	✓	0,44	1,54	✓
500	1,71	✓	✓	✓	✓	1,71	0,00	✓	0,64	3,26	✓
630	2,13	✓	✓	✓	✓	2,13	0,00	✓	0,27	0,60	✓
800	1,55	✓	✓	✓	✓	1,55	0,00	✓	0,42	1,41	✓
1 000	1,63	✓	✓	✓	✓	1,63	0,00	✓	0,29	0,69	✓
1 250	1,65	✓	✓	✓	✓	1,65	0,00	✓	0,49	1,94	✓
1 600	1,66	✓	✓	✓	✓	1,66	0,00	✓	0,25	0,50	✓
2 000	1,61	✓	✓	✓	✓	1,61	0,00	✓	0,16	0,21	✓
2 500	1,73	✓	✓	✓	✓	1,73	0,00	✓	0,18	0,25	✓
3 150	1,57	✓	✓	✓	✓	1,57	0,00	✓	0,27	0,57	✓
4 000	1,57	✓	✓	✓	✓	1,57	0,00	✓	0,37	1,11	✓
5 000	1,14	✓	✓	✓	✓	1,14	0,00	✓	0,30	0,73	✓
6 300	1,33	✓	✓	✓	✓	1,33	0,00	✓	0,20	0,32	✓

ZADNÍ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-3,43	X	✓	✓	✓	-3,38	0,05	✓	0,80	5,07	X	
63	-0,62	✓	✓	✓	✓	-0,62	0,00	✓	0,38	1,18	✓	
80	2,17	✓	✓	✓	✓	2,17	0,00	✓	0,64	3,32	✓	
100	5,90	✓	✓	✓	X	5,90	0,00	✓	0,86	5,91	X	
125	2,37	✓	✓	✓	✓	2,37	0,00	✓	0,35	1,00	✓	
160	2,56	✓	✓	✓	✓	2,56	0,00	✓	0,62	3,09	✓	
200	2,52	✓	✓	✓	✓	2,52	0,00	✓	0,43	1,46	✓	
250	1,84	✓	✓	✓	✓	1,84	0,00	✓	0,31	0,78	✓	
315	1,98	✓	✓	✓	✓	1,98	0,00	✓	0,36	1,05	✓	
400	1,70	✓	✓	✓	✓	1,70	0,00	✓	0,81	5,29	X	
500	0,59	✓	✓	✓	✓	0,59	0,00	✓	0,30	0,72	✓	
630	1,50	✓	✓	✓	✓	1,50	0,00	✓	0,38	1,14	✓	
800	1,49	✓	✓	✓	✓	1,49	0,00	✓	0,27	0,60	✓	
1 000	1,87	✓	✓	✓	✓	1,87	0,00	✓	0,59	2,75	✓	
1 250	1,29	✓	✓	✓	✓	1,29	0,00	✓	0,50	2,03	✓	
1 600	1,50	✓	✓	✓	✓	1,50	0,00	✓	0,07	0,04	✓	
2 000	1,24	✓	✓	✓	✓	1,24	0,00	✓	0,41	1,34	✓	
2 500	1,38	✓	✓	✓	✓	1,38	0,00	✓	0,15	0,17	✓	
3 150	1,27	✓	✓	✓	✓	1,27	0,00	✓	0,23	0,42	✓	
4 000	1,10	✓	✓	✓	✓	1,10	0,00	✓	0,63	3,17	✓	
5 000	0,92	✓	✓	✓	✓	0,92	0,00	✓	0,51	2,08	✓	
6 300	1,04	✓	✓	✓	✓	1,04	0,00	✓	0,15	0,19	✓	

PRAVÁ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-4,92	✓	✓	✓	✓	-2,59	2,33	✓	0,73	4,26	X	
63	2,28	✓	✓	✓	✓	4,79	2,50	✓	0,68	3,71	✓	
80	1,99	X	✓	✓	✓	2,10	0,11	✓	0,79	5,00	X	
100	2,32	✓	✓	✓	✓	2,32	0,00	✓	0,22	0,39	✓	
125	2,37	✓	✓	✓	✓	2,37	0,00	✓	0,42	1,43	✓	
160	1,68	✓	✓	✓	✓	1,68	0,00	✓	0,68	3,65	✓	
200	2,10	✓	✓	✓	✓	2,10	0,00	✓	0,60	2,83	✓	
250	2,13	✓	✓	✓	✓	2,13	0,00	✓	0,94	7,12	X	
315	2,03	✓	✓	✓	✓	2,03	0,00	✓	0,44	1,55	✓	
400	1,42	✓	✓	✓	✓	1,42	0,00	✓	0,56	2,52	✓	
500	1,12	✓	✓	✓	✓	1,12	0,00	✓	0,25	0,49	✓	
630	1,28	✓	✓	✓	✓	1,28	0,00	✓	0,12	0,12	✓	
800	1,45	✓	✓	✓	✓	1,45	0,00	✓	0,27	0,59	✓	
1 000	1,59	✓	✓	✓	✓	1,59	0,00	✓	0,33	0,86	✓	
1 250	1,50	✓	✓	✓	✓	1,50	0,00	✓	0,46	1,71	✓	
1 600	1,56	✓	✓	✓	✓	1,56	0,00	✓	0,10	0,07	✓	
2 000	1,38	✓	✓	✓	✓	1,38	0,00	✓	0,22	0,40	✓	
2 500	1,44	✓	✓	✓	✓	1,44	0,00	✓	0,10	0,08	✓	
3 150	1,41	✓	✓	✓	✓	1,41	0,00	✓	0,20	0,33	✓	
4 000	1,37	✓	✓	✓	✓	1,37	0,00	✓	0,36	1,02	✓	
5 000	1,15	✓	✓	✓	✓	1,15	0,00	✓	0,33	0,88	✓	
6 300	1,44	✓	✓	✓	✓	1,44	0,00	✓	0,26	0,55	✓	

LEVÁ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-3,02	✓	✓	✓	✓	-0,85	2,17	✓	0,83	5,47	X	
63	-4,59	✓	✓	✓	✓	5,82	10,42	X	0,92	6,84	X	
80	0,66	✓	✓	✓	✓	0,66	0,00	✓	0,52	2,19	✓	
100	1,69	✓	✓	✓	✓	1,69	0,00	✓	0,95	7,26	X	
125	2,33	✓	✓	✓	✓	2,33	0,00	✓	0,70	3,87	✓	
160	2,50	✓	✓	✓	✓	2,50	0,00	✓	0,88	6,25	X	
200	2,60	✓	✓	✓	✓	2,60	0,00	✓	0,54	2,34	✓	
250	2,26	✓	✓	✓	✓	2,26	0,00	✓	0,67	3,58	✓	
315	2,28	✓	✓	✓	✓	2,28	0,00	✓	0,54	2,36	✓	
400	1,52	✓	✓	✓	✓	1,52	0,00	✓	0,43	1,51	✓	
500	1,88	✓	✓	✓	✓	1,88	0,00	✓	0,18	0,26	✓	
630	1,83	✓	✓	✓	✓	1,83	0,00	✓	0,33	0,85	✓	
800	1,29	✓	✓	✓	✓	1,29	0,00	✓	0,36	1,05	✓	
1 000	1,26	✓	✓	✓	✓	1,26	0,00	✓	0,15	0,18	✓	
1 250	1,62	✓	✓	✓	✓	1,62	0,00	✓	0,06	0,03	✓	
1 600	1,52	✓	✓	✓	✓	1,52	0,00	✓	0,05	0,02	✓	
2 000	1,50	✓	✓	✓	✓	1,50	0,00	✓	0,11	0,09	✓	
2 500	1,67	✓	✓	✓	✓	1,67	0,00	✓	0,29	0,69	✓	
3 150	1,53	✓	✓	✓	✓	1,53	0,00	✓	0,18	0,26	✓	
4 000	1,22	✓	✓	✓	✓	1,22	0,00	✓	0,53	2,24	✓	
5 000	1,11	✓	✓	✓	✓	1,11	0,00	✓	0,24	0,45	✓	
6 300	1,45	✓	✓	✓	✓	1,45	0,00	✓	0,31	0,78	✓	

Frekvenční pásmo [Hz]	F_1	$F_1 \leq 0,6$
50	0,29	✓
63	0,36	✓
80	0,30	✓
100	0,62	X
125	0,40	✓
160	0,23	✓
200	0,08	✓
250	0,26	✓
315	0,15	✓
400	0,04	✓
500	0,25	✓
630	0,13	✓
800	0,09	✓
1 000	0,09	✓
1 250	0,07	✓
1 600	0,08	✓
2 000	0,04	✓
2 500	0,03	✓
3 150	0,10	✓
4 000	0,26	✓
5 000	0,02	✓
6 300	0,02	✓

HORNÍ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-7,62	✓	✓	✓	✓	-6,19	1,43	✓	0,33	0,86	✓	
63	-9,69	X	✓	✓	X	-9,43	0,27	✓	1,63	21,20	X	
80	-3,08	X	✓	✓	✓	-0,93	2,15	✓	1,50	18,10	X	
100	-2,44	✓	✓	✓	✓	-2,44	0,00	✓	1,27	12,82	X	
125	2,69	✓	✓	✓	✓	14,16	11,48	X	0,83	5,51	X	
160	3,23	✓	✓	✓	✓	3,23	0,00	✓	0,25	0,52	✓	
200	3,79	✓	✓	✓	✓	3,79	0,00	✓	0,31	0,75	✓	
250	7,64	✓	✓	✓	✓	13,02	5,38	X	0,44	1,57	✓	
315	1,39	✓	✓	✓	✓	1,39	0,00	✓	0,16	0,22	✓	
400	1,28	✓	✓	✓	✓	1,28	0,00	✓	0,46	1,67	✓	
500	2,48	✓	✓	✓	✓	2,48	0,00	✓	0,37	1,08	✓	
630	2,35	✓	✓	✓	✓	2,35	0,00	✓	0,16	0,21	✓	
800	1,64	✓	✓	✓	✓	1,64	0,00	✓	0,13	0,14	✓	
1 000	1,11	✓	✓	✓	✓	1,11	0,00	✓	0,27	0,57	✓	
1 250	1,51	✓	✓	✓	✓	1,51	0,00	✓	0,25	0,49	✓	
1 600	1,75	✓	✓	✓	✓	1,75	0,00	✓	0,32	0,84	✓	
2 000	1,65	✓	✓	✓	✓	1,65	0,00	✓	0,34	0,93	✓	
2 500	1,74	✓	✓	✓	✓	1,74	0,00	✓	0,18	0,25	✓	
3 150	1,34	✓	✓	✓	✓	1,34	0,00	✓	0,09	0,06	✓	
4 000	1,09	✓	✓	✓	✓	1,09	0,00	✓	0,53	2,23	✓	
5 000	1,12	✓	✓	✓	✓	1,12	0,00	✓	0,23	0,41	✓	
6 300	1,40	✓	✓	✓	✓	1,40	0,00	✓	0,18	0,26	✓	

PŘEDNÍ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-5,65	✓	✓	✓	✓	1,34	6,99	X	0,36	1,02	✓	
63	-4,23	✓	✓	✓	✓	-4,23	0,00	✓	0,88	6,26	X	
80	-1,12	✓	✓	✓	✓	0,91	2,03	✓	0,87	6,12	X	
100	4,02	✓	✓	✓	✓	9,80	5,78	X	0,58	2,71	✓	
125	4,20	✓	✓	✓	✓	4,20	0,00	✓	0,70	3,94	✓	
160	4,62	✓	✓	✓	✓	4,62	0,00	✓	1,09	9,57	X	
200	6,82	✓	✓	✓	✓	6,82	0,00	✓	1,02	8,31	X	
250	4,94	✓	✓	✓	✓	5,81	0,87	✓	0,99	7,89	X	
315	3,04	✓	✓	✓	✓	3,04	0,00	✓	0,54	2,35	✓	
400	2,78	✓	✓	✓	✓	2,78	0,00	✓	0,40	1,25	✓	
500	3,48	✓	✓	✓	✓	6,92	3,44	X	0,64	3,30	✓	
630	1,96	✓	✓	✓	✓	1,96	0,00	✓	0,28	0,64	✓	
800	1,46	✓	✓	✓	✓	1,46	0,00	✓	0,69	3,83	✓	
1 000	2,11	✓	✓	✓	✓	2,11	0,00	✓	0,51	2,05	✓	
1 250	1,78	✓	✓	✓	✓	1,78	0,00	✓	0,63	3,15	✓	
1 600	2,72	✓	✓	✓	✓	2,72	0,00	✓	0,25	0,51	✓	
2 000	2,44	✓	✓	✓	✓	2,44	0,00	✓	0,40	1,28	✓	
2 500	2,16	✓	✓	✓	✓	2,16	0,00	✓	0,28	0,61	✓	
3 150	2,23	✓	✓	✓	✓	2,23	0,00	✓	0,12	0,12	✓	
4 000	1,99	✓	✓	✓	✓	1,99	0,00	✓	0,53	2,23	✓	
5 000	1,50	✓	✓	✓	✓	1,50	0,00	✓	0,40	1,26	✓	
6 300	2,30	✓	✓	✓	✓	2,30	0,00	✓	0,26	0,52	✓	

ZADNÍ STRANA											
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²
50	-6,68	✓	✓	✓	X	-6,68	0,00	✓	1,12	10,11	X
63	-7,90	✓	✓	✓	✓	3,54	11,45	X	0,51	2,09	✓
80	-5,85	✓	X	✓	✓	-4,05	1,80	✓	1,55	19,27	X
100	3,18	✓	✓	✓	✓	3,18	0,00	✓	1,01	8,17	X
125	3,26	✓	✓	✓	✓	3,26	0,00	✓	0,57	2,58	✓
160	3,69	✓	✓	✓	✓	3,69	0,00	✓	0,80	5,17	X
200	3,45	✓	✓	✓	✓	3,45	0,00	✓	0,69	3,78	✓
250	0,44	✓	✓	✓	✓	14,97	14,53	X	0,88	6,18	X
315	3,49	✓	✓	✓	✓	3,49	0,00	✓	0,65	3,33	✓
400	2,84	✓	✓	✓	✓	2,84	0,00	✓	0,68	3,75	✓
500	1,67	✓	✓	✓	✓	1,67	0,00	✓	0,70	3,92	✓
630	2,31	✓	✓	✓	✓	2,31	0,00	✓	0,44	1,55	✓
800	2,12	✓	✓	✓	✓	2,12	0,00	✓	0,44	1,56	✓
1 000	1,98	✓	✓	✓	✓	1,98	0,00	✓	0,82	5,36	X
1 250	1,33	✓	✓	✓	✓	1,33	0,00	✓	0,43	1,48	✓
1 600	1,61	✓	✓	✓	✓	1,61	0,00	✓	0,18	0,26	✓
2 000	1,84	✓	✓	✓	✓	1,84	0,00	✓	0,30	0,70	✓
2 500	2,04	✓	✓	✓	✓	2,04	0,00	✓	0,33	0,88	✓
3 150	1,78	✓	✓	✓	✓	1,78	0,00	✓	0,18	0,27	✓
4 000	1,83	✓	✓	✓	✓	1,83	0,00	✓	0,68	3,70	✓
5 000	1,03	✓	✓	✓	✓	1,03	0,00	✓	0,52	2,16	✓
6 300	1,44	✓	✓	✓	✓	1,44	0,00	✓	0,32	0,83	✓

PRAVÁ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-3,41	✓	✓	✓	X	-2,77	0,64	✓	0,93	6,85	X	
63	-6,34	✓	✓	✓	✓	-3,94	2,40	✓	0,57	2,59	✓	
80	1,24	✓	✓	✓	✓	2,82	1,58	✓	0,52	2,19	✓	
100	-2,70	✓	✓	✓	✓	3,70	6,41	X	0,54	2,35	✓	
125	1,52	✓	✓	✓	✓	8,87	7,35	X	0,94	7,12	X	
160	2,90	✓	✓	✓	✓	2,90	0,00	✓	0,56	2,50	✓	
200	2,84	✓	✓	✓	✓	2,84	0,00	✓	0,27	0,60	✓	
250	-2,71	✓	✓	✓	✓	0,22	2,93	✓	0,59	2,79	✓	
315	1,87	✓	✓	✓	✓	1,87	0,00	✓	0,49	1,95	✓	
400	2,04	✓	✓	✓	✓	2,04	0,00	✓	0,22	0,39	✓	
500	1,14	✓	✓	✓	✓	1,14	0,00	✓	0,38	1,16	✓	
630	0,81	✓	✓	✓	✓	0,81	0,00	✓	0,34	0,90	✓	
800	1,53	✓	✓	✓	✓	1,53	0,00	✓	0,24	0,46	✓	
1 000	1,65	✓	✓	✓	✓	1,65	0,00	✓	0,46	1,67	✓	
1 250	1,22	✓	✓	✓	✓	1,22	0,00	✓	0,23	0,41	✓	
1 600	1,42	✓	✓	✓	✓	1,42	0,00	✓	0,32	0,84	✓	
2 000	1,53	✓	✓	✓	✓	1,53	0,00	✓	0,18	0,26	✓	
2 500	1,47	✓	✓	✓	✓	1,47	0,00	✓	0,21	0,35	✓	
3 150	0,94	✓	✓	✓	✓	0,94	0,00	✓	0,33	0,87	✓	
4 000	0,73	✓	✓	✓	✓	0,73	0,00	✓	0,43	1,51	✓	
5 000	0,94	✓	✓	✓	✓	0,94	0,00	✓	0,38	1,15	✓	
6 300	1,27	✓	✓	✓	✓	1,27	0,00	✓	0,43	1,46	✓	

Frekvenční pásmo [Hz]	F_1	$F_1 \leq 0,6$
50	0,60	✓
63	0,28	✓
80	0,48	✓
100	0,60	X
125	0,62	X
160	0,89	X
200	0,48	✓
250	0,45	✓
315	0,13	✓
400	0,21	✓
500	0,24	✓
630	0,07	✓
800	0,16	✓
1 000	0,12	✓
1 250	0,19	✓
1 600	0,11	✓
2 000	0,11	✓
2 500	0,03	✓
3 150	0,06	✓
4 000	0,41	✓
5 000	0,05	✓
6 300	0,10	✓

HORNÍ STRANA											
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²
50	-3,99	✓	✓	✓	✓	-3,99	0,00	✓	1,14	10,32	X
63	-5,86	✓	X	✓	✓	-4,49	1,37	✓	1,62	21,02	X
80	-0,89	✓	✓	✓	✓	-0,89	0,00	✓	1,05	8,74	X
100	4,07	✓	✓	✓	✓	4,07	0,00	✓	0,60	2,87	✓
125	4,11	✓	✓	✓	✓	8,67	4,56	X	0,35	0,97	✓
160	3,05	✓	✓	✓	✓	3,05	0,00	✓	0,25	0,50	✓
200	2,30	✓	✓	✓	✓	2,30	0,00	✓	0,87	6,00	X
250	1,69	✓	✓	✓	✓	1,69	0,00	✓	1,57	19,76	X
315	1,93	✓	✓	✓	✓	1,93	0,00	✓	0,38	1,15	✓
400	2,92	✓	✓	✓	✓	2,92	0,00	✓	0,62	3,03	✓
500	4,31	✓	✓	✓	✓	4,31	0,00	✓	0,96	7,37	X
630	3,90	✓	✓	✓	✓	3,90	0,00	✓	0,61	2,94	✓
800	2,60	✓	✓	✓	✓	2,60	0,00	✓	0,76	4,66	X
1 000	1,84	✓	✓	✓	✓	1,84	0,00	✓	0,73	4,29	X
1 250	2,41	✓	✓	✓	✓	2,41	0,00	✓	0,21	0,35	✓
1 600	2,24	✓	✓	✓	✓	2,24	0,00	✓	0,33	0,85	✓
2 000	2,28	✓	✓	✓	✓	2,28	0,00	✓	0,13	0,13	✓
2 500	2,26	✓	✓	✓	✓	2,26	0,00	✓	0,28	0,62	✓
3 150	2,01	✓	✓	✓	✓	2,01	0,00	✓	0,34	0,93	✓
4 000	2,08	✓	✓	✓	✓	2,08	0,00	✓	0,64	3,32	✓
5 000	1,71	✓	✓	✓	✓	1,71	0,00	✓	0,35	0,98	✓
6 300	1,98	✓	✓	✓	✓	1,98	0,00	✓	0,21	0,35	✓

PŘEDNÍ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-0,16	✓	✓	✓	✓	2,11	2,27	✓	0,74	4,40	X	
63	2,87	✓	✓	✓	✓	3,57	0,70	✓	0,76	4,60	X	
80	4,90	✓	✓	✓	✓	4,90	0,00	✓	1,02	8,31	X	
100	6,13	✓	✓	✓	✓	6,13	0,00	✓	0,26	0,55	✓	
125	3,95	✓	✓	✓	✓	3,95	0,00	✓	0,66	3,46	✓	
160	4,45	✓	✓	✓	✓	4,45	0,00	✓	0,60	2,86	✓	
200	3,55	✓	✓	✓	✓	3,55	0,00	✓	0,53	2,24	✓	
250	3,15	✓	✓	✓	✓	3,15	0,00	✓	0,98	7,73	X	
315	1,38	✓	✓	✓	✓	1,38	0,00	✓	0,82	5,37	X	
400	1,39	✓	✓	✓	✓	1,39	0,00	✓	0,43	1,48	✓	
500	1,57	✓	✓	✓	✓	1,57	0,00	✓	0,25	0,49	✓	
630	2,15	✓	✓	✓	✓	2,15	0,00	✓	0,36	1,02	✓	
800	2,52	✓	✓	✓	✓	2,52	0,00	✓	0,38	1,18	✓	
1 000	1,87	✓	✓	✓	✓	1,87	0,00	✓	0,27	0,58	✓	
1 250	2,01	✓	✓	✓	✓	2,01	0,00	✓	0,47	1,78	✓	
1 600	2,44	✓	✓	✓	✓	2,44	0,00	✓	0,38	1,16	✓	
2 000	2,61	✓	✓	✓	✓	2,61	0,00	✓	0,08	0,05	✓	
2 500	2,14	✓	✓	✓	✓	2,14	0,00	✓	0,20	0,33	✓	
3 150	1,89	✓	✓	✓	✓	1,89	0,00	✓	0,37	1,12	✓	
4 000	1,25	✓	✓	✓	✓	1,25	0,00	✓	0,36	1,04	✓	
5 000	1,67	✓	✓	✓	✓	1,67	0,00	✓	0,24	0,46	✓	
6 300	2,06	✓	✓	✓	✓	2,06	0,00	✓	0,30	0,73	✓	

PRAVÁ STRANA											
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²
50	-0,34	✓	✓	✓	✓	14,09	14,44	X	0,82	5,37	X
63	-0,84	✓	✓	✓	✓	11,73	12,57	X	0,53	2,27	✓
80	2,82	✓	✓	✓	✓	4,93	2,11	✓	0,48	1,82	✓
100	5,71	✓	✓	✓	✓	7,68	1,97	✓	0,57	2,63	✓
125	4,41	✓	✓	✓	✓	4,41	0,00	✓	0,60	2,91	✓
160	3,89	✓	✓	✓	✓	3,89	0,00	✓	0,57	2,57	✓
200	2,67	✓	✓	✓	✓	2,67	0,00	✓	0,55	2,46	✓
250	1,80	✓	✓	✓	✓	1,80	0,00	✓	1,13	10,30	X
315	2,21	✓	✓	✓	✓	2,21	0,00	✓	0,46	1,67	✓
400	2,60	✓	✓	✓	✓	2,60	0,00	✓	0,30	0,73	✓
500	2,04	✓	✓	✓	✓	2,04	0,00	✓	0,17	0,22	✓
630	1,94	✓	✓	✓	✓	1,94	0,00	✓	0,22	0,39	✓
800	2,09	✓	✓	✓	✓	2,09	0,00	✓	0,42	1,38	✓
1 000	1,71	✓	✓	✓	✓	1,71	0,00	✓	0,12	0,11	✓
1 250	2,26	✓	✓	✓	✓	2,26	0,00	✓	0,25	0,51	✓
1 600	2,05	✓	✓	✓	✓	2,05	0,00	✓	0,49	1,89	✓
2 000	1,72	✓	✓	✓	✓	1,72	0,00	✓	0,28	0,63	✓
2 500	1,88	✓	✓	✓	✓	1,88	0,00	✓	0,12	0,11	✓
3 150	1,76	✓	✓	✓	✓	1,76	0,00	✓	0,29	0,68	✓
4 000	1,61	✓	✓	✓	✓	1,61	0,00	✓	0,38	1,14	✓
5 000	1,35	✓	✓	✓	✓	1,35	0,00	✓	0,29	0,67	✓
6 300	1,74	✓	✓	✓	✓	1,74	0,00	✓	0,56	2,49	✓

Frekvenční pásmo [Hz]	F_1	$F_1 \leq 0,6$
50	0,51	✓
63	0,50	✓
80	0,42	✓
100	0,28	✓
125	0,30	✓
160	0,35	✓
200	0,18	✓
250	0,46	✓
315	0,10	✓
400	0,22	✓
500	0,47	✓
630	0,10	✓
800	0,09	✓
1 000	0,13	✓
1 250	0,13	✓
1 600	0,15	✓
2 000	0,12	✓
2 500	0,20	✓
3 150	0,13	✓
4 000	0,33	✓
5 000	0,09	✓
6 300	0,10	✓

HORNÍ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-5,81	✓	✓	X	✓	1,47	7,28	X	0,90	6,47	X	
63	-0,35	✓	✓	✓	✓	-0,35	0,00	✓	0,31	0,79	✓	
80	4,54	✓	✓	✓	✓	4,54	0,00	✓	0,38	1,15	✓	
100	4,04	✓	✓	✓	✓	4,54	0,50	✓	0,69	3,82	✓	
125	4,84	✓	✓	✓	✓	5,80	0,96	✓	0,48	1,85	✓	
160	3,35	✓	✓	✓	✓	3,35	0,00	✓	0,21	0,34	✓	
200	4,23	✓	✓	✓	✓	4,23	0,00	✓	0,84	5,60	X	
250	4,56	✓	✓	✓	✓	4,56	0,00	✓	1,41	16,01	X	
315	2,12	✓	✓	✓	✓	2,12	0,00	✓	0,32	0,84	✓	
400	3,17	✓	✓	✓	✓	3,17	0,00	✓	0,40	1,31	✓	
500	4,79	✓	✓	✓	✓	4,79	0,00	✓	0,44	1,53	✓	
630	4,07	✓	✓	✓	✓	4,07	0,00	✓	0,68	3,69	✓	
800	2,47	✓	✓	✓	✓	2,47	0,00	✓	0,63	3,21	✓	
1 000	2,09	✓	✓	✓	✓	2,09	0,00	✓	0,73	4,31	X	
1 250	2,50	✓	✓	✓	✓	2,50	0,00	✓	0,10	0,08	✓	
1 600	2,33	✓	✓	✓	✓	2,33	0,00	✓	0,38	1,13	✓	
2 000	2,48	✓	✓	✓	✓	2,48	0,00	✓	0,16	0,21	✓	
2 500	2,53	✓	✓	✓	✓	2,53	0,00	✓	0,25	0,49	✓	
3 150	2,08	✓	✓	✓	✓	2,08	0,00	✓	0,27	0,60	✓	
4 000	2,53	✓	✓	✓	✓	2,53	0,00	✓	0,54	2,37	✓	
5 000	2,19	✓	✓	✓	✓	2,19	0,00	✓	0,43	1,49	✓	
6 300	2,19	✓	✓	✓	✓	2,19	0,00	✓	0,37	1,09	✓	

PŘEDNÍ STRANA											
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²
50	-8,05	✓	✓	✓	✓	-7,85	0,20	✓	1,04	8,64	X
63	6,06	✓	✓	X	✓	6,14	0,08	✓	0,72	4,11	X
80	4,59	✓	✓	✓	✓	4,59	0,00	✓	0,93	6,92	X
100	8,18	✓	✓	✓	✓	8,18	0,00	✓	0,83	5,57	X
125	4,44	✓	✓	✓	✓	4,44	0,00	✓	0,70	3,89	✓
160	4,64	✓	✓	✓	✓	4,64	0,00	✓	0,64	3,30	✓
200	3,74	✓	✓	✓	✓	3,74	0,00	✓	0,47	1,76	✓
250	3,49	✓	✓	✓	✓	3,83	0,34	✓	1,15	10,63	X
315	1,84	✓	✓	✓	✓	1,84	0,00	✓	0,77	4,70	X
400	1,61	✓	✓	✓	✓	1,61	0,00	✓	0,39	1,19	✓
500	1,38	✓	✓	✓	✓	1,38	0,00	✓	0,42	1,41	✓
630	2,30	✓	✓	✓	✓	2,30	0,00	✓	0,41	1,35	✓
800	2,70	✓	✓	✓	✓	2,70	0,00	✓	0,24	0,48	✓
1 000	2,27	✓	✓	✓	✓	2,27	0,00	✓	0,38	1,17	✓
1 250	2,01	✓	✓	✓	✓	2,01	0,00	✓	0,49	1,96	✓
1 600	2,49	✓	✓	✓	✓	2,49	0,00	✓	0,36	1,06	✓
2 000	2,39	✓	✓	✓	✓	2,39	0,00	✓	0,19	0,29	✓
2 500	2,24	✓	✓	✓	✓	2,24	0,00	✓	0,27	0,58	✓
3 150	1,74	✓	✓	✓	✓	1,74	0,00	✓	0,22	0,37	✓
4 000	1,93	✓	✓	✓	✓	1,93	0,00	✓	0,37	1,12	✓
5 000	1,57	✓	✓	✓	✓	1,57	0,00	✓	0,29	0,67	✓
6 300	1,98	✓	✓	✓	✓	1,98	0,00	✓	0,21	0,36	✓

PRAVÁ STRANA											
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²
50	-7,24	X	✓	X	✓	-7,07	0,18	✓	1,67	22,25	X
63	-1,00	✓	✓	✓	✓	16,91	17,91	X	0,79	4,99	X
80	5,30	✓	✓	✓	X	6,92	1,62	✓	1,60	20,40	X
100	8,03	✓	✓	✓	✓	14,52	6,50	X	0,97	7,60	X
125	4,31	✓	✓	✓	✓	4,31	0,00	✓	0,71	4,08	X
160	4,03	✓	✓	✓	✓	4,03	0,00	✓	0,76	4,67	X
200	2,83	✓	✓	✓	✓	2,83	0,00	✓	0,58	2,70	✓
250	1,56	✓	✓	✓	✓	1,56	0,00	✓	0,93	6,92	X
315	2,21	✓	✓	✓	✓	2,21	0,00	✓	0,54	2,30	✓
400	2,80	✓	✓	✓	✓	2,80	0,00	✓	0,30	0,72	✓
500	2,72	✓	✓	✓	✓	2,72	0,00	✓	0,27	0,57	✓
630	2,02	✓	✓	✓	✓	2,02	0,00	✓	0,28	0,64	✓
800	2,32	✓	✓	✓	✓	2,32	0,00	✓	0,22	0,38	✓
1 000	1,62	✓	✓	✓	✓	1,62	0,00	✓	0,18	0,27	✓
1 250	2,27	✓	✓	✓	✓	2,27	0,00	✓	0,23	0,41	✓
1 600	2,24	✓	✓	✓	✓	2,24	0,00	✓	0,33	0,86	✓
2 000	1,83	✓	✓	✓	✓	1,83	0,00	✓	0,41	1,36	✓
2 500	1,95	✓	✓	✓	✓	1,95	0,00	✓	0,17	0,22	✓
3 150	2,02	✓	✓	✓	✓	2,02	0,00	✓	0,27	0,56	✓
4 000	1,60	✓	✓	✓	✓	1,60	0,00	✓	0,30	0,72	✓
5 000	1,64	✓	✓	✓	✓	1,64	0,00	✓	0,35	0,96	✓
6 300	1,80	✓	✓	✓	✓	1,80	0,00	✓	0,39	1,20	✓

Frekvenční pásmo [Hz]	F_1	$F_1 \leq 0,6$
50	0,69	X
63	0,79	X
80	0,26	✓
100	0,68	X
125	0,38	✓
160	0,67	X
200	0,60	X
250	0,46	✓
315	0,16	✓
400	0,12	✓
500	0,28	✓
630	0,03	✓
800	0,11	✓
1 000	0,22	✓
1 250	0,18	✓
1 600	0,12	✓
2 000	0,12	✓
2 500	0,09	✓
3 150	0,10	✓
4 000	0,19	✓
5 000	0,10	✓
6 300	0,19	✓

HORNÍ STRANA												
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-3,60	✓	✓	✓	✓	0,18	3,78	X	1,20	11,43	X	
63	-1,07	✓	✓	✓	✓	-0,58	0,49	✓	0,54	2,37	✓	
80	3,87	✓	✓	✓	✓	3,87	0,00	✓	0,36	1,02	✓	
100	4,39	✓	✓	✓	✓	4,39	0,00	✓	0,27	0,57	✓	
125	4,37	✓	✓	✓	✓	4,37	0,00	✓	0,41	1,33	✓	
160	3,31	✓	✓	✓	✓	3,31	0,00	✓	0,18	0,27	✓	
200	3,22	✓	✓	✓	✓	3,22	0,00	✓	0,09	0,06	✓	
250	6,90	✓	✓	✓	✓	6,90	0,00	✓	0,71	4,07	X	
315	2,18	✓	✓	✓	✓	2,18	0,00	✓	0,37	1,12	✓	
400	2,98	✓	✓	✓	✓	2,98	0,00	✓	0,47	1,78	✓	
500	4,86	✓	✓	✓	✓	4,86	0,00	✓	0,57	2,61	✓	
630	4,24	✓	✓	✓	✓	4,24	0,00	✓	0,48	1,86	✓	
800	2,53	✓	✓	✓	✓	2,53	0,00	✓	0,57	2,55	✓	
1 000	1,64	✓	✓	✓	✓	1,64	0,00	✓	0,44	1,53	✓	
1 250	2,85	✓	✓	✓	✓	2,85	0,00	✓	0,05	0,02	✓	
1 600	2,32	✓	✓	✓	✓	2,32	0,00	✓	0,30	0,74	✓	
2 000	2,64	✓	✓	✓	✓	2,64	0,00	✓	0,20	0,32	✓	
2 500	2,36	✓	✓	✓	✓	2,36	0,00	✓	0,27	0,59	✓	
3 150	2,20	✓	✓	✓	✓	2,20	0,00	✓	0,25	0,50	✓	
4 000	2,23	✓	✓	✓	✓	2,23	0,00	✓	1,10	9,66	X	
5 000	2,04	✓	✓	✓	✓	2,04	0,00	✓	0,39	1,22	✓	
6 300	2,18	✓	✓	✓	✓	2,18	0,00	✓	0,36	1,06	✓	

PŘEDNÍ STRANA												
Frekvenční pásmo	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-3,55	✓	✓	✓	✓	-3,55	0,00	✓	0,77	4,75	X	
63	-0,39	✓	✓	✓	✓	1,99	2,38	✓	0,67	3,54	✓	
80	5,35	X	✓	✓	✓	5,39	0,04	✓	1,05	8,81	X	
100	5,87	✓	✓	✓	✓	5,87	0,00	✓	0,54	2,29	✓	
125	3,85	✓	✓	✓	✓	3,85	0,00	✓	0,74	4,38	X	
160	4,30	✓	✓	✓	✓	4,30	0,00	✓	0,58	2,73	✓	
200	3,92	✓	✓	✓	✓	3,92	0,00	✓	0,58	2,66	✓	
250	3,43	✓	✓	✓	✓	3,67	0,24	✓	1,30	13,50	X	
315	1,98	✓	✓	✓	✓	1,98	0,00	✓	0,86	5,89	X	
400	1,52	✓	✓	✓	✓	1,52	0,00	✓	0,55	2,41	✓	
500	1,21	✓	✓	✓	✓	1,21	0,00	✓	0,37	1,08	✓	
630	1,99	✓	✓	✓	✓	1,99	0,00	✓	0,44	1,54	✓	
800	2,80	✓	✓	✓	✓	2,80	0,00	✓	0,45	1,62	✓	
1 000	2,24	✓	✓	✓	✓	2,24	0,00	✓	0,34	0,93	✓	
1 250	1,97	✓	✓	✓	✓	1,97	0,00	✓	0,41	1,32	✓	
1 600	2,12	✓	✓	✓	✓	2,12	0,00	✓	0,55	2,45	✓	
2 000	2,56	✓	✓	✓	✓	2,56	0,00	✓	0,11	0,10	✓	
2 500	2,15	✓	✓	✓	✓	2,15	0,00	✓	0,32	0,80	✓	
3 150	1,59	✓	✓	✓	✓	1,59	0,00	✓	0,43	1,46	✓	
4 000	1,15	✓	✓	✓	✓	1,15	0,00	✓	0,52	2,13	✓	
5 000	1,61	✓	✓	✓	✓	1,61	0,00	✓	0,49	1,95	✓	
6 300	2,02	✓	✓	✓	✓	2,02	0,00	✓	0,16	0,20	✓	

PRAVÁ STRANA												
Frekvenční pásmo	F ₂	kritérium 1: L _d > F ₂				F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:	
		1	2	3	4						N > C·F ₄ ²	
50	-7,28	✓	✓	✓	✓	-7,28	0,00	✓	1,79	25,53	X	
63	-1,35	✓	✓	✓	✓	1,27	2,62	✓	0,45	1,63	✓	
80	3,19	✓	✓	✓	✓	3,19	0,00	✓	0,86	5,92	X	
100	4,34	✓	✓	✓	✓	4,34	0,00	✓	1,22	11,86	X	
125	3,68	✓	✓	✓	✓	3,68	0,00	✓	0,75	4,51	X	
160	3,73	✓	✓	✓	✓	3,73	0,00	✓	0,78	4,90	X	
200	3,14	✓	✓	✓	✓	3,14	0,00	✓	0,65	3,38	✓	
250	2,88	✓	✓	✓	✓	2,88	0,00	✓	0,73	4,27	X	
315	2,55	✓	✓	✓	✓	2,55	0,00	✓	0,59	2,77	✓	
400	2,71	✓	✓	✓	✓	2,71	0,00	✓	0,38	1,18	✓	
500	2,76	✓	✓	✓	✓	2,76	0,00	✓	0,31	0,78	✓	
630	1,47	✓	✓	✓	✓	1,47	0,00	✓	0,22	0,40	✓	
800	2,20	✓	✓	✓	✓	2,20	0,00	✓	0,35	0,96	✓	
1 000	1,78	✓	✓	✓	✓	1,78	0,00	✓	0,13	0,14	✓	
1 250	1,88	✓	✓	✓	✓	1,88	0,00	✓	0,64	3,31	✓	
1 600	2,11	✓	✓	✓	✓	2,11	0,00	✓	0,39	1,20	✓	
2 000	1,73	✓	✓	✓	✓	1,73	0,00	✓	0,30	0,72	✓	
2 500	2,06	✓	✓	✓	✓	2,06	0,00	✓	0,35	0,98	✓	
3 150	1,74	✓	✓	✓	✓	1,74	0,00	✓	0,32	0,83	✓	
4 000	1,01	✓	✓	✓	✓	1,01	0,00	✓	0,63	3,20	✓	
5 000	1,42	✓	✓	✓	✓	1,42	0,00	✓	0,32	0,83	✓	
6 300	1,85	✓	✓	✓	✓	1,85	0,00	✓	0,40	1,26	✓	

Frekvenční pásmo [Hz]	F_1	$F_1 \leq 0,6$
50	0,78	X
63	0,68	X
80	0,76	X
100	0,34	✓
125	0,42	✓
160	0,51	✓
200	0,31	✓
250	0,40	✓
315	0,15	✓
400	0,19	✓
500	0,26	✓
630	0,14	✓
800	0,18	✓
1 000	0,22	✓
1 250	0,21	✓
1 600	0,07	✓
2 000	0,30	✓
2 500	0,08	✓
3 150	0,06	✓
4 000	0,15	✓
5 000	0,08	✓
6 300	0,08	✓

HORNÍ STRANA							
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
							N > C·F ₄ ²
50	-5,87	-0,61	5,27	X	1,51	18,17	X
63	-0,91	4,78	5,69	X	0,78	4,82	✓
80	2,31	3,71	1,41	✓	1,05	8,82	✓
100	2,07	2,07	0,00	✓	0,89	6,40	✓
125	3,36	4,91	1,55	✓	0,48	1,84	✓
160	3,74	3,74	0,00	✓	0,32	0,79	✓
200	4,39	4,97	0,59	✓	0,66	3,51	✓
250	4,65	10,75	6,10	X	1,53	18,82	X
315	2,67	2,67	0,00	✓	0,24	0,45	✓
400	3,30	3,30	0,00	✓	0,60	2,87	✓
500	3,25	3,25	0,00	✓	0,74	4,42	✓
630	2,97	2,97	0,00	✓	0,65	3,38	✓
800	2,46	2,46	0,00	✓	0,59	2,78	✓
1 000	1,90	1,90	0,00	✓	0,49	1,92	✓
1 250	2,21	2,21	0,00	✓	0,43	1,46	✓
1 600	2,51	2,51	0,00	✓	0,30	0,73	✓
2 000	2,59	2,59	0,00	✓	0,48	1,83	✓
2 500	2,37	2,37	0,00	✓	0,48	1,87	✓
3 150	2,14	2,14	0,00	✓	0,27	0,57	✓
4 000	1,97	1,97	0,00	✓	0,82	5,41	✓
5 000	1,96	1,96	0,00	✓	0,32	0,81	✓
6 300	2,16	2,16	0,00	✓	0,29	0,66	✓

Frekvenční pásmo [Hz]	HORNÍ STRANA - kritérium 1: $L_d > F_2$															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
63	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
80	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
125	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
160	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
250	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
315	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
400	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
630	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
800	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 600	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2 500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3 150	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6 300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

PŘEDNÍ STRANA							
Frekvenční pásmo [Hz]	F ₂	F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
							N > C·F ₄ ²
50	-11,44	-7,99	3,45	X	2,54	51,56	X
63	-6,72	-4,88	1,84	✓	1,67	22,24	X
80	1,09	8,71	7,62	X	1,86	27,76	X
100	3,24	7,55	4,30	X	1,31	13,63	✓
125	3,09	3,09	0,00	✓	0,66	3,46	✓
160	3,37	3,37	0,00	✓	0,55	2,39	✓
200	3,18	3,18	0,00	✓	0,48	1,82	✓
250	3,01	3,01	0,00	✓	0,88	6,23	✓
315	2,62	2,62	0,00	✓	0,87	6,09	✓
400	1,78	1,78	0,00	✓	0,84	5,71	✓
500	1,74	1,74	0,00	✓	0,71	4,08	✓
630	1,98	1,98	0,00	✓	0,41	1,34	✓
800	1,97	1,97	0,00	✓	0,56	2,53	✓
1 000	2,11	2,11	0,00	✓	0,53	2,23	✓
1 250	2,01	2,01	0,00	✓	0,44	1,58	✓
1 600	2,19	2,19	0,00	✓	0,35	0,98	✓
2 000	2,08	2,08	0,00	✓	0,35	0,97	✓
2 500	2,35	2,35	0,00	✓	0,37	1,12	✓
3 150	2,07	2,07	0,00	✓	0,34	0,93	✓
4 000	1,50	1,50	0,00	✓	0,63	3,19	✓
5 000	1,86	1,86	0,00	✓	0,38	1,14	✓
6 300	1,99	1,99	0,00	✓	0,49	1,93	✓

Frekvenční pásmo [Hz]	PŘEDNÍ STRANA - kritérium 1: $L_d > F_2$															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓
63	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
80	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓
100	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
125	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
160	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
315	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
400	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
630	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
800	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 600	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2 500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3 150	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6 300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

PRAVÁ STRANA							
Frekvenční pásma [Hz]	F ₂	F ₃	F ₃ - F ₂	F ₃ -F ₂ ≤ 3 dB	F ₄	C·F ₄ ²	kritérium 2:
							N > C·F ₄ ²
50	-20,72	-20,69	0,02	✓	3,86	119,27	X
63	-17,81	-17,77	0,04	✓	3,84	118,16	X
80	-9,76	-9,66	0,10	✓	3,88	120,47	X
100	-4,58	-2,81	1,77	✓	3,31	87,49	X
125	-4,58	-3,44	1,14	✓	3,51	98,58	X
160	-2,58	0,03	2,61	✓	3,04	73,88	X
200	1,70	8,01	6,31	X	1,40	15,67	✓
250	5,49	7,30	1,82	✓	0,83	5,47	✓
315	2,98	2,98	0,00	✓	0,60	2,85	✓
400	2,61	2,61	0,00	✓	0,64	3,31	✓
500	2,56	2,56	0,00	✓	0,76	4,68	✓
630	1,75	1,75	0,00	✓	0,41	1,34	✓
800	1,79	1,79	0,00	✓	0,42	1,39	✓
1 000	2,21	2,21	0,00	✓	0,45	1,60	✓
1 250	1,87	1,87	0,00	✓	0,53	2,22	✓
1 600	1,92	1,92	0,00	✓	0,31	0,75	✓
2 000	1,64	1,64	0,00	✓	0,33	0,87	✓
2 500	1,85	1,85	0,00	✓	0,37	1,12	✓
3 150	1,71	1,71	0,00	✓	0,51	2,07	✓
4 000	1,80	1,80	0,00	✓	0,53	2,22	✓
5 000	1,68	1,68	0,00	✓	0,45	1,61	✓
6 300	1,92	1,92	0,00	✓	0,40	1,28	✓

Frekvenční pásmo [Hz]	PRAVÁ STRANA - kritérium 1: $L_d > F_2$															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
50	X	✓	X	X	✓	X	X	X	X	✓	✓	✓	✓	X	X	X
63	X	✓	X	X	X	X	X	X	X	✓	✓	✓	X	X	X	X
80	X	X	X	X	X	X	✓	X	X	✓	X	✓	X	X	X	X
100	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓
125	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
160	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
315	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
400	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
630	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
800	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 250	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1 600	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2 500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3 150	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
4 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5 000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
6 300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓