

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechaniky



Pokročilé metody hodnocení impulsních hluků
Advanced method of impulse noise evaluation

Student:

Roman RUSZ

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal WEISZ

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechaniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Roman Rusz**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Pokročilé metody hodnocení impulsních hluků**
Advanced Method of Impulse Noise Evaluation

Zásady pro vypracování:

Všeobecný přístup k řešení problematice, studie základních pojmů z oblasti technické akustiky a psychoakustiky
Návrh a realizace měření na vzorcích firmy Brose CZ s využitím dostupného HW a SW vybavení.
- Realizace měření s využitím měřicí karty NI.
- Zpracování naměřených dat ve vlastní aplikaci vytvořené v prostředí LabView
Srovnání získaných výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

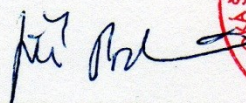
- [1] Cocker, J. M. Handbook of Noise and Vibration Control. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2007 1038 s. ISBN 0-4713-9599-4.
- [2] Randall, R. B. Frequency Analysis. Denmark: Bruel & Kjaer 1987 344 s. ISBN 978-87-835-5070.
- [3] Smetana, C.. Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Sdělovací technika, Praha 1998, ISBN 80-90 1936-2 5
- [4] ISO 3745, Akustika – Určování akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Weisz**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.
vedoucí katedry

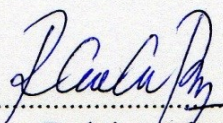


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 20.5 2013


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2013


.....
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Roman Rusz

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Máchova 655, 739 61 Třinec

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

RUSZ, R., Pokročilé metody hodnocení impulsních hluků: bakalářská práce.

Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2013, 74 s. Vedoucí práce: Weisz, M.

Bakalářská práce se zabývá měřením a následnou analýzou impulsních hluků. Zdrojem impulsních hluků bude otevírání a zavírání automobilového zámkového systému vyráběného firmou Brose CZ, s. r. o. Teoretická část popisuje základní poznatky a fakta z oblasti akustiky a především způsoby a principy měření psychoakustických veličin, jako je například hlasitost. Ve druhé části je provedeno měření impulsních hluků s využitím měřícího zařízení firmy National Instruments a následná analýza naměřených vzorků ve vlastní aplikaci vytvořené v prostředí program LabVIEW.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

RUSZ, R., Advanced Method of Impulse Noise Evaluation: Bachelor Thesis. Ostrava:

VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2013, 74 s. Thesis head: Weisz, M.

The bachelor thesis deals with measuring and subsequent analyzing of impulse noise. The source of the impulse noise is automotive liftgate latch (manufactured by Brose CZ, s. r. o.) while its opening and closing. Theoretical part gives a brief view of acoustics and psychoacoustics principles and facts, especially evaluating of psychoacoustics values such as loudness. In the second part we performed measuring of impulse noise using National Instruments measuring devices. At the end we analyzed measured samples in our own application developed in software LabVIEW.

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Michalu Weiszovi, Ing. Petru Wilhelmovi, Ing. Petru Zamarskému a celé katedře mechaniky za odborné a organizační vedení při této práci. Díky tomuto kolektivu odborníků a skvělých lidí jsem byl motivován k dalšímu studiu problematiky zvuku a chvění.

Obsah:

Úvod.....	11
1. Zvuk.....	12
2. Lidské ucho.....	13
3. Základní psychoakustické veličiny	15
3. 1 Hladina akustického tlaku.....	15
3. 2 Hladina hlasitosti	16
3. 2. 1 Jednotky hlasitosti	18
3. 2. 2 Způsoby hodnocení hlasitosti	18
3. 3 Hladina akustické intenzity	21
4. Kmitočtová pásma.....	21
4. 1 Kmitočtová analýza.....	22
4. 2 Oktávové pásmo.....	22
4. 3 Třetinooktávové pásmo.....	24
4. 4 Přepočty hladin na jinou šířku pásma	24
4. 5 Kritická (Barkova) pásma	26
5. Maskovací účinek zvuku	28
6. Váhové filtry	29
7. Hlasitost impulsních tónů	31
8. Měření.....	32
8. 1 Princip měření a zpracování akustických veličin	32
8. 1. 1 Zvukoměry	33
8. 1. 2 Snímače akustických veličin	34
8. 2 Zpracování signálu	36
8. 2. 1 Frekvenční analýza.....	37
8. 3 Polobezodrazová místnost	39
8. 4 Měřený vzorek.....	40
8. 5 Popis měření.....	43
8. 6 Parametry měření.....	43
8. 6. 1 Průměrování	43
9. Analýza	46
9. 1 Měřící software	46
9. 2 Výsledky – zavření zámku	48

9. 2. 1 Časový průběh signálu	48
9. 2. 2 Vliv časové konstanty	48
9. 2. 3 Třetinooktávová analýza	50
9. 3 Výsledky – otevření zámku	52
9. 3. 1 Časový průběh signálu	52
9. 3. 2 Třetinooktávová analýza	53
9. 4 Srovnání výsledných hodnot.....	55
10 Závěr.....	56
Seznam použité literatury	57
Seznam digitálních příloh	58
Přílohy	59
Příloha č.1.....	59

Seznam použitých značek, symbolů a zkratk:

Označení	Jednotka	Popis významu
F		Konstanta při výpočtu celkové hlasitosti (metodou A)
G(f)		Komplexní funkce
G(f _k)		Diskrétní Fourierova transformace
I	W/m ² , dB	Hladina akustické intenzity
I ₀	W/m ² , dB	Referenční hodnota akustického tlaku
K _{Ai}	dB	Korekce váhového filtru
L	Ph, S	Hlasitost
L _n	dB	Hladina hlasitosti tónu o frekvenci 1kHz
L _p	dB	Hladina akustický tlak
L _{pA}	dB	Hladina akustického tlaku vážená filtrem A
L _{pi}	dB	Hladina akustického tlaku v příslušném pásmu
S	dB/okt.	Směrnice sklonu spektra
S _m		Nejvyšší index hlasitosti
U	V	Napětí
b		Signifikátor pořadí ve frekvenční oblasti
c	m/s	Rychlost zvuku
f	Hz	Frekvence
f ₁	Hz	Dolní frekvence pásma
f ₂	Hz	Horní frekvence pásma
f _m	Hz	Střední frekvence pásma
k		Pissonova konstanta
k ₁		Konstanta při výpočtu hlasitosti Stevensonovou metodou
n		Počet vzorků
p ₀	Pa	Tlak plynu při teplotě 0°C, prahový akustický tlak
p ₁	Pa	Tlak vyvolaný měřeným zvukem
r		Signifikátor pořadí pro diskrétní hodnoty funkce v časové oblasti
t	s	Čas
x	m	Vzdálenost

Označení	Jednotka	Popis významu
z_0	Pa · m/s	Vlnová impedance
γ		Součinitel teplotní rozpínivosti plynu
ρ_0	Kg/m ³	Hustota plynu
	Ph	Phone – jednotka hlasitosti
	S	Sone – jednotka hlasitosti

Zkratka	Popis zkratky
BP	Band Pass
CPB	Constant Percentage Band – Analýza s konstantní šíří pásma
ČSN	Československá státní norma
ERB	Equivalent rectangular bandwidth – Typ kritických pásem
FFT	Fast Fourier Transformation – Rychlá Fourierova transformace
HP	High Pass
KP	Kritické pásmo
LP	Low Pass
SPL	Sound Pressure Level – Hladina akustického tlaku

Úvod

Akustika jako taková, je jedním z nejstarších odvětví fyziky, které se v současné době stává oblastí zájmů jak na poli vědy a výzkumu, tak na poli průmyslovém. Kořeny akustiky sahají do 6. stol. př. n. l., kdy se nauce o sluchu a hudbě, jak byla dříve akustika chápána, začal věnovat Pythagoras ze Sámu. Následoval ho Aristoteles ze Stageiry, Galileo Galilei či známý všeučel Leonardo da Vinci. Do 19.stol. byla akustika spojována s oblastí optiky kvůli tvrzení, že světlo jsou pružné vlny hypotetického éteru. Proto máme spoustu zákonů společných pro optiku a akustiku. [1]

Akustika, doprovázená odvětvím medicíny, zaznamenala jeden důležitý poznatek a sice, že lidské ucho zprostředkovává zvukový vjem velmi komplikovaným procesem. I při snaze mnoha badatelů, jako je například Helmholtz, Bekési nebo Flechert, mnoho poznatků a podrobností o mechanismu lidského slyšení zůstalo stále neobjasněno. Nervy lidského organismu se řídí podstatně jinými fyzikálními zákonitostmi než například přenos zvuku prostředím, a proto při vyšetřování sluchových vjemů se musíme řídit jevy, které nemají fyzikální obdoby. V průběhu času se ne jeden vědec snažil najít metodu, kterou by skloubil fyzikální měření s procesem vnímání zvuku lidským uchem. Psychoakustika využívá jak subjektivní, tak objektivní akustické veličiny, mezi kterými však neexistuje jednoduchá závislost ani přímá úměrnost. [1][6]

V současném moderním světě 21.století existuje nespočet moderních a pokročilých technologií pro snižování hluku v důsledku stále se zvyšujících požadavků na jeho snižování ve prospěch lidského zdraví. Proto se v této práci budu snažit objasnit jeden z velice škodlivých účinků hluku na lidský organismus a to je impulsní hluk. Zdrojem impulsního hluku bude v našem případě zámkový systém firmy Brose CZ, s. r. o., vyráběný pro automobilový průmysl. Je zřejmé, že psychoakustika se stává nedílnou součástí automobilového průmyslu, a proto není divu, že automobilky světového formátu: Audi, BMW nebo GM, dnes zaměstnávají své akustické inženýry. Zvuk, hudba, akustika, hluk a sluch jsou pojmy, které hýbou dnešním světem a je dobře, že si tyto pojmy našly své místo ve strojírenském průmyslu, kde nabývají svého významu.

1. Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat sluchový vjem. Ucho člověka je schopno rozpoznat toto vlnění ve frekvenčním pásmu od 16Hz do 20 000Hz (20kHz), avšak jen za určitých podmínek. Mechanické vlnění mimo tento frekvenční rozsah sluchový vjem nevyvolá, přesto je toto vlnění označováno jako zvuk. Zvuky s frekvencí menší než je 16Hz označujeme jako infrazvuk a naopak zvuky jejichž frekvenční hodnota přesahuje hodnotu 20kHz označujeme jako ultrazvuk. [8]

Z fyzikálního hlediska musí mít každé mechanické vlnění nějaký zdroj. Není tomu jinak ani u zvuku. Iniciátor zvukové vlny se stručně nazývá zdroj zvuku, vodičem pak označujeme hmotné prostředí, ve kterém se vlnění šíří a díky němuž se zvuk dostane až k přijmači nebo také detektoru, kterým bývá v praxi ucho, snímač nebo mikrofon. Hmotným prostředím je zpravidla vzduch, ale může jím být i nějaká kapalina (voda) nebo pevná látka (ocel). Speciálním případem vodiče zvuku je vákuum, které tvoří dokonalou zvukovou izolaci a zvuk se v tomto prostředí nešíří. Zvuk v oblasti strojírenské diagnostiky pro nás může být indikátorem různých trhlin, vměstků, závad nebo jiného opotřebení. [1][8]

Mechanické vlnění se prostředím pohybuje rychlostí, kterou označujeme jako rychlost zvuku. Často se tímto termínem myslí rychlost zvuku ve vzduchu, a proto tato rychlost závisí na atmosférických podmínkách, zejména na teplotě, která je spjata s hustotou prostředí. V prostředí hustším se zvuk šíří rychleji a stejně je tomu tak u teploty, kdy při vyšších teplotách se šíří zvuk rychleji. Běžně uznávanou a referenční hodnotou rychlosti zvuku je rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě 25°C, která je $c=346,3\text{m/s}$. Budeme-li při výpočtech potřebovat rychlost zvuku při jiných podmínkách, budeme vycházet ze vztahu platného pro ideální plyny: [8]

$$c = \sqrt{k \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 + \frac{1}{2} \gamma t\right)} \quad (1.1)$$

p_0 tlak plynu při teplotě 0°C

ρ_0 hustota plynu

γ součinitel teplotní rozpínivosti plynu

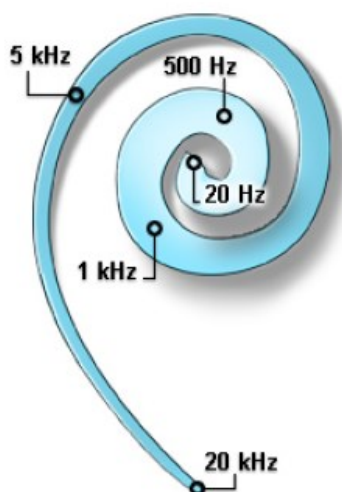
k Poissonova konstanta

Princip šíření zvukové vlny se v pevných látkách diametrálně neliší od principu šíření zvukové vlny v plynech. Avšak hodnota hustoty pevných látek několikanásobně převyšuje hodnotu hustoty plynů, a proto jsou i hodnoty rychlosti šíření zvukové vlny daleko vyšší (př. $c_{\text{ocel}}=5750\text{m/s}$ při hustotě $\rho_{\text{ocel}}=7850\text{kg/m}^3$).

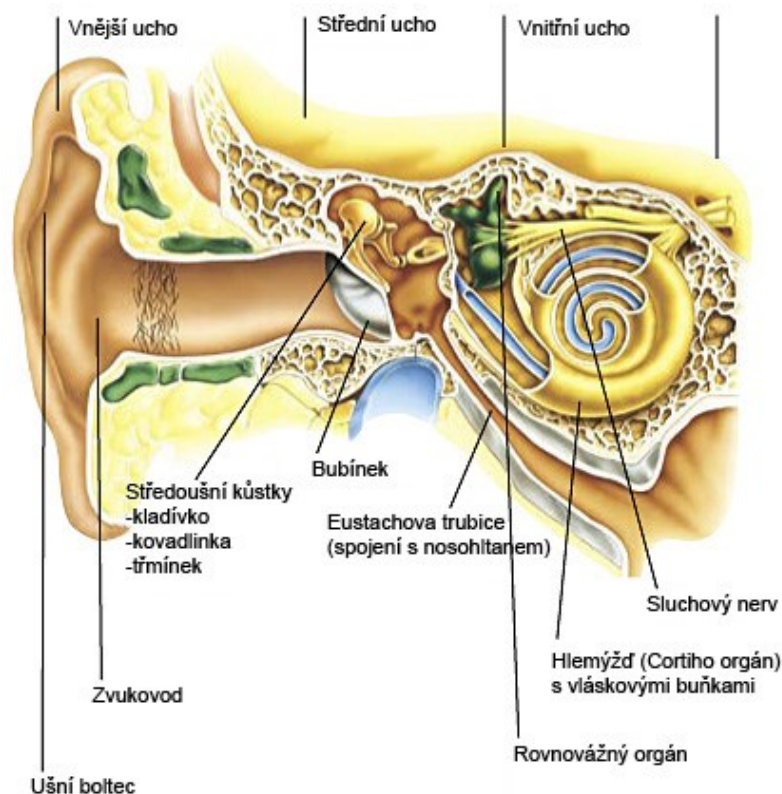
2. Lidské ucho

Lidské ucho, sloužící jako detektor zvuku se skládá z vnějšího, středního a vnitřního ucha (obr.2.2). Vnější ucho spojuje okolní prostor s bubínkem, který tvoří překážku ve zvukovodu. Toto spojení je kvalitní při frekvenci 800Hz a zůstává poměrně dobré i při vyšších frekvencích. Kvalita přenostu se výrazně zhoršuje při frekvencích nižších než 400Hz. U frekvencí nižších (800Hz), lidské ucho rozliší změnu $\pm 2,4\text{Hz}$, u vyšších frekvencí (12kHz) rozliší změnu $\pm 84\text{Hz}$. [1]

Pomocí středního ucha se chvění bubínku přenáší do ucha vnitřního, které představuje další odpor pro vedení zvuku. Amplitudy bubínku se transformují do mnoha menších vibrací a nervové vnímání těchto vibrací nastává podél basiální membrány ušního závitku, kterému se také říká hlemýžď. V této oblasti také dochází k frekvenční analýze zvuku. Tvar a amplitudu nervových pulsů vznikajících na podél basiální membrány jsou nezávislé na budící amplitudě zaznamenané membránou. Rozlišné frekvence jsou pak detekovány v různých vzdálenostech od oválného okénka. Maxima mají široký rozsah a čím má zvuk nižší frekvenci, tím větší je vzdálenost zachyceného maxima od vstupního oválného okénka (viz. Obr.2.1). [1][6]



Obrázek 2.1 Rozložení vláskových buněk



Obrázek 2.2 Stavba ucha

Precepce zvuku lidským uchem je možná ve frekvenčním pásmu 16Hz až 20 000Hz. Toto frekvenční pásmo slyšení je u každého jedince jiné a mění se s věkem a také se způsobem iniciace zvuku. Jak bylo zmíněno dříve, hodnoty kmitočtů mimo tyto vytyčené hranice nevyvolávají sluchový vjem, ale i přesto jsou označovány jako zvuk. Například zvuky s frekvencí nižší než 16Hz se nazývají infrazvuk a je možné je vnímat taktálně. Takto se projevuje například kvalitní basový reproduktor nebo jej využívají delfini pro dorozumívání. Naopak hodnoty nad 20kHz jsou označovány jako ultrazvuk. Ultrazvuk je využíván například v medicíně pro sonografii nebo ve strojírenství pro nedestruktivní zkoušení materiálu. Člověk tyto hodnoty již není schopen zachytit žádným přirozeným způsobem. Tato skutečnost však nevyvrací fakt, že hodnoty mimo pásmo slyšení mohou člověku způsobit zdravotní potíže a to dokonce smrtelné. Při vystavení organismu nízkým frekvenčním hodnotám (do 16Hz) po dobu 5 a více minut, může člověk pociťovat únavu, nevolnost nebo poruchy vidění. Při zvuku o frekvenci 2Hz a akustickém tlaku 186dB dochází k roztrhání plicních alveolů (plicních sklípků) a člověk je smrtelně ohrožen. [6]

3. Základní psychoakustické veličiny

3.1 Hladina akustického tlaku

Pohybem zvukové vlny akustickým prostředím vzniká akustický tlak, jež vytváří závislost na subjektivní veličině, kterou je hlasitost zvuku. Akustický tlak měřený v Pascalech je určen dle principu měření směrodatné odchylky tlaku vzduchu, která je při měření v krátkém časovém intervalu prakticky shodná se změnou akustického tlaku. Akustický tlak hraje hlavní roli při určování hlasitosti. Experimentálně bylo zjištěno, že člověk je schopen vnímat zvuk až od určitého tlaku, který byl označen za prahový. Při kmitočtu 1kHz byl tento práh stanoven jako $p_0=20\mu\text{Pa}$. Této hodnotě říkáme práh slyšitelnosti. Naproti práhu slyšitelnosti existuje také práh bolesti, který je přibližně 100Pa (140dB). [1][3]

S rostoucí vzdáleností klesá energie akustické vlny a akustický tlak logicky klesá. Hladina akustického tlaku (SPL-sound pressure level) je logaritmičtým vyjádřením velikosti tlaku vyvolaného měřeným zvukem v závislosti od prahového akustického tlaku p_0 .

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{p_1}{p_0} \quad (3.1)$$

Akustický tlak	Hladina akustického tlaku	Příklad
150dB	632Pa	• start tryskového letadla ve vzdálenosti 25m
140dB	200Pa	• start tryskového letadla ve vzdálenosti 50m
130dB	62,3Pa	• start tryskového letadla ve vzdálenosti 100m
120dB	20Pa	• hudební rockový festival
110dB	6,23Pa	• cirkulační kotoučová pila
100dB	2Pa	• sekačka na trávu
90dB	0,62Pa	• kuchyňský robot
80dB	0,2Pa	• popelářský vůz na ulici
70dB	0,062Pa	• zvonící mobilní telefon
60dB	0,02Pa	• běžný hovor
50dB	0,006Pa	• tichá řeč
40dB	0,002Pa	• hluk v knihovně
30dB	0,0006Pa	• tihý obývací pokoj

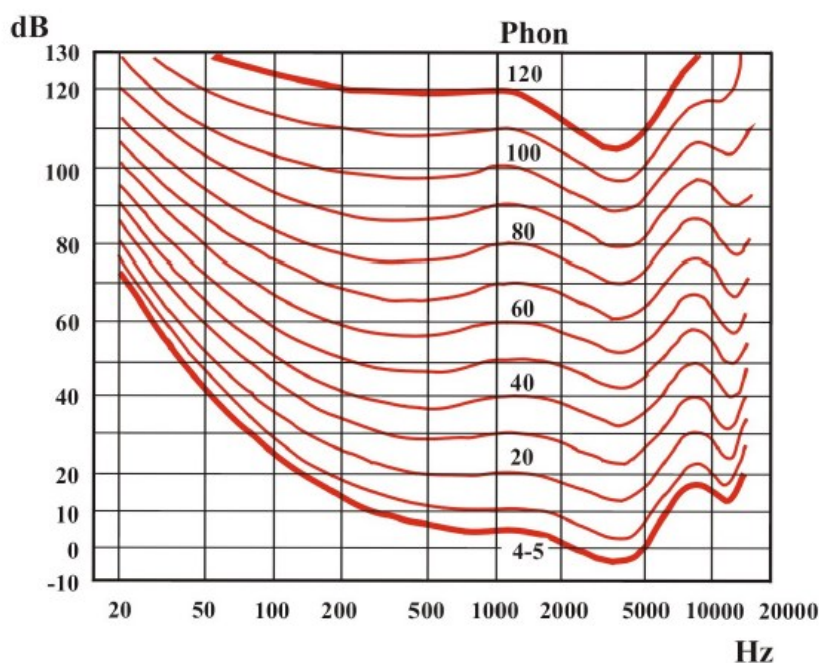
20dB	0,0002Pa	• šepot
10dB	0,00006Pa	• dýchání
0dB	0,00002Pa	• práh slyšitelnosti

Tabulka 3.1 Příklady hladin akustického tlaku

3. 2 Hladina hlasitosti

Určení hladiny hlasitosti je nelehkým úkolem, neboť na různých kmitočtech se zvuk zdá různě hlasitý, i přes shodnou úroveň SPL. Tento problém vedl k zavedení různých metod hodnocení hlasitosti, z čehož nejznámější metodou je hodnocení hlasitosti dle Weber-Frechnerova zákona.

Weber-Frechnerův zákon:



Obrázek 3.1 Křivka stejné hlasitosti (Weber-Frechnerova křivka)

Ernest Heinrich Weber (1795-1878) a Gustav Theodor Fechner (1801-1887) zformulovali zákon pro sluchový vjem, který stanovuje míru fyziologického vjemu, který je úměrný logaritmu míry jeho fyzikální příčiny. Jinak řečeno, stoupá-li popud, tj. fyzikální veličina (např. akustická intenzita), geometrickou řadou (po násobcích), stoupá sluchový vjem řadou aritmetickou (tj. vždy o určitou hodnotu).

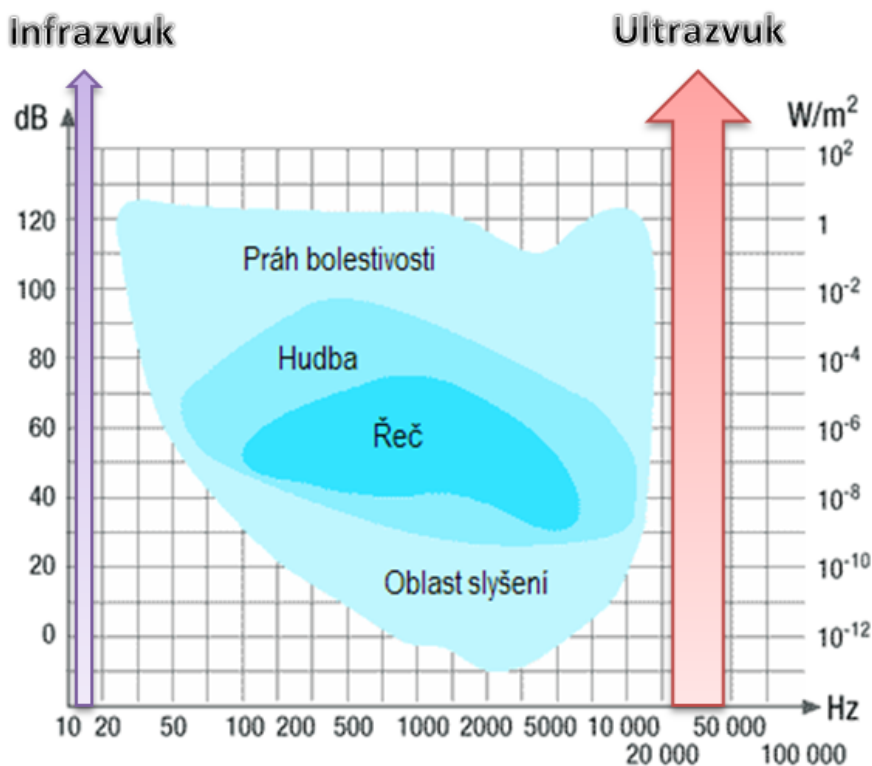
Hladina hlasitosti tónu o frekvenci 1kHz se rovná hladině akustického tlaku tedy

$$L_n = L_p \quad (3.2)$$

Tón o frekvenci 1kHz je definován jako referenční zvuk a pro ostatní frekvenční hodnoty je nutno stanovovat hladinu hlasitosti porovnáním s referenčním zvukem.

Otologicky normální osoba musí zvuk o frekvenci jiné než je frekvence 1kHz slyšet stejně hlasitě, jako zvuk referenční. Této podmínky můžeme docílit tak, že intenzitu zvuku při zkoumané frekvenci buď zesílíme nebo zeslabíme podle citlivosti lidského ucha. Grafickým řešením této transformace je pak Barkhausenova křivka stejné hlasitosti (obr.3.1). Tyto křivky jsou zároveň křivkami citlivosti lidského sluchového orgánu a podél těchto křivek je hladina hlasitosti konstantní. [5][1][6]

Na základě Weber-Frechnerova zákona vznikl graf (obr.3.2) vymežující oblast sluchového pole. Tyto oblasti jsou jak závislostí frekvenčních hodnot, hodnot akustického tlaku, tak i hodnot akustické intenzity.



Obrázek 3.2 Oblasti sluchového pole

3. 2. 1 Jednotky hlasitosti

Bezrozměrnou jednotkou subjektivní hladiny hlasitosti je Phone (Ph). Díky této jednotce určujeme vnímanou hlasitost tónu a to bez vlivu frekvenční charakteristiky na tento tón. Hodnota 1Ph je rovna hodnotě 1dB(SPL) při kmitočtu 1kHz.

Další jednotkou, kterou využíváme pro měření hlasitosti je jednotka Sone. Sone je jednotka pro subjektivní nímání hlasitosti definována Stanley Smithem Stevensem v roce 1936. Při kmitočtu 1kHz představuje 1Sone hodnotu 40dB (SPL) a na rozdíl od dB se jedná o jednotku lineární. Hodnota Sone je definována tak, že přibližně při zdvojnásobení Sonu je posluchačem vnímán zvuk jako dvojnásobně hlasitý. Tento fakt vychází ze dvou metod, které určují přímý vztah mezi SPL a vnímanou hlasitostí. Tyto metody jsou:

- **Metoda odhadu rozsahu**

Jsou produkovány zvuky o různých hodnotách SPL, přičemž našim úkolem je přiřadit jim hodnotu hlasitosti a to na základě našeho vnímání a našich pocitů.

- **Metoda produkce**

Hodnotu SPL upravujeme dokud neodpovídá zadaným hodnotám hlasitosti.

Na základě těchto dvou metod S. S. Stevens navrhl, že hlasitost (L) je funkcí intenzity (I):

$$L = k_l I^{0,3} \chi \quad (3. 3)$$

k_l [-] konstanta závislá na použitých jednotkách a měřícím subjektu

Jinými slovy hlasitost daného zvuku je úměrná jeho intenzitě nebo lépe je tlak funkce intenzity umocněný na 0,3. [6]

3. 2. 2 Způsoby hodnocení hlasitosti

Díky těmto výzkumům a experimentům můžeme v současnosti celkovou hladinu hlasitosti klasifikovat za použití dvou způsobů (metod), které jsou normalizovány normou ČSN ISO 532:

- **Metoda A**

Tato metoda výpočtu hlasitosti je dána vztahem a grafem (tabulkou), který udává pravidlo pro kombinaci indexů hlasitosti na získání celkové hlasitosti. Z grafu získáme indexy hlasitosti každého pásma, které nám pomohou při výpočtu celkové hlasitosti v sonech dle vztahu:

$$L = S_m + F \left(\sum S - S_m \right) \quad (3.4)$$

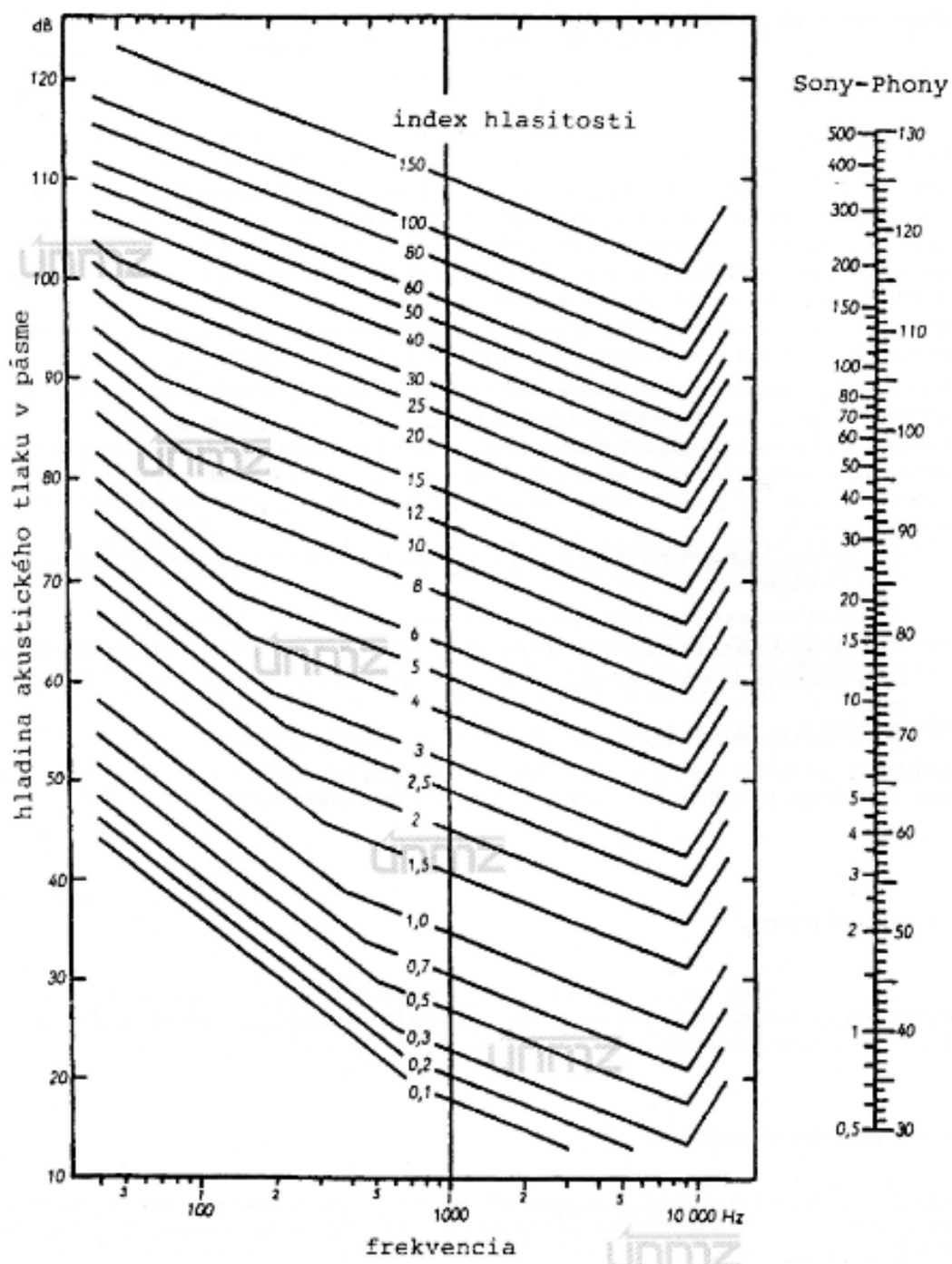
S_m nejvyšší index hlasitosti

ΣS suma indexů hlasitosti ze všech pásem

F konstanta: F=0,3 (oktávová pásma)

F=0,15 (třetinooktávová pásma)

Graf pro určení indexů hlasitosti:



Obrázek 3.3 Graf indexů hlasitosti

Výhodou metody A je její jednoduchost a to, že je specifikovaná pro zvuk, které se vyskytují v praxi.

- **Metoda B**

Výpočet hladiny hlasitosti metodou B je založen na souboru 11 grafů, z nichž určujeme hlasinu hlasitosti v sonech nebo phonech. Metoda je relativně složitá a méně používaná. [4]

3.3 Hladina akustické intenzity

Akustická intenzita je definována jako tok akustické energie v daném směru plochou, která je kolmá k tomuto směru. Jednotkou akustické intenzity je pak W/m^2 .

$$I = \frac{p^2 \cdot S}{z_0} \quad (3.5)$$

z_0 vlnová impedance (vlnový odpor) prostředí jehož jednotkou je $Pa \cdot m/s$

$$z_0 = c \cdot \rho \quad (3.6)$$

Díky tomuto vztahu můžeme dále vypočítat hodnotu hladiny akustické intenzity v dB. Hladina akustické intenzity je desetinásobkem dekadického logaritmu podílu akustické intenzity vyzařované zkoušeným zdrojem a její referenční hodnoty. I_0 je mezinárodně stanovená referenční hodnota akustického tlaku rovna hodnotě $10^{-12}W/m^2$. [1][3]

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (3.7)$$

$I_0=10^{-12}W/m^2$ mezinárodně stanovená referenční hodnota akustického tlaku

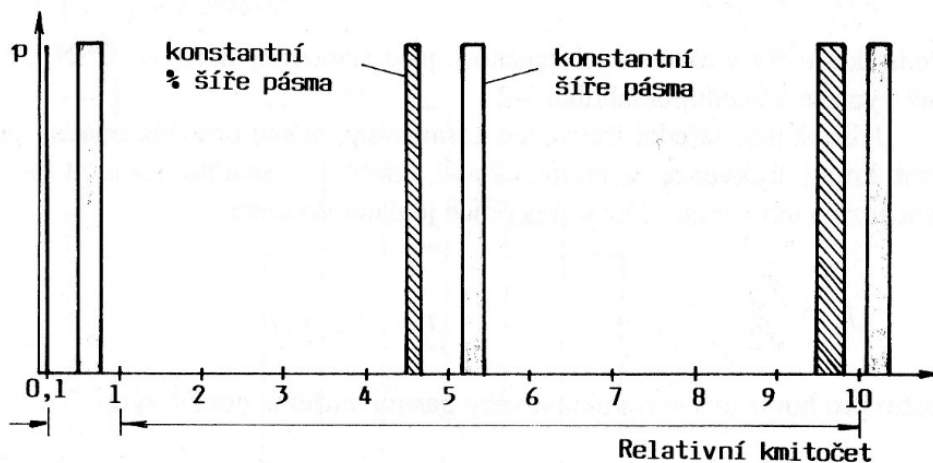
4. Kmitočtová pásma

Častou oblastí zájmu při měření hluku je amplituda, kterou dosahuje zvuk na určitých kmitočtech nebo v určitém kmitočtovém pásmu. Rozložení zvuku do požadovaných pásem můžeme dosáhnout za pomoci akustických filtrů. Tyto filtry propustí od mikrofону do vyhodnocovacího přístroje pouze signály daného frekvenčního spektra. [1]

4.1 Kmitočtová analýza

V praxi se používají dva typy kmitočtové analýzy:

- **Analýza s konstantní šíří pásma**
 - nezávisí na středním kmitočtu pásma
 - používáme pro analýzu stroje vyzařující čistý tón
 - zjišťujeme diskrétní složky
- **Analýza o procentuálně konstantní šíří pásma**
 - propustnost šíře pásma je procentuálně konstantní vzhledem ke střednímu kmitočtu v pásmu
 - používáme pro zjišťování celkové hlučnosti (obvykle není nutností znát spektra s úrovní diskrétních složek)



Obrázek 4.1 Rozdíl mezi konstantní a procentuálně konstantní šíří pásma propustnosti

4.2 Oktávové pásmo

Pásmo slyšitelnosti rozdělujeme do 11-ti oktáv, kde každé kmitočtové pásmo o šíři jedné oktávy charakterizuje poměr krajních frekvencí, které vymezují oktávu:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \quad (4.1)$$

Každou oktávu označujeme střední frekvencí f_m , kterou lze určit ze vztahu:

$$f_m = \sqrt{f_1 f_2} \quad (4.2)$$

Za pomoci předchozích vztahů můžeme zjistit krajní frekvence v dané oktávě a to díky normování středních kmitočtů v oktávových pásmech (ČSN 35 6870). Dolní frekvence pásma tedy bude :

$$f_1 = \frac{f_m}{\sqrt{2}} \quad (4.3)$$

horní frekvence pásma pak:

$$f_2 = f_m\sqrt{2} \quad (4.4)$$

Norma (ČSN 35 6870) předepisuje střední oktávové a 1/3 oktávové kmitočty pro měření v akustice takto

Střední kmitočty v pásmu			Střední kmitočty v pásmu			Střední kmitočty v pásmu		
	1/1 okt.	1/3 okt.		1/1 okt.	1/3 okt.		1/1 okt.	1/3 okt.
25		X	250	X	X	2500		X
31,5	X	X	315		X	3150		X
40		X	400		X	4000	X	X
50		X	500	X	X	5000		X
63	X	X	630		X	6300		X
80		X	800		X	8000	X	X
100		X	1000	X	X	10000		X
125	X	X	1250		X	12500		X
160		X	1600		X	16000	X	X
200		X	2000	X	X	20000		X

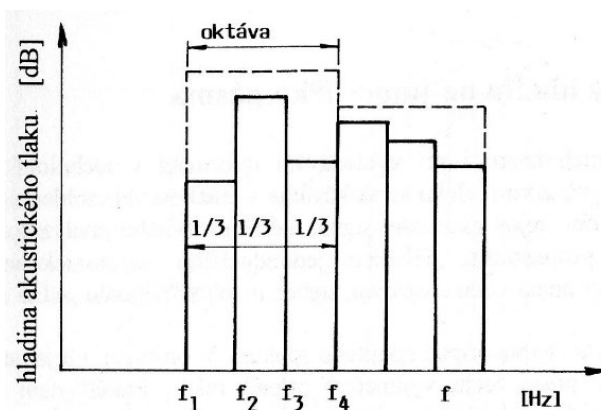
Tabulka 4.1 Střední oktávové a 1/3okt. kmitočty [Hz] pro měření v akustice

Jak je vidno z tabulky, tak šíře oktávového pásma se zvyšuje se středním kmitočtem.

U oktávového pásma se často využívá kmitočtové analýzy s procentuelně konstantí šíří pásma. [1][8]

4.3 Třetinooktávové pásmo

Třetinooktávové pásmo získáme tak, že oktávové pásmo rozdělíme na tři třetiny (v logaritmických stupnicích).



Obrázek 4.2 Třetinooktávové pásmo

Pokud budou frekvence f_1 a f_4 krajními frekvencemi jedné oktávy a f_2 , f_3 krajními frekvencemi vnitřní třetinové oktávy, musí platit následující vztah:

$$\log \frac{f_2}{f_1} + \log \frac{f_3}{f_2} + \log \frac{f_4}{f_3} = \log \frac{f_4}{f_1} = \log 2 \quad (4.5)$$

z čehož vyplývá, že poměr krajních kmitočtů v libovolné třetině oktávy je konstantní:

$$\frac{f_4}{f_3} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2} \approx 1,26 \quad (4.6)$$

Zásadu o konstantnosti poměrů krajních kmitočtů v oktávě či 1/3 oktávě můžeme uplatnit i při výpočtech středních kmitočtů v daném pásmu. Kontrolou je pak tabulka výše. V případě potřeby, můžeme oktávu dělit na šestiny, dvanáctiny nebo dokonce dvacetičtvrtiny šířky základního pásma. [1][8]

4.4 Přepočty hladin na jinou šířku pásma

Při měření hluku se můžeme setkat s problémem, že budeme potřebovat získat analyzátozem naměřené hodnoty v jiné šířce pásma propustnosti. Často vyhodnocujeme spojitě spektrum a pokud není toto spektrum frekvenčně nezávislé, mohou nastat dva případy:

- a) jsou známy hladiny dané šířky pásma a chceme získat frekvenční rozsah daný součinitelem tohoto pásma. V tomto případě využijem intenzity zvuku:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (4.7)$$

- a hladinu akustického tlaku v 1/3 oktávových pásmech pro přepočítání na hladinu akustického tlaku v oktávovém pásmu:

$$L_p = 10 \log(10^{0,1L_{p1}} + 10^{0,1L_{p2}} + 10^{0,1L_{p3}}) \quad (4.8)$$

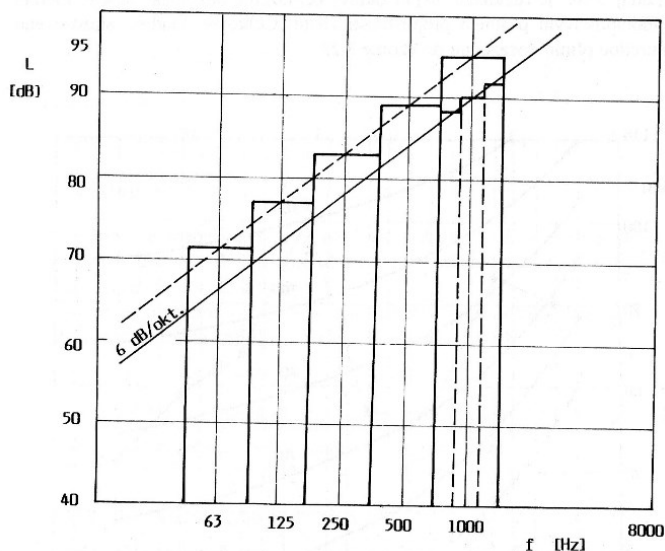
L_{p1}, L_{p2}, L_{p3} [dB]..... hladiny v jednotlivých třetinách oktávy

- b) známe hladinu hluku v dané šířce kmitočtového pásma a zajímají nás hodnoty hladin uvnitř tohoto pásma. Tento problém je podstatně složitější a je řešitelný za předpokladu, že jsme schopni určit či odhadnout směrnici určenou sklonem spojitého spektra. Za předpokladu, že známe hladinu v první třetině oktávy L_{p1} a směrnici sklonu S , potom hladiny akustického tlaku v druhé a třetí třetině oktávy vypočítáme z rovnic:

$$L_{p2} = L_{p1} + \frac{S}{3} \quad (4.9)$$

$$L_{p3} = L_{p1} + \frac{2S}{3} \quad (4.10)$$

S [dB/okt] směrnice sklonu spektra



Obrázek 4.3 Přepočítání hladin v oktávových pásmech

Pro získání celkové hladiny v oktávě na hladině v první 1/3 oktávovém pásmu a směrnici použijeme tento vztah:

$$L_p = L_{p1} + 10 \log(1 + 10^{\frac{S}{30}} + 10^{\frac{2S}{30}}) \quad (4.11)$$

Při odhadech hladin akustického tlaku v užších pásmech budeme postupovat principiálně stejným způsobem. [1]

4.5 Kritická (Barkova) pásma

Každý z nás dokáže rozlišit tón zahraný na flétnu a tentýž tón zahraný na kytaru. Frekvenčně jsou tyto dva tóny naprosto totožné a i přesto je rozlišíme. Lidské ucho totiž nerozeznává pouze hlasitost a výšku zvuku ale také zabarvení, které záleží na harmonickém složení zvuku. Proběhlo spousta měření a výpočtů, aby bylo možno tento efekt začlenit do procesu měření. Roku 1961 Eberhard Zwicker prokázal existenci jistých kritických pásem frekvencí a také příbuzenství těchto pásem s vibračními maximy na basiální membráně hlemýždě. Tato kritická pásma byla pojmenována po Heinrichu Barkhausenovi, který jako první provedl měření hlasitosti. [1]

Na základě výzkumů, výpočtů a nových poznatků byl hlavní rozsah slyšitelných kmitočtů rozdělen do 24 kritických (barkových) pásem jejíž jednotkou je 1Bark. Jedno kritické pásmo odpovídá vzdálenosti 1,3mm podé basiální membrány a rozsah tohoto pásma je hlasitost zvuku úměrná efektivní hodnotě akustického tlaku, zatímco hlasitost rozličných pásem se sčítá dohromady dle jakéhosi schémata.

Kritické pásmo	Střední kmitočet [Hz]	Šířka pásma [Hz]	Kritické pásmo	Střední kmitočet [Hz]	Šířka pásma [Hz]	Kritické pásmo	Střední kmitočet [Hz]	Šířka pásma [Hz]
1	50	10000	9	1000	160	17	3400	550
2	150	100	10	1170	190	18	4000	700
3	250	100	11	1370	210	19	4800	900
4	350	100	12	1600	240	20	5800	1100
5	450	110	13	1850	280	21	7000	1300
6	570	120	14	2150	320	22	8500	1800

7	700	140	15	2500	380	23	10500	2500
8	840	150	16	2900	450	24	13500	3500

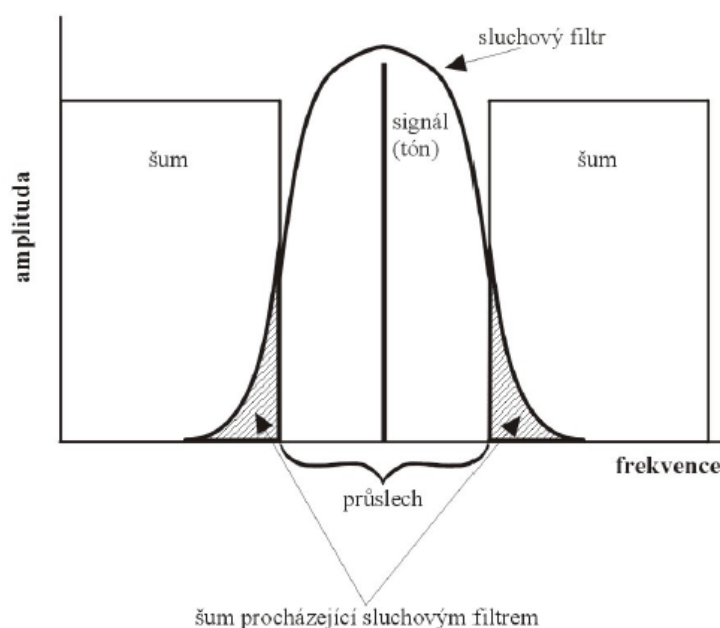
Tabulka 4.2 Kritická barkova pásma

Tvar spektra akustického signálu určuje barvu zvuku. Po provedení fourierovy analýzy získáme pro různé signály různé složení vyšších harmonických vln, které určují barvu zvuku. S rozdělením frekvencí do barkových pásem se maskovací účinek zvuku stal konstantní v celém rozsahu pásma. Barkova stupnice je stejně jako lidské ucho nelineární a pro přepočítání hertzů (Hz) na barky musíme využít následujícího vztahu:

$$KP(\text{kritické pásmo}) = 13 \operatorname{atan}\left(0,76 \frac{f}{1000}\right) + 3,5 \operatorname{atan}\left(\left(\frac{f}{1000}\right)^2\right) \quad (4.12)$$

Nevýhodou barkových pásem je příliš hrubé rozlišení v nízkých frekvencích a také rázy mezi tónem a šumem. [1]

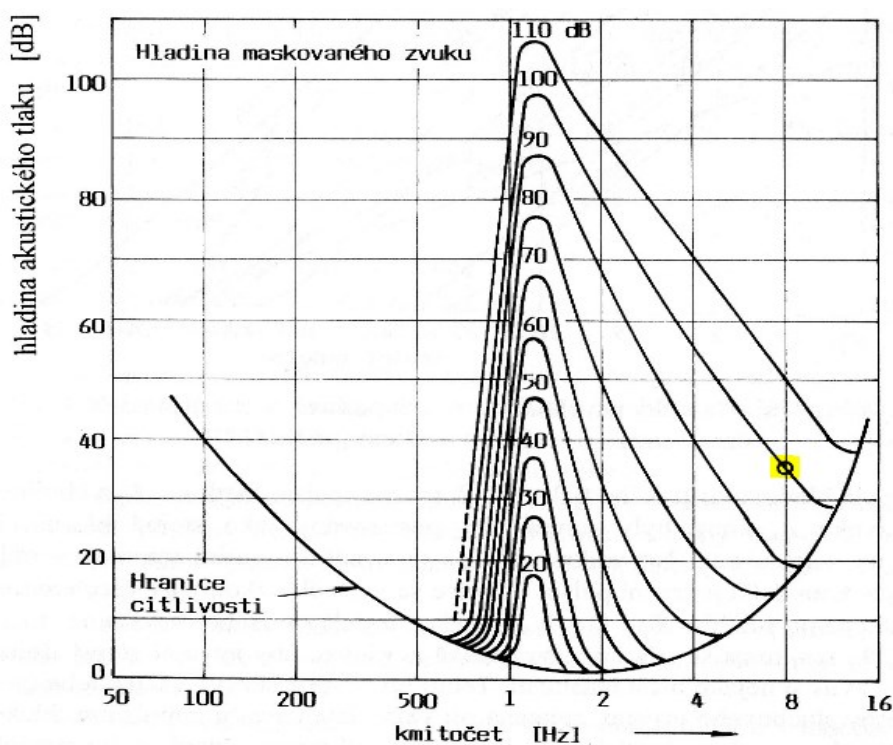
Barkova pásma nejsou jediná definovaná kritická pásma. K dispozici máme také ERB (equivalent rectangular bandwidth) pásma, jejichž princip měření je založen na měření pomocí nespojitého šumu. U ERB pásem zkoumáme práh detekce signálu tónu v závislosti na šířce průslechu. Na rozdíl od barkových kritických pásem jsou ERB pásma efektivnější v nízkých frekvencích. [6]



Obrázek 4.4 Kritická ERB pásma

5. Maskovací účinek zvuku

Opět si představme nějaké hudební těleso, kterým může být kupříkladu rocková kapela. Každá dobrá rocková kapela má dva kytaristy. Když oba kytaristé zahrají ve stejnou dobu stejný akord, přičemž jeden kytarista zahraje akord silněji, zvuk vyluzován druhou kytarou bude zastřen. Obecně tedy platí, že slabé zvuky jsou překryty zvuky silnějšími. Tomuto efektu říkáme maskovací efekt. Maskovací efekt se vysvětluje jako posunutí prahu slyšení způsobené silnějším zvukem a jeho velikost závisí na rozdílu frekvencí mezi oběma zvuky. Okolo frekvence maskujícího tónu je posunutí prahu slyšení největší a je rozdílné pro širokopásmové zvuky a pro tóny čisté. Posunutí prahu slyšení způsobeno maskovacím efektem s ohledem na velikost hladiny akustického tlaku a kmitočtu je znázorněna v následujícím grafu (dle Zwickera). [1]



Obrázek 5.1 Maskovací účinek úzkopásmového zvuku o středním kmitočtu 1,2kHz a různé hladině akustického tlaku (podle Zwickera)

Na obrázku je vyznačen tón (žlutá oblast) o kmitočtu 8kHz a hladině akustického tlaku 35dB. Pokud budeme chtít aby tento tón nebyl maskován, musí mít tón, například o frekvenci 1,2kHz, hladinu akustického tlaku nižší než 100dB. Jak vyplývá z grafu, tóny s kmitočtem 1,2kHz maskují především tóny o vyšší frekvenci. [1]

S maskovacím účinkem úzce souvisí odraz zvuku od překážky neboli ozvěna. V závislosti na vzdálenosti překážky a akustických vlastnostech prostředí může mít zvuková odezva různou hodnotu zpoždění:

- **Do 50ms**: oba zvuky splynou v jeden bez jakéhokoliv rušení
- **50ms – 100ms**: dojde ke směšování zvuku což má za následek snížení srozumitelnosti
- **Nad 100ms**: zvuky jsou vnímány odděleně

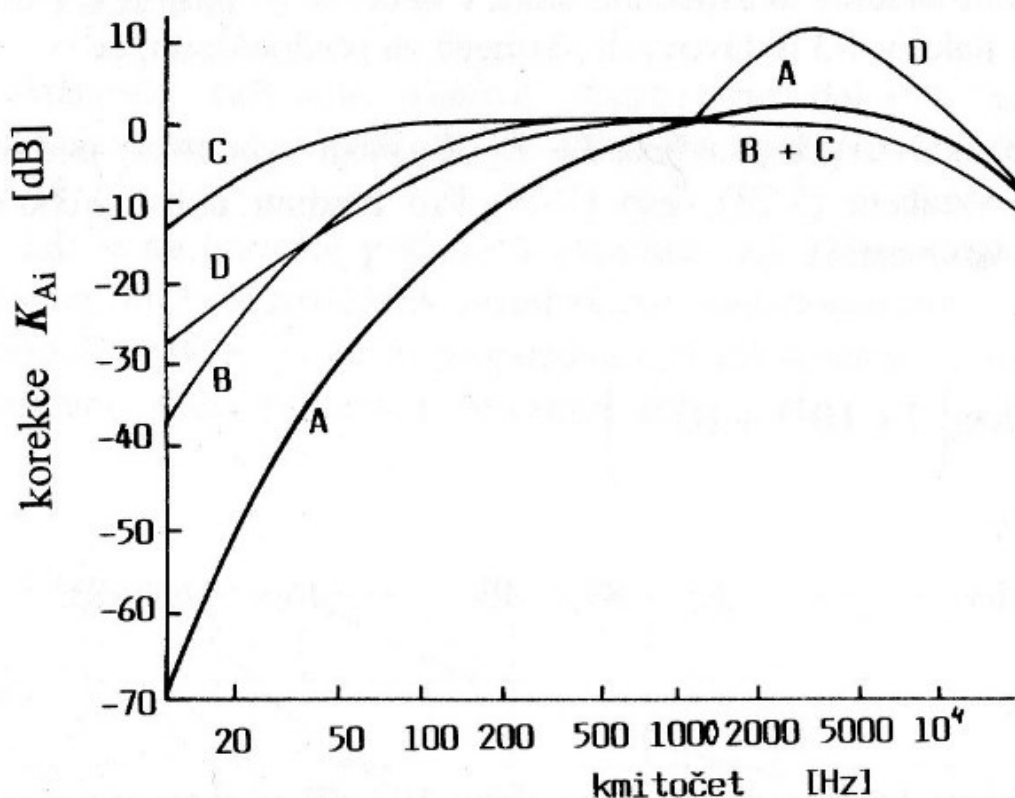
6. Váhové filtry

Všeobecně má lidský sluch při různých frekvencích různou citlivost a proto dochází ke zkreslenému vnímání zvuku. Tento fakt vedl vědce a odborníky ke snaze vymyslet jakýsi univerzální filtr, který by byl schopen ke každé skutečně změřené hladině zvuku přičíst příslušnou korekci a přepočítat tak hladinu zvuku tak, jak ji vnímá lidský sluch. Jednalo by se v podstatě o zohlednění křivek konstantní hlasitosti, a tedy vyhodnocení hluku v podobě, v jaké ji člověk vnímá. [2][6]

V současnosti se pro běžná měření používají čtyři váhové filtry, které značíme A, B, C a D, ale ani jeden z těchto filtrů není zcela univerzálním nástrojem, který bychom mohli používat pro všechny případy.

V mezinárodním měřítku se nejčastěji používá váhový filtr typu A, který je aproximací křivek stejné hlasitosti pro oblast nízkých hladin akustického tlaku. Váhový filtr typu A nejlépe vystihuje fyziologii lidského ucha a výsledné hodnoty hladin hluku u tohoto váhového filtru dávají lepší korelace než filtry B,C a D. Váhový filtr tohoto typu byl zaveden do akustických výpočtů a byl legalizován vyhláškou č. 13/1977 Sb. Důvodem sepsání této vyhlášky bylo hodnocení hlukové expozice lidí na pracovištích, v bytech, školách i jiných oblastech komunální hygieny. Váhový filtr typu A se používá také u hlukoměrů a jiných měřících přístrojů. V letecké dopravě využíváme hlavně váhový filtr typu D.

Útlumová charakteristika váhových filtrů je pak dána grafem v závislosti na korekci K_{Ai} a hodnotě kmitočtu. [2][6]



Obrázek 6.1 Útlumová charakteristika různých kmitočtových filtrů

Pro váhový filtr typu A jsou tabelovány korekce závislé na středním kmitočtu v oktávovém (třetinooktávovém) pásmu v decibelech. Tabulka korekcí vyplývajících z grafu pro filtr typu A, B i C je uveda v příloze (Příloha č.1). [2][6]

Jak je patrné z grafu korekce u jednotlivých váhových filtrů je rovna nule v blízkosti kmitočtů 1000Hz a to z důvodu, že lidský sluch je v oblasti tohoto kmitočtu nejcitlivější.

Ze známých hladin lze následně pro dané pásmo přepočítat hladinu zvuku s vlivem korekcí, tzn. hladinu, kterou skutečně vnímá lidský sluch. Např. pro hladinu akustického tlaku váženou filtrem typu A platí rovnice:

$$L_{pA} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{pi} + K_{Ai}}{10}} \quad (6.1)$$

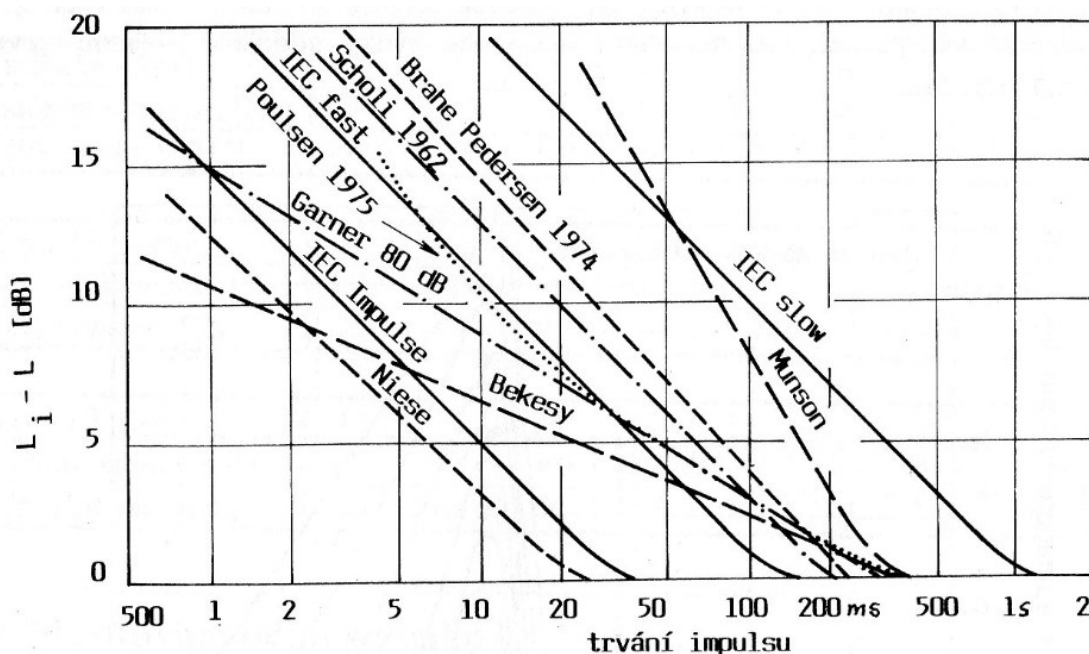
L_{pi} [dB] hladina akustického tlaku v příslušném pásmu

K_{Ai} [dB] korekce závislá na středním kmitočtu v oktávovém (třetinooktávovém) pásmu

Pokud při měření nebo výpočtech provedeme vážení jakýmkoliv typem váhového filtru (A, B, C nebo D), je nutné tuto korekci označit ve výsledném grafu nebo v označení číselného výsledku!

7. Hlasitost impulsních tónů

Současná akustika předpokládá, že lidské ucho integruje akustickou energii dopadající na sluchový orgán v určitém časovém úseku. A priori ucho reaguje na průměrnou akustickou energii za určitý čas. Akustickou energii změřit umíme, ale složitější je to s efektivním časem, kdy ucho zachytí zvukovou energii, zpracuje ji a pak na ní jako na průměrnou hodnotu za tento čas reaguje. Bylo provedeno spoustu psychoakustických experimentů spoustou psychoakustických expertů. Výsledkem jejich pokusů s impulsním zvukem jsou pak tyto křivky, kde u jednotlivých křivek jsou jména autorů výsledné křivky. [1]



Obrázek 7.1 Výsledky psychoakustických pokusů s impulsními zvuky prováděné různými autory

Na svislé ose jsou hodnoty hladin akustického tlaku $L_i - L$, přičemž L_i je impulsní hladina a L je hladina stálého zvuku, která byla subjektivně považována za konstantní. Na

vodorovné ose je vyneseno trvání impulsního zvuku v milisekundách. Jak je z grafu patrné, čím delší je čas trvání impulsu tím se výsledky více autorů blíží skutečnému rozdílu $L_i - L = 0$. Aby v nás krátký impuls (do 200ms) vyvolal stejný dojem jako stálý zvuk o nižší hodnotě, musí se síla impulsu značně zvyšovat. S tímto jevem se setkáváme běžně v praxi, například v kovárnách, kdy jsou kladivem produkovány krátké, ale velice silné a intenzivní impulsní zvuky, které jsou pro lidský sluch velice nebezpečné. Sluchový aparát je citlivý nelineární orgán, jehož funkce je podmíněna spoustou fyzikálních, psychologických a také psychoakustických faktorů, proto nebyl dosud zjištěn efektivní průměrný čas ucha. [1]

8. Měření

Měření je jakýmsi kvantitativním zkoumáním vlastností předmětů, jevů a procesů, které má právě v oblasti akustiky a vibrací obrovský význam, jelikož právě měřením můžeme předejít různým ujším na zdraví jako je například stráta sluchu. Měření je složitý proces a obzvláště měření psychoakustických veličin, jelikož do kvantitativních výsledků je třeba vnést jakési faktory abstraktní.

8.1 Princip měření a zpracování akustických veličin

I přesto, že měření každé veličiny může probíhat jinak a postupy mohou být rozdílné, můžeme obecné postupy měření a zpracování akustických veličin demonstrovat na příkladu měření akustického tlaku nebo hlasitosti:

- 1) Akustický tlak působící na čidlo (hlukoměr), jehož součástí je snímač, na něm vyvolá v reálném čase odezvu úměrnou tomuto působení.
- 2) Nyní dochází k převodu snímané akustické veličiny na jinou, se kterou jsme dále schopni pracovat a kterou jsme schopni zpracovávat. Tento převod je proveden v druhé části snímače, v takzvaném měniči. Převedenou veličinou je ve většině případů elektrické napětí U [V].
- 3) Napěťový signál je nyní převeden na vstup analyzátoru, kde je zesílen a ošetřen řadou filtrů. Nejčastěji se jedná o filtry typu Low Pass (LP), High Pass (HP), Band Pass

(BP), aliasingové filtry, filtry stejnosměrných složek napětí a subsonických kmitočtů nebo jiné. Úprava napěťového signálu filtry závisí na námi požadovaných získaných veličinách a následném nastavení samotné analýzy.

- 4) V případě zpracování signálu moderním analyzátozem, je již v této fázi signál převzorkován a převeden do digitální podoby. Následuje provedení předem zvolené analýzy, výčet získaných dat a vykreslení grafických vstupů.

V případě starších hlukoměrů je signál stále v analogové podobě rozdělen na potřebný počet větví a následně filtrován oktávovými nebo třetinooktávovými analogovými filtry. Před tyto filtry je zařazen obvod pro vážení signálu akustickými váhovými filtry (A, B, C, D) a je jen na uživateli zdali tyto váhové filtry aktivuje či deaktivuje.

- 5) Na konci každé váhově upravené a odfiltrované signálové cestě následuje analogově/digitální (A/D) převodník.

Hladiny akustických tlaků v jednotlivých pásmech jsou nyní dle potřeby uživatele zobrazeny na přístroji. Po aktivaci součtového zesilovače může být také zobrazena hladina celková. [2]

8. 1. 1 Zvukoměry

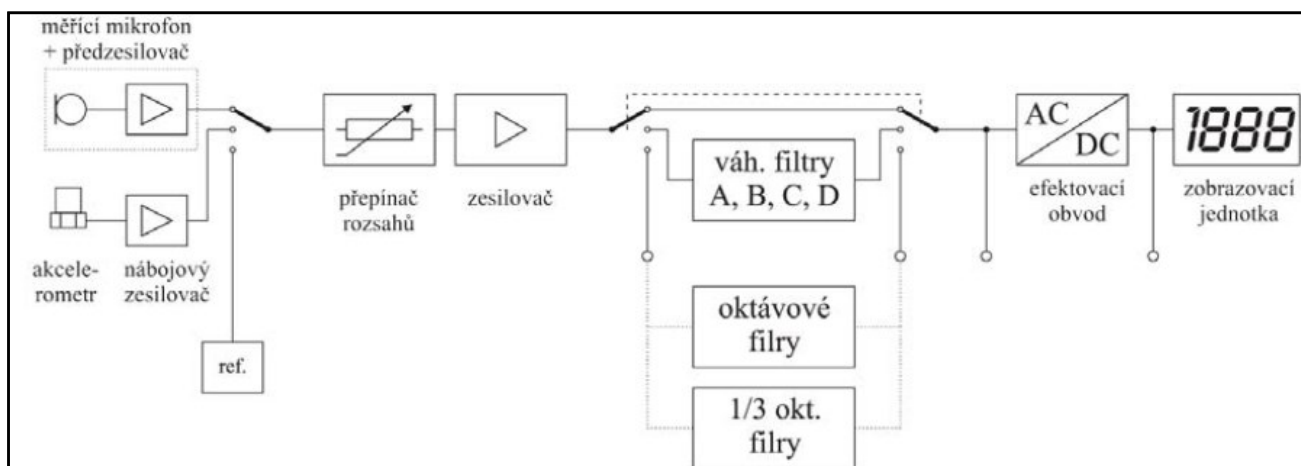
V dnešní moderní době existuje nespočet firem vyrábějící přenosné hlukoměry, jednou z nejznámějších je Dánská firma Brüel & Kjær zabývající se hlukem a vibracemi. Spusta zvukových specialistů se však v současnosti uchyluje k používání počítačů a vhodných softwarů. [2]

Některé typy zvukoměrů:



Obrázek 8.1 Různé typy hlukoměrů

Blokové schéma jednoho z typu zvukoměrů, na kterém můžeme vidět i postup a průběh dříve zmiňovaného měření akustického tlaku vypadá takto



Obrázek 8.2 Blokové schéma zvukoměru

8. 1. 2 Snímače akustických veličin

Nejčastěji provádíme měření akustického tlaku, který je snímán akusticko-elektrickými měniči, které nazýváme mikrofony. V důsledku principu čidel jimiž jsou osazeny mikrofony, dělíme mikrofony na dvě základní skupiny, a to na elektrodynamické a kondenzátorové. Naše měření bylo provedeno kondenzátorovým mikrofonem značky Brüel & Kjær – Type 4189A.

- **Mikrofony elektrodynamické**

- Požíváme je pro orientační měření díky jejich nevyrovnané frekvenční a směrové charakteristice.
- Čidlo mikrofону je tvořeno speciální pružnou membránou, která funguje na principu výchylky způsobené v důsledku změny akustického tlaku.



Obrázek 8.3 Elektrodynamický mikrofón (Shure SM58)

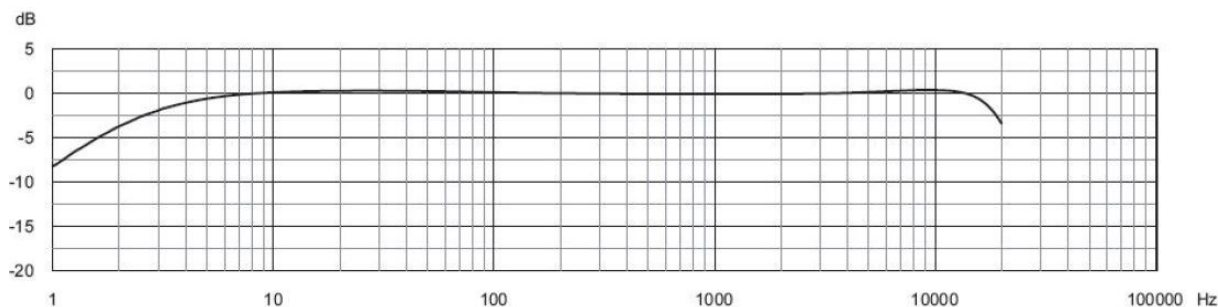
- **Mikrofony kondenzátorové**

- Používáme je v měřicích přístrojích díky jejich velice vyrovnané frekvenční charakteristice.
- Nevýhodou kondenzátorových mikrofónů je jejich snížená citlivost, což je řešitelný problém.



Obrázek 8.4 Kondenzátorový mikrofón (Brüel & Kjær type 2671)

Schématické znázornění a základní charakteristiky takového kondenzátorového polarizovaného mikrofónu pak vypadá nějak takto:



Obrázek 8.5 Graf charakteristiky kondenzátorového polarizovaného mikrofonu

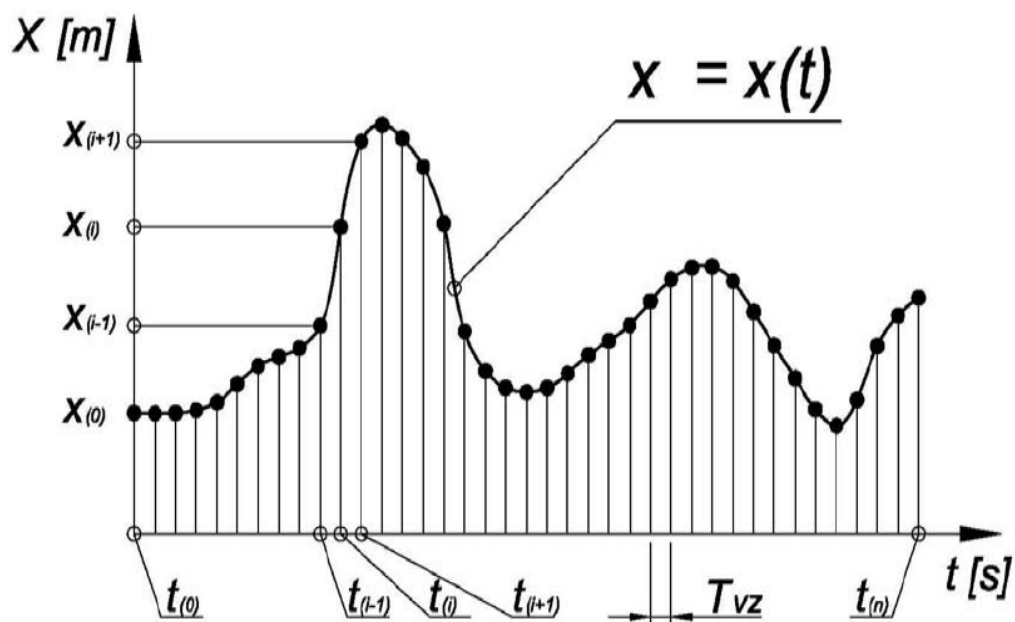
Před naším měřením, stejně jako před každým měřením, jsme provedli kalibraci mikrofonu a to tak, že jsme mikrofon umístili do speciální komůrky, která produkuje zvuk o předem známé hodnotě akustického tlaku. Na základě této kalibrace jsme provedli úpravu převodní konstanty mikrofonu. [2]

Kromě akustického tlaku můžeme akustickými snímači měřit i jiné veličiny a to například akustickou intenzitu. Pro měření této veličiny byla vyvinuta speciální sonda, takzvaná sonda akustické intenzity. Další měřitelnou veličinou může být akustická rychlost, pro jejíž měření jsou zapotřebí dva mikrofony, mezi kterými pak provádíme podíl změny akustických tlaků. [2]

8. 2 Zpracování signálu

Jak jsme si popsali již dříve, na výstupu mikrofonu získáváme elektrické napětí, které je za pomoci známé konstanty úměrné akustickému tlaku. Většina měřených zvuků, převedených na elektrický signál je složitá a my nejsme schopni ji popsat funkcí. Musíme tedy zvolit jiný přístup, jak získané výsledky zapsat a následně uchovat a to přístup diskrétní.

Provedem vzorkování časového průběhu a to tak, že zvolíme velice malý časový krok (signál časově rozsekáme na velice mnoho malých časových úseků), po kterém se vždy zapíše okamžitá hodnota akustického tlaku. Časový krok volíme dle možností měřicího zařízení a dle potřeb. Vzorkování je zároveň přechodem z analogové do digitální části zpracování. Výsledkem je tabulka hodnot, kde každé časové hodnotě ze vzorkovací časové řady přísluší právě jedna hodnota měřeného signálu.

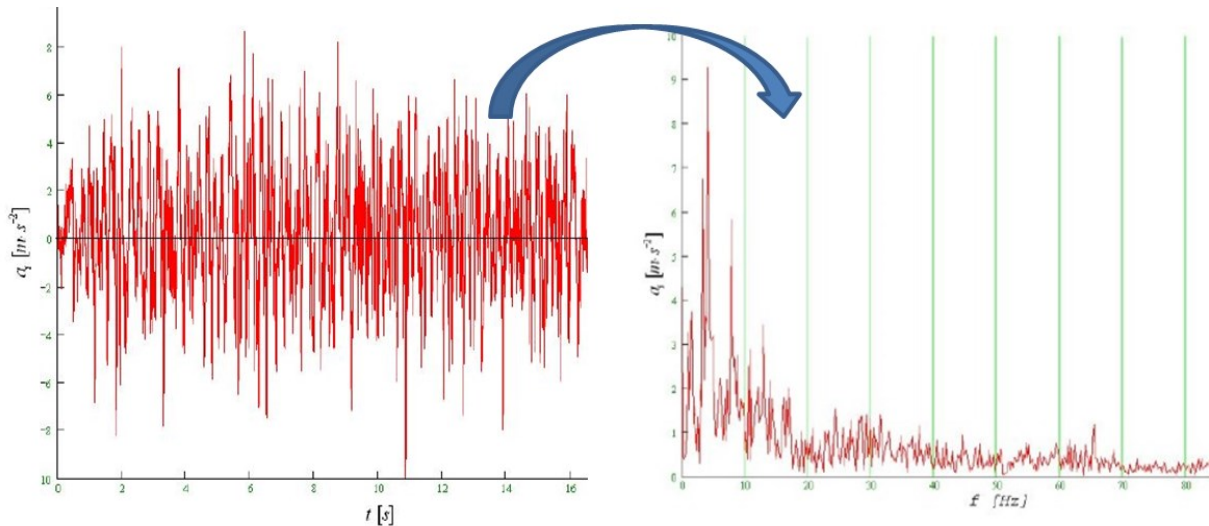


Obrázek 8.6 Vzorkování časového průběhu

Volba vzorkovací frekvence ovlivňuje výsledky měření a to i negativně. V případě nesprávně zvolené vzorkovací frekvence vnášíme do měření chybu, která se promítne do výsledků. U frekvenční analýzy by vzorkovací frekvence měla být minimálně dvakrát větší, než je nejvyšší sledovaná frekvenční složka. Vzorkovací frekvence u analýzy časového průběhu by měla být dokonce sedminásobná, než je nejvyšší sledovaná frekvenční složka. [3][8]

8. 2. 1 Frekvenční analýza

Diskrétní zpracování signálu je sice efektivní, ale my nejsme schopni posoudit signál v časové oblasti a dostat z něj frekvenční hodnoty. Proto je nutno provést jakýsi převod nebo transformaci z oblasti časové do oblasti frekvenční.



Obrázek 8.7 Přechod z časové do frekvenční oblasti (FFT)

I u našeho měření byl tento přechod z časové oblasti nezbytný, a proto jsme použili jednu z neúčinnějších metod, kterou je rychlá fourierova transformace (FFT – fast fourier transformation). Rychlá fourierova transformace je matematický postup, který umožňuje stanovit u funkce $g(t)$ závislost jejich amplitudových a fázových složek na frekvenci. Zápis je pak proveden pomocí komplexní funkce $G(f)$.

$$\mathbf{G}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} (g(t) \cdot e^{(-2\pi t i)}) dt \quad (8.1)$$

V případě diskrétní Fourierovy transformace pak

$$\mathbf{G}(f_k) = \frac{1}{n} \sum_{p=0}^{n-1} y(r) \cdot e^{(2\pi b \frac{r}{n})} \quad (8.2)$$

n počet vzorků - pro diskrétní fourierovou transformaci musí platit že počet vzorků

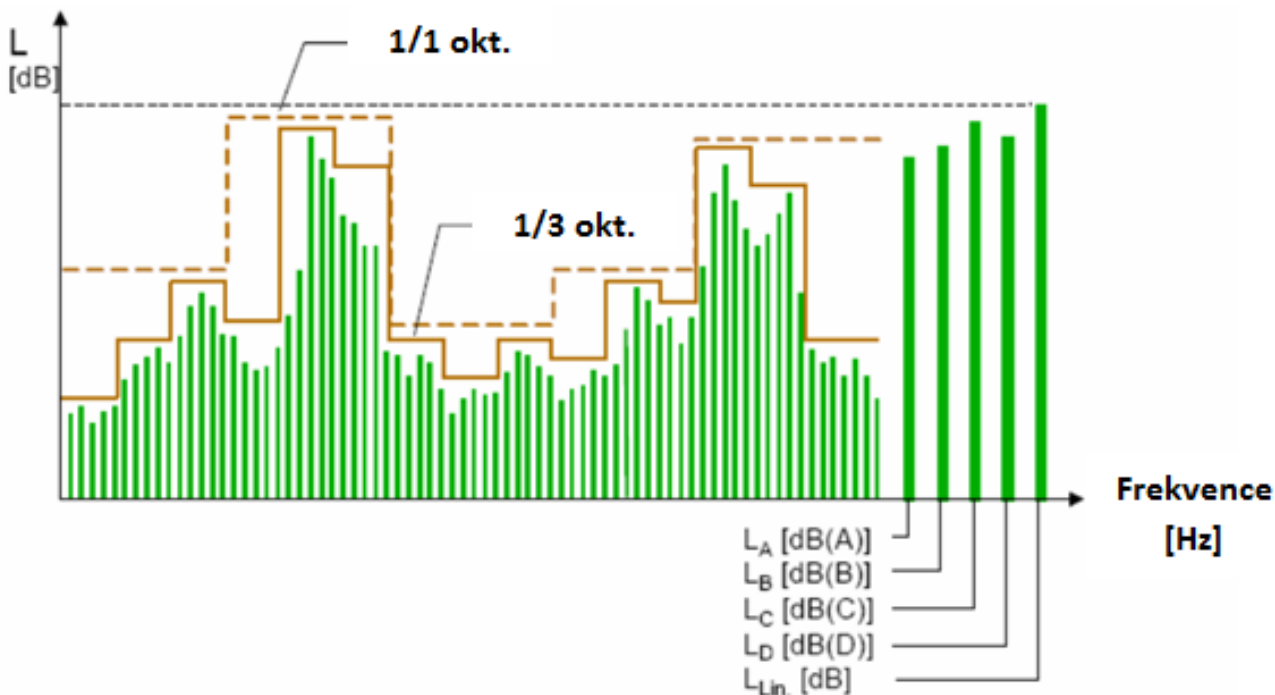
musí být roven kladné celočíselné mocnině čísla 2

r signifikátor pořadí pro diskrétní hodnoty funkce v časové oblasti

b signifikátor pořadí pro diskrétní hodnoty funkce ve frekvenční oblasti (harmonické násobky frekvenčního kroku)

Existují různá pravidla pro vzorkování a následné použití diskrétní fourierovy transformace, ale my se těmito pravidly nebudeme zabírat, jelikož všechny moderní měřicí přístroje tyto podmínky ošetřují automaticky.

Pro naše měření jsme si pouze s FFT nevystačili a proto jsme byli nuceni využít i jinou frekvenční analýzu, kterou byla CPB (Constant Percentage Band) analýza. Je to analýza s konstantní šířkou pásma a s konstantní poměrnou šířkou pásma. Výsledkem CPB analýzy je zobrazení hladin hledaných veličin v oktávových, či 1/n oktávových pásmech. [8][6]



Obrázek 8.8 Rozdíl mezi 1/1 a 1/3 oktávovou analýzou a vážení celkové hladiny akustického tlaku různými filtry (A, B, C, D) a nevážené

8.3 Polobezodrazová místnost

Akustická měření jsou prováděna v bezodrazových nebo polobezodrazových místnostech, a proto i naše měření bylo provedeno v polobezodrazové místnosti (semianechoic chamber) VŠB-TUO. Polobezodrazová místnost je speciálně upravená místnost pro akustická měření, která pohlcuje odraz zvuku i elektromagnetického vlnění. Naprostá izolace od okolního prostředí umožňuje měřit akustické signály bez vlivu okolních hluků, které by mohly výrazně ovlivnit výsledky.



Obrázek 8.9 Polobezodrazová místnost na VŠB-TUO

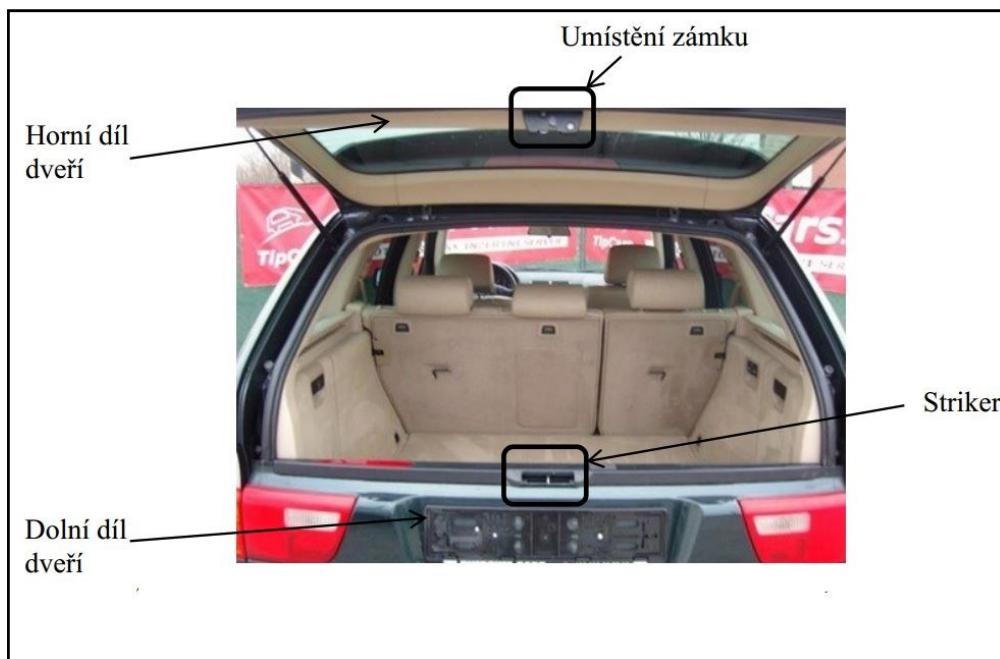
Jak vidíme na obrázku, strop a zdi jsou obloženy absorbními klíny ze speciálně upraveného materiálu pro absorpci zvuku a elektromagnetického vlnění. Hladina hlasitosti v polobezodrazové místnosti bývá 10-20dB_a. Nejtížší akustickou komorou na světě vlastní na univerzitě v Salfordu (Velká Británie) a v této komoře bylo naměřeno -12,4dB_a.

8. 4 Měření vzorek

Měřeným vzorkem byl zámkový systém vyráběný firmou Brose CZ spol. s. r. o. Firma Brose s dlouholetou tradicí je přední světový dodavatel automobilových komponentů pro automobilové značky jako je například BMW, Audi, Volvo, Daimler a další. Tato německá firma založená v roce 1908 je proslulá hlavně výrobou zámkových systémů, automobilových sedadel, zvedáčů oken či dveří automobilů. Na těchto komponentech musí být prováděny různé zátěžovací a bezpečnostní testy. Zejména na zámkových systémech a sedadlech je pak prováděna řada akustických měření. Tato akustická měření vedou k zdokonalení produktů a ke snížení jejich hlučnosti, což má za následek spokojenost klientů a prosperitu firmy Brose CZ spol. s. r. o.

V našem případě jsme měřili zámkový systém vyráběný firmou Brose CZ spol. s. r. o. pro páte dveře terénních automobilů značky Land Rover.

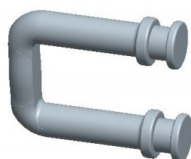
Umístění zámku a strikeru:



Obrázek 8.10 Umístění zámku u zadních (pátých) dveří automobilu

Zámek je umístěn na horním dílu pátých dveří automobilu. Při zavírání dveří přichází zámek do kontaktu se strikerem a dochází k zapadnutí západky a zavření.

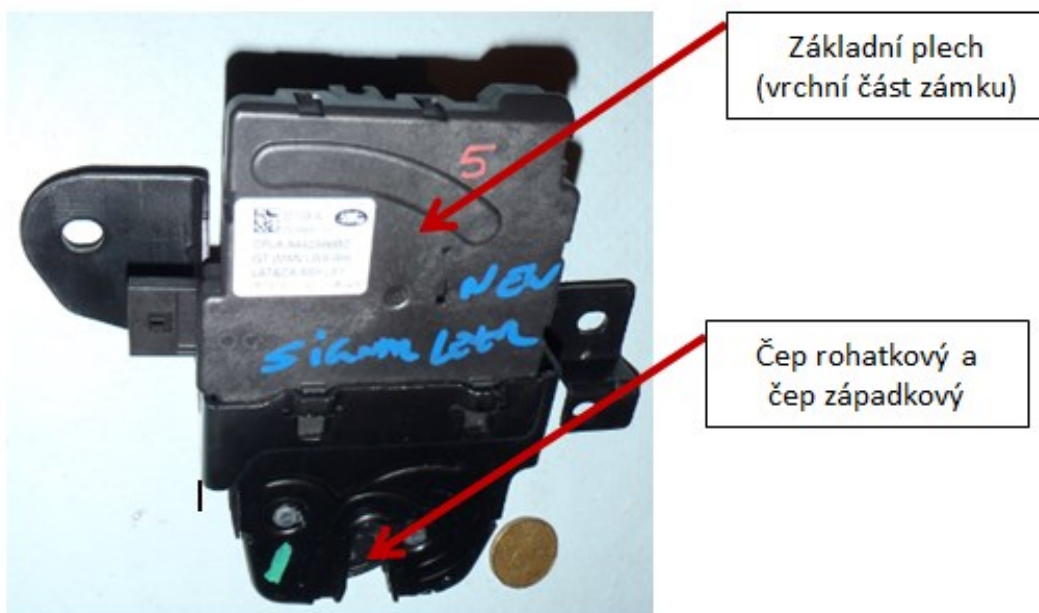
Striker:



Obrázek 8.11 Detailní zobrazení strikeru

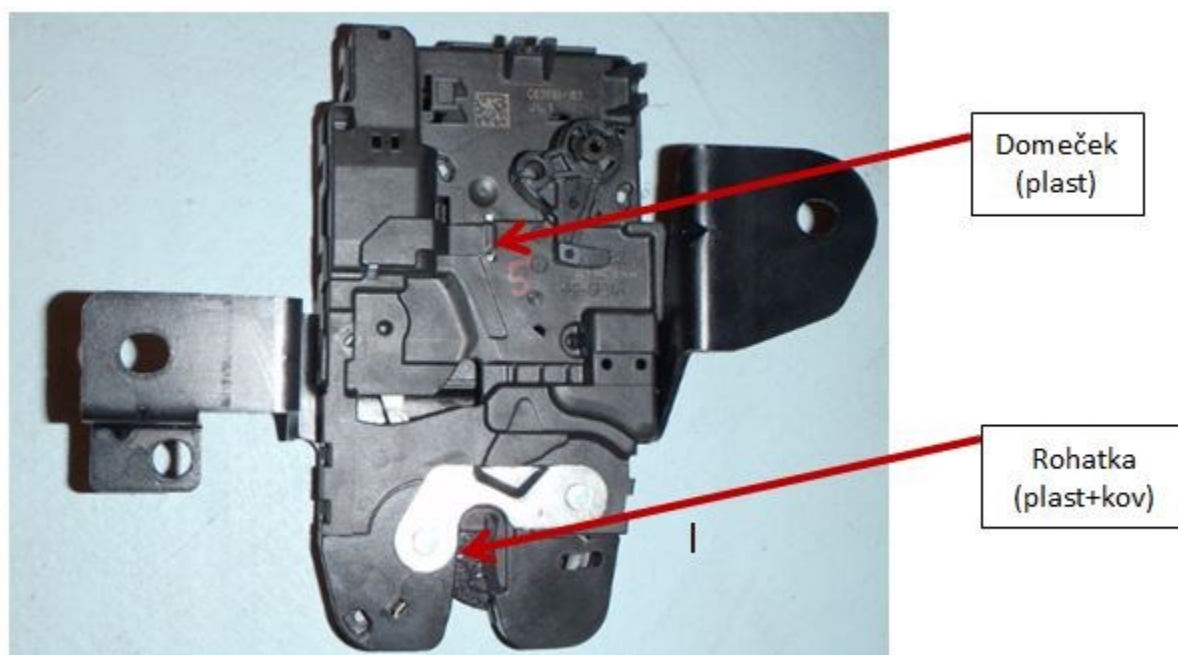
Striker je umístěn na dolním díle pátých dveří automobilu a musí být vyroben z kvalitního materiálu v důsledku opakovaného působení síly při zavírání dveří. Při měření byla síla při zavírání dveří nastavena na 100N.

Zámek Brose CZ spol. s. r. o.:



Obrázek 8.12 Celkový pohled na zámek

Na obrázku je vyobrazen zámek z čelní strany a je možno vidět čep rohatek a čep západkový. Zámky jsou vyráběny v mnoha provedeních a typech. Materiálem je kombinace plechu a plastu. K porovnání velikostí je vedle zámku položena dvacetikorunová mince.



Obrázek 8.13 Zobrazení zámku v primární poloze

Jedním z nejdůležitějších členů zámku je rohatka a západka. Západka fixuje rohatku v jedné ze dvou poloh a rohatka pak přichází do styku se strikerem.

Moduly zámku firmy Brose CZ spol. s r. o. spojují dveřní zámek a vnitřní kliku dveří i všechna příslušná mechanická a elektrická spojení do jednoho modulu. Vyznačují se minimálním vynaložením síly při otevírání, zdokonaleným zajištěním proti krádeži, ale hlavně nehlučným zamykáním. Nehlučnost, především novějších modelů zámků, tkví v použití pevného lanka místo dříve používaného ozubeného mechanismu sloužícího k otevírání a zavírání zámku.

8. 5 Popis měření

Bylo provedeno měření impulsního hluku při odemykání a zamykání dříve zmiňovaného zámku a posléze byla provedena analýza tohoto signálu. Pro měření byl firmou Brose CZ spol. s r. o. vyroben speciální mechanismus, který simuluje odemykání a zamykání zámku. Mechanismus je ovládán dálkově a přítlačná síla (100N) při zavírání dveří je korigována magnety. Díky tomuto mechanismu jsme se při měření vyvarovali nežádoucím signálům, které by mohly ovlivnit výsledky.

8. 6 Parametry měření

Software: PULSE (Brüel & Kjær) a NI

Mikrofón: Kondenzátorový mikrofón Brüel & Kjær typu 2671

Vzdálenost přípravek (zámek) – mikrofón: 0,5m

Teplota v poloodrazové komoře: pokojová-okolo 25°C

Čas nahrávání impulsního signálu: 5s

Průměrování: exponenciální

Časový krok (vzorkování): 0,05s

Průměrování: 1s, 1/8s, 0,035s

CPB analýza: 20Hz – 20 000Hz

8. 6. 1 Průměrování

Důležitým faktorem při měření impulsního signálu je volba průměrování. My jsme měli na výběr buď průměrování exponenciální nebo lineární:

- **Lineární**

- Po nastaveném čase měřidlo ukončí měření a indikuje průměrnou hodnotu
- Každá část časového signálu má v průměrné hodnotě stejnou váhu
- Používá se především v hygienické oblasti a při stanovení akustických vlastností zdrojů zvuku

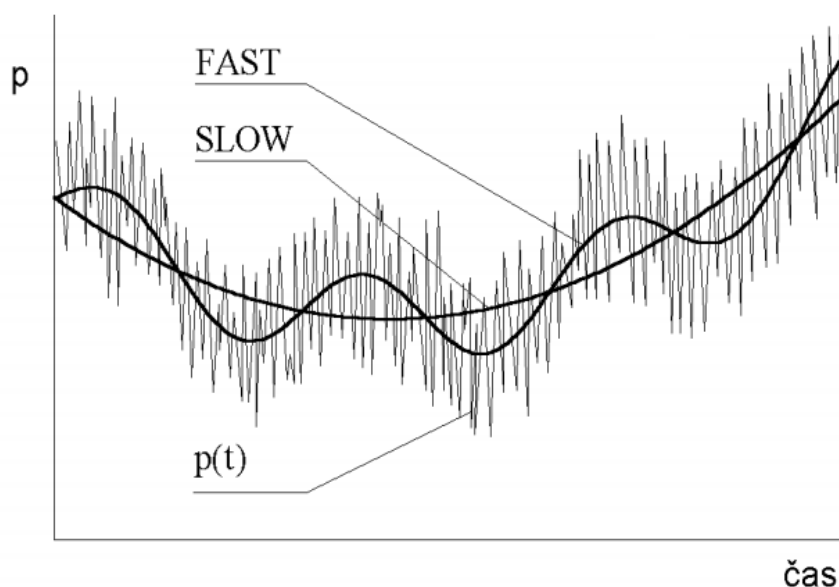
- **Exponenciální**

- Probíhá trvale
- Používá se pro vyhlazení časového signálu
- Měřidlo indikuje průměrnou hodnotu za právě uplynulou dobu (časovou konstantu)
- Používá se při monitorování hluku, popisu proměnlivých dějů a při normalizovaných měřeních

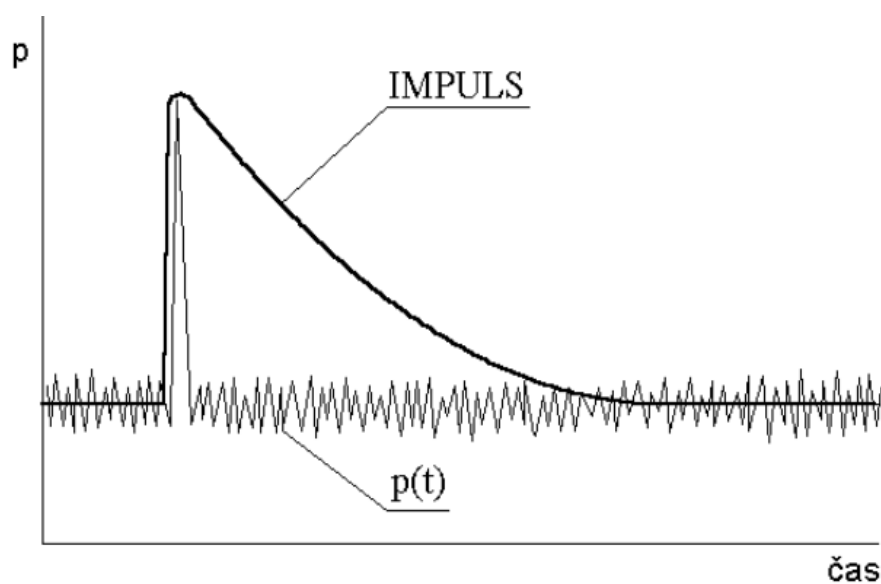
My jsme zvolili průměrování exponenciální, jelikož bychom u lineárního průměrování nemuseli za dobu 5s zaznamenat impulsní signál, jelikož průměrování neprobíhá trvale jak je tomu u průměrování exponenciálního. Dále jsme volili toto průměrování díky výše popsaným vlastnostem, které lépe vystihují naše měření a podmínky než lineární průměrování. [6]

U exponenciálního průměrování však narážíme na problém, kterým je časová konstanta. Volba časové konstanty může ovlivnit výsledek, přesněji maximální hodnotu SPL. Časovou konstantu volíme dle typu měření a dle vlastního uvážení, ale je na zadavateli a zhotoviteli, aby našli vhodný kompromis. Nejpoužívanější standardizované časové konstanty jsou tyto:

- FAST: 1/8s
- SLOW: 1s
- IMPULS: 0,035s (indikace impulsu) +2s (pomalý pokles)



Obrázek 8.14 Grafy s exponenciálním průměrováním a časovou konstantou FAST a SLOW



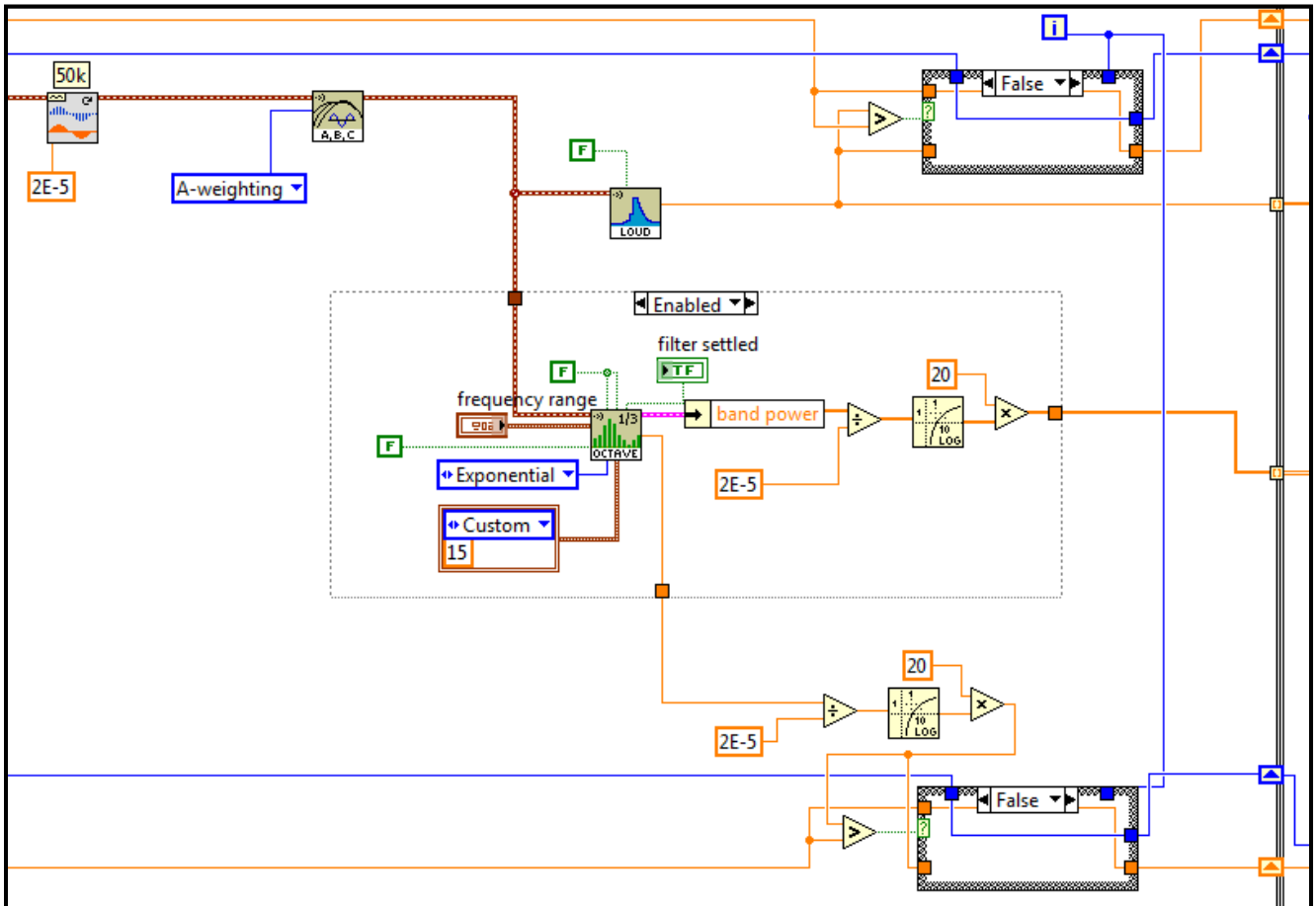
Obrázek 8.15 Graf s exponenciálním průměrováním a časovou konstantou IMPULS

Z grafů je zřejmé, že pro šum či časově déle trvající zvukový signál s širokou frekvenční charakteristikou můžeme použít časové konstanty FAST nebo SLOW. Ovšem tyto konstanty nejsou schopny zachytit impulsní zvuk trvající jen zlomek vteřiny, proto u těchto zvuků používáme časovou konstantu IMPULS.

9. Analýza

9.1 Měřicí software

V rozhraní programu LabVIEW jsme si pro naše měření vytvořili svou vlastní aplikaci, pomocí které jsme prováděli naše měření. Hlavní část blokového schémata této aplikace vypadá takto:

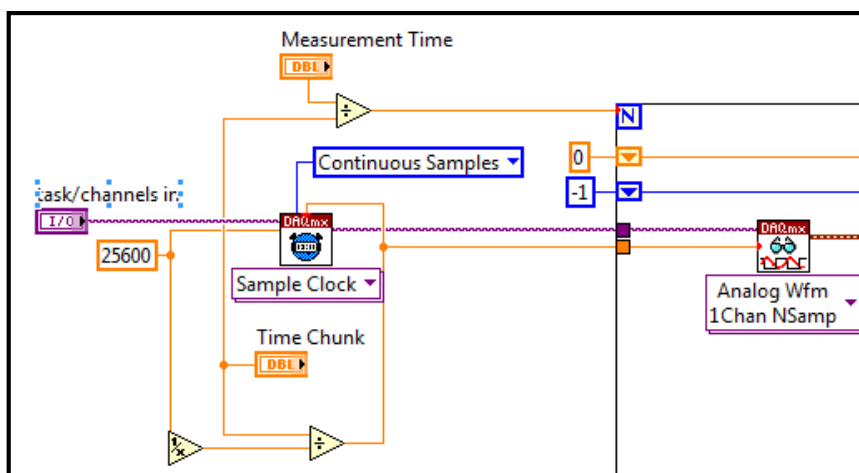


Obrázek 9.1 Blokové schéma aplikace (LabVIEW) - analýzy

Funkci hlavní části blokového schémata si můžeme představit takto:

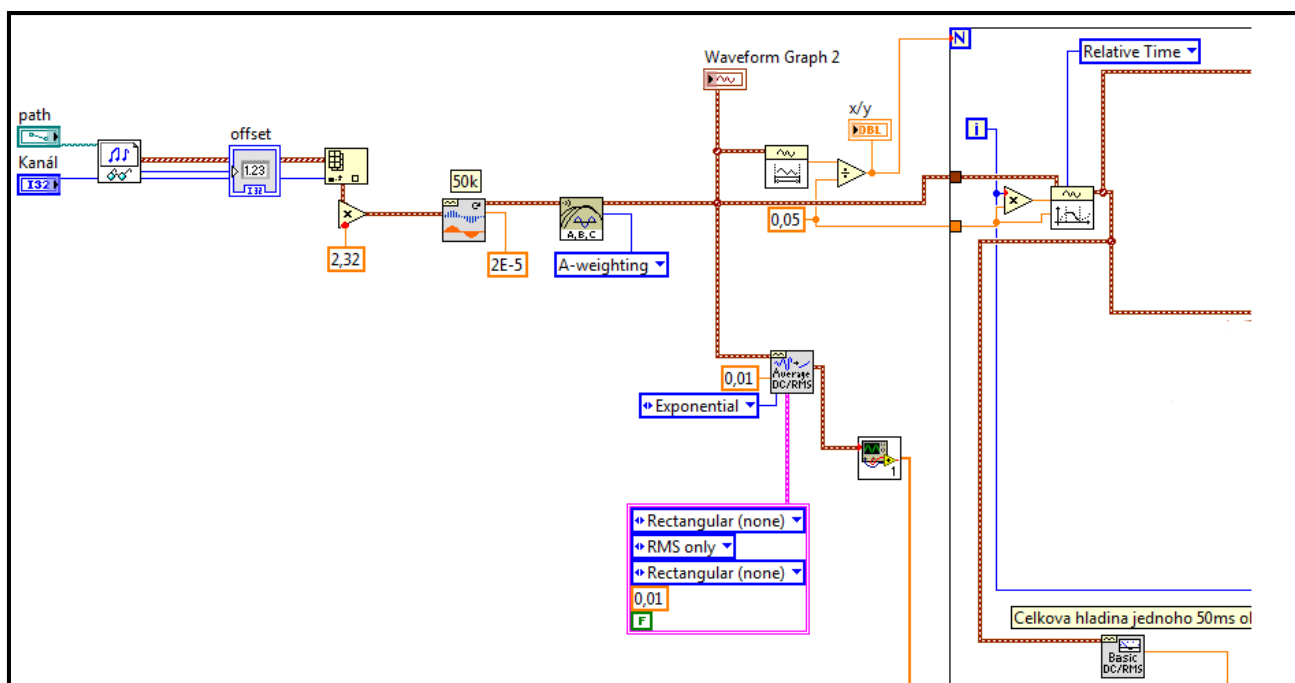
Vstupní signál přichází z levé strany po hnědém vodiči a je převzorkován dle potřeb následujících funkcí a analýz. Dále je váhově upraven váhovým filtrem typu A a je provedena třetinooktávová analýza. Pro zjištění hodnot hlasitosti v Sonech a Phonech je na hnědý vodič napojena funkce LOUD. Výstupem pak jsou grafy a hodnoty v námi zvolených jednotkách.

Příčemž vstupem může být **měřicí karta**:



Obrázek 9.2 Blokové schéma aplikace (LabVIEW) – karta na vstupu

nebo zvuková nahrávka ve formátu **WAV**:

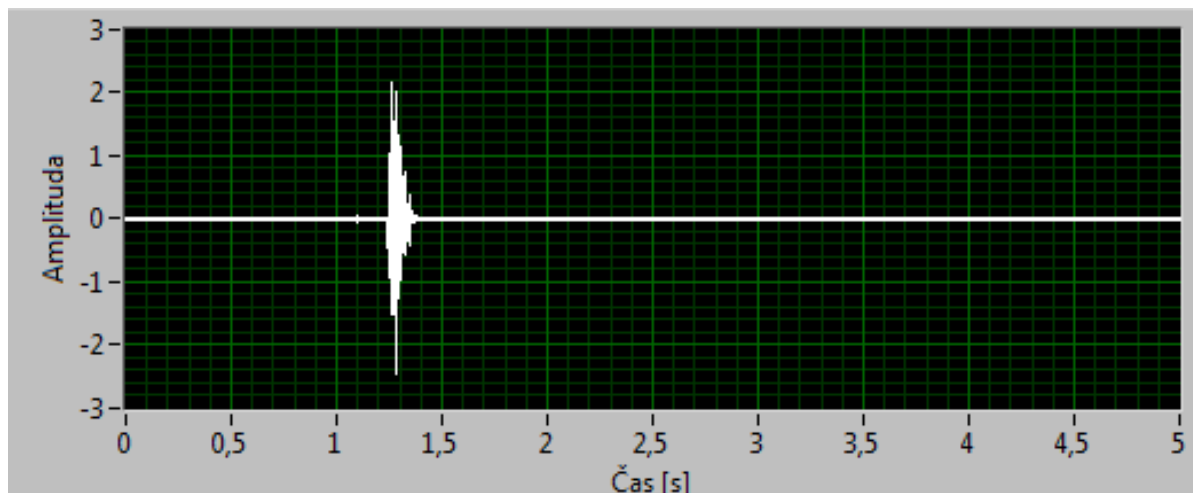


Obrázek 9.3 Blokové schéma aplikace (LabVIEW) – zvuková nahrávka na vstupu (WAV)

Jak bylo již dříve zmíněno, výstupem jsou grafy a hodnoty předem nastavených analýz. Jednotky grafů a hodnot si dle potřeby předem nastavíme. [7]

9. 2 Výsledky – zavření zámku

9. 2. 1 Časový průběh signálu



Obrázek 9.4 Časový průběh signálu – zavření zámku

Graf časového průběhu signálu podává základní informace o čase a amplitudě měřeného zvuku. Z grafu lze vyčíst, že zvukový signál trvá pouze několik desetin sekundy a tedy jde o impulsní hluk.

9. 2. 2 Vliv časové konstanty

Jak jsme zmínili již dříve (kapitola 8. 6. 1 Průměrování), velký vliv na maximální hladinu SPL má zvolená časová konstanta u exponenciálního průměrování. Na následujících grafech porovnáme výsledné hodnoty odvislé od zvolené časové konstanty.

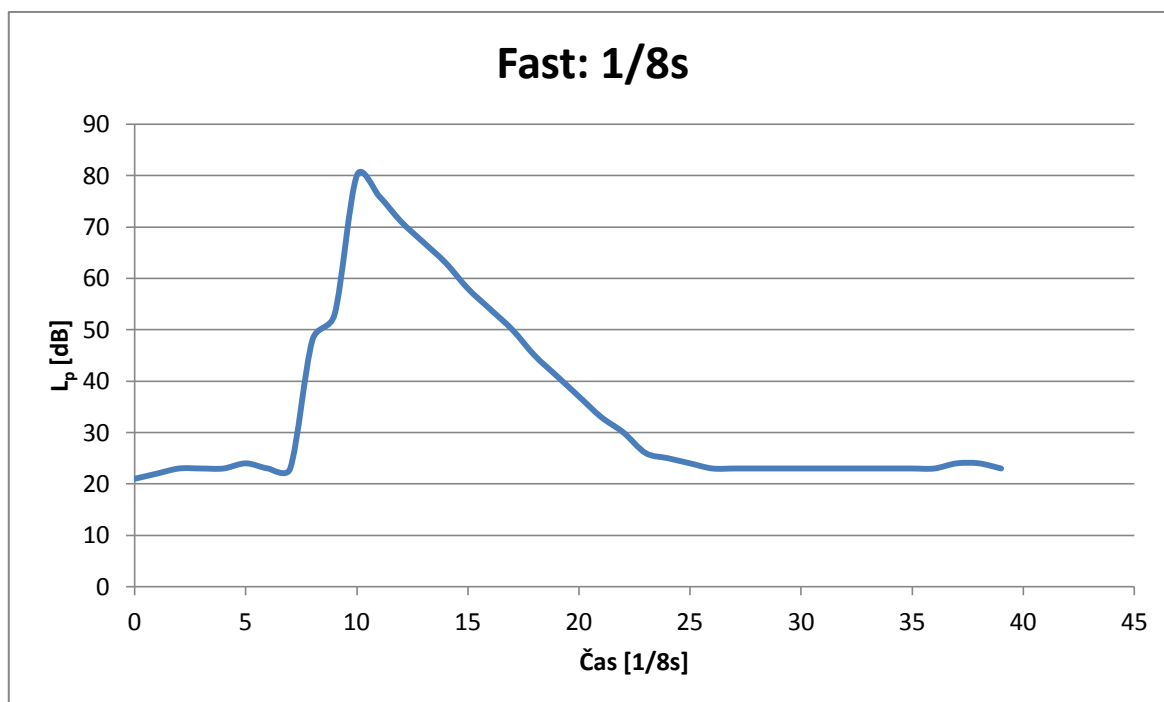
- Časová konstanta SLOW: 1s



Obrázek 9.5 Exponenciální průměrování s časovou konstantou SLOW – zavření zámku

Maximální hodnota: **71dB**

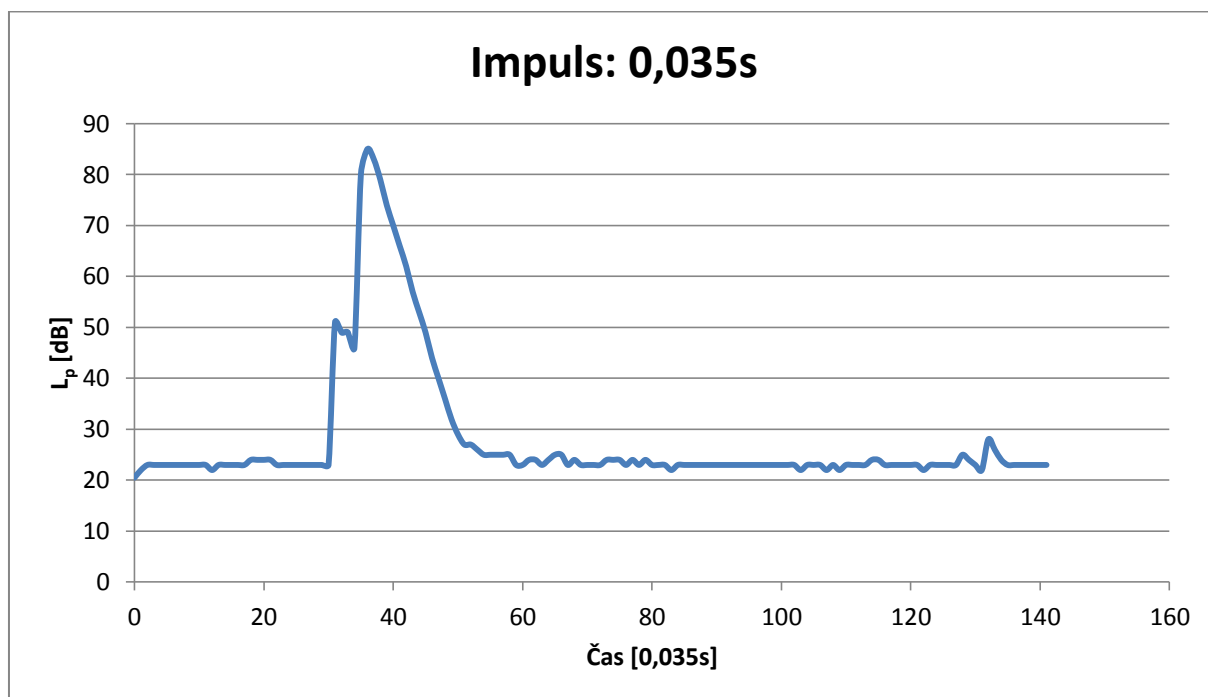
- Časová konstanta FAST: 1/8s



Obrázek 9.6 Exponenciální průměrování s časovou konstantou FAST – zavření zámku

Maximální hodnota: **80dB**

- Časová konstanta IMPULS: 0,035s



Obrázek 9.7 Exponenciální průměrování s časovou konstantou IMPULS – zavření zámku

Maximální hodnota: **85dB**

Tabelární srovnání výsledných hodnot s použitím různých časových konstant:

Časová konstanta	Hodnota konst. [s]	SPL [dB]	Tlak [Pa]
SLOW	1	71	0,070962678
FAST	1/8	80	0,2
IMPULS	0,035	85	0,355655882

Tabulka 9.1 Výsledné hodnoty s použitím různých časových konstant – zavření zámku

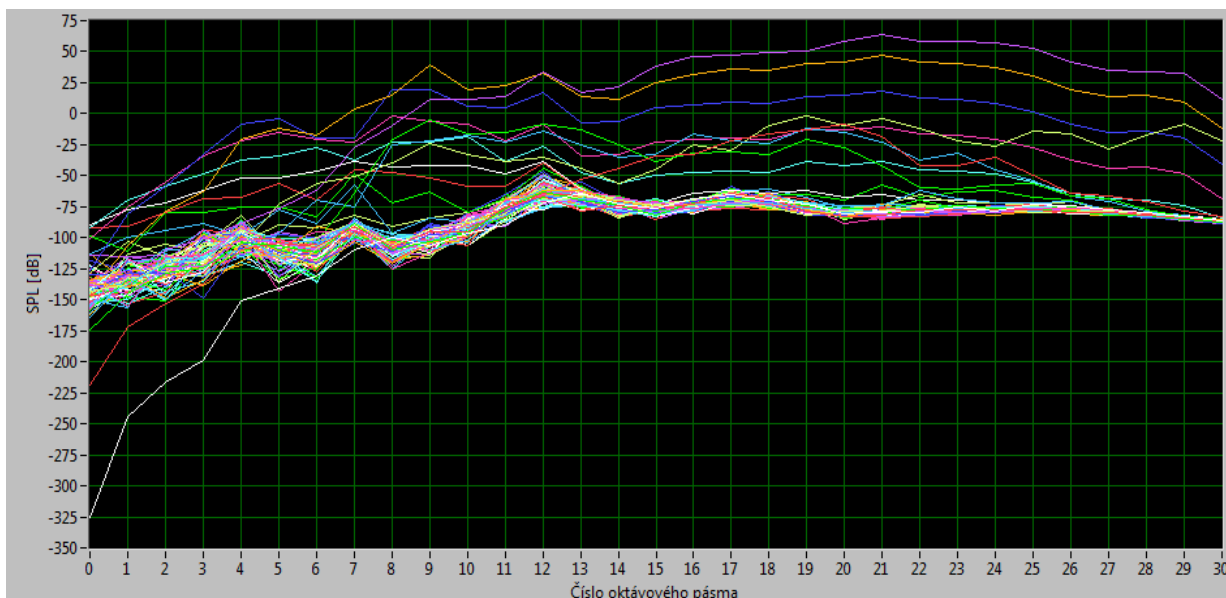
Jak je vidno, výsledné grafy a hodnoty se velice odlišují. Pro naše měření je tedy vhodné použít časovou konstantu IMPULS: 0,035s, jež je pro měření impulsních signálů nejvhodnější.

9. 2. 3 Třetinooktávová analýza

V naměřeném 5s signálu s vzorkováním 0,05s se nachází 100vzorků ($5/0,05=100$). Graf je poměrně nepřehledný a proto ze série vzorků vyfiltrujeme pouze ten, jehož SPL

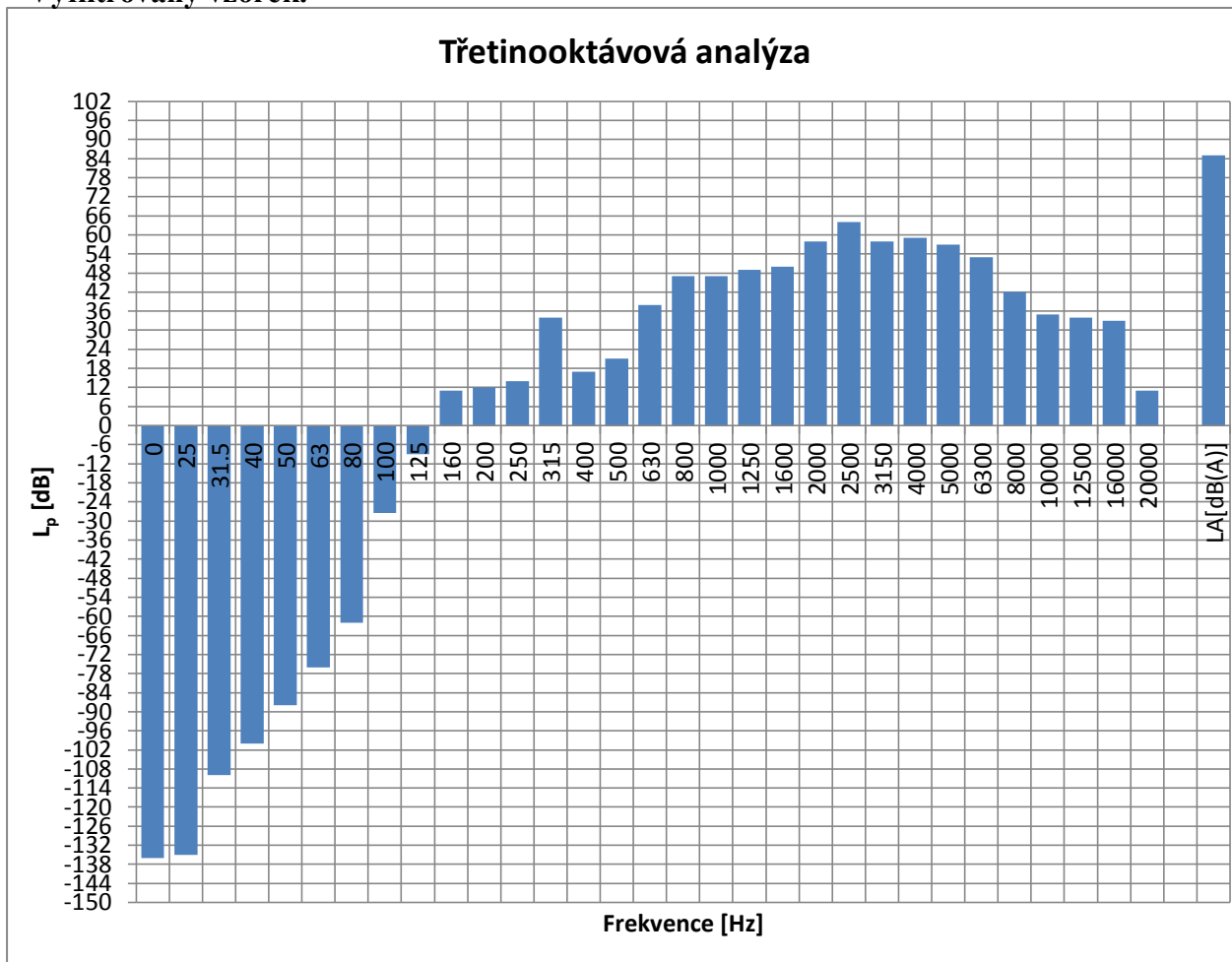
dosahuje maxima. Poté budemem moci z grafu určit maximální hodnotu SPL a také třetinooktávové pásmo v němž impulsní signál nabývá maximální hodnoty SPL.

Celkový graf všech vzorků:



Obrázek 9.8 Graf všech vzorků při třetinooktávové analýze – zavření zámku

Vyfiltrovaný vzorek:

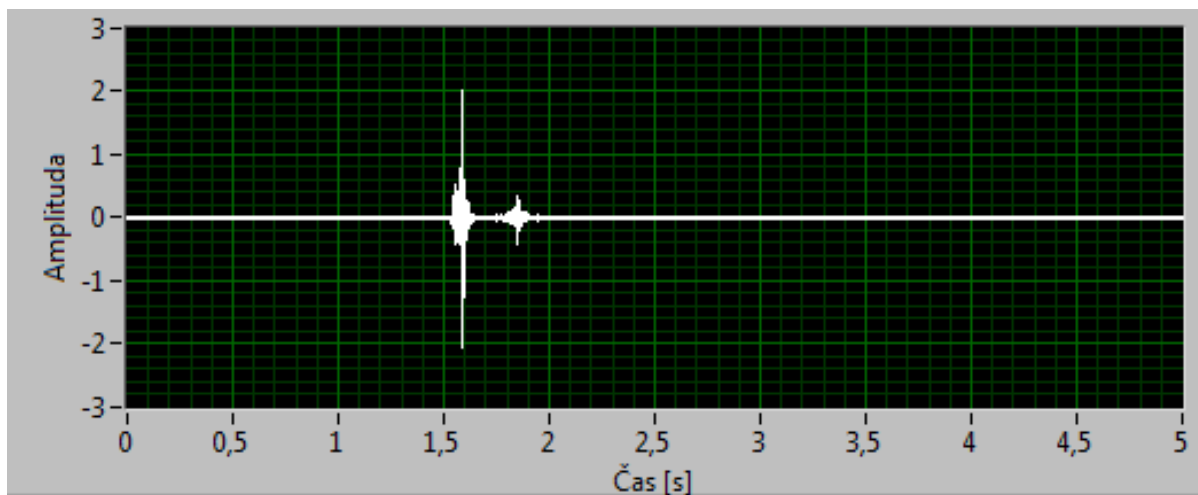


Obrázek 9.9 Třetinooktávová analýza – vzorek dosahující maximálního hodnot při zavření

Maximální hodnota SPL **64dB** ve třetinooktávovém spektru se vyskytuje v kmitočtovém pásmu jehož střední kmitočtová frekvence je 2500Hz. Celkový akustický tlak měřeného impulsního zvuku je 85dB, což při daném frekvenčním složení impulsního zvuku odpovídá hlasitost o velikosti **38S** (Sone) nebo také **93Ph** (Phone).

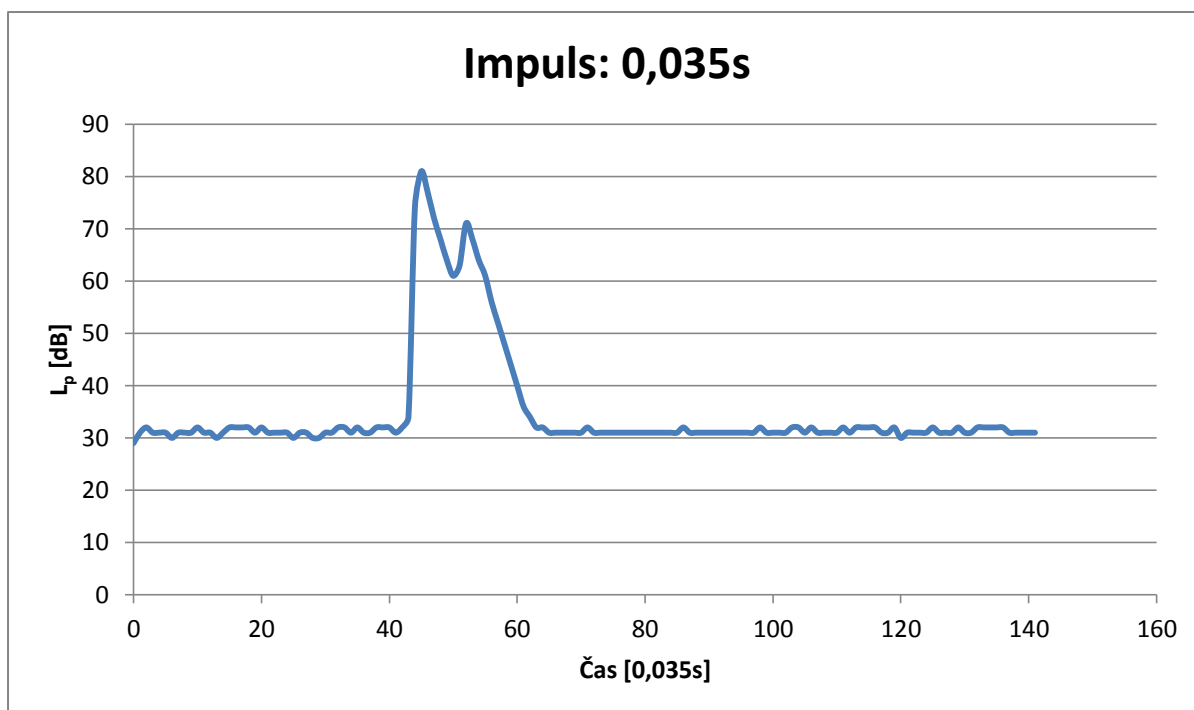
9.3 Výsledky – otevření zámku

9.3.1 Časový průběh signálu



Obrázek 9.10 Časový průběh signálu – otevření zámku

Z grafu je zřejmé, že se opět jedná o impulsní zvuk, a proto díky zkušenostem volíme stejně jako v předešlém případě exponenciální průměrování s časovou konstantou IMPULS: 0,035s a s touto konstantou pracujeme při dalším zpracování tohoto signálu.



Obrázek 9.11 Exponenciální průměrování s časovou konstantou IMPULS – otevření zámku

Maximální hodnota: **81dB**

I přesto, že na základě dřívějších zkušeností byla zvolena časová konstanta IMPULS, srovnáme si výsledné hodnoty s použitím jiných časových konstant:

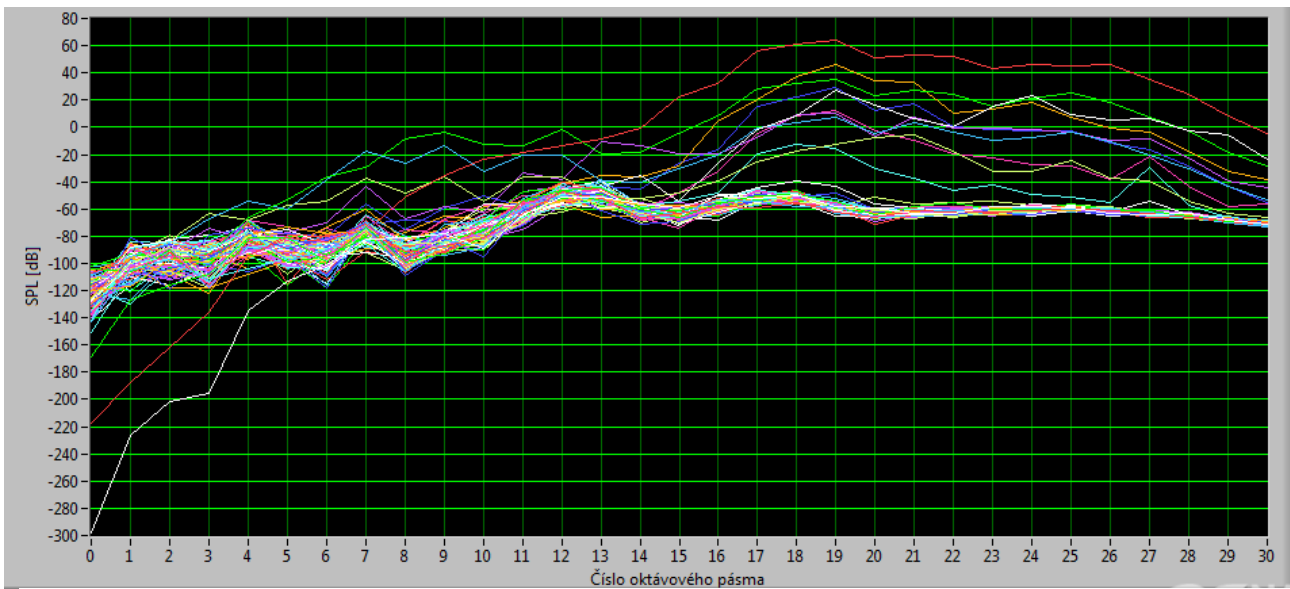
Časová konstanta	Hodnota konst. [s]	SPL [dB]	Tlak [Pa]
SLOW	1	68	0,050237729
FAST	1/8	77	0,141589157
IMPULS	0,035	81	0,224403691

Tabulka 9.2 Výsledné hodnoty s použitím různých časových konstant – otevření zámku

9. 3. 2 Třetinooktávová analýza

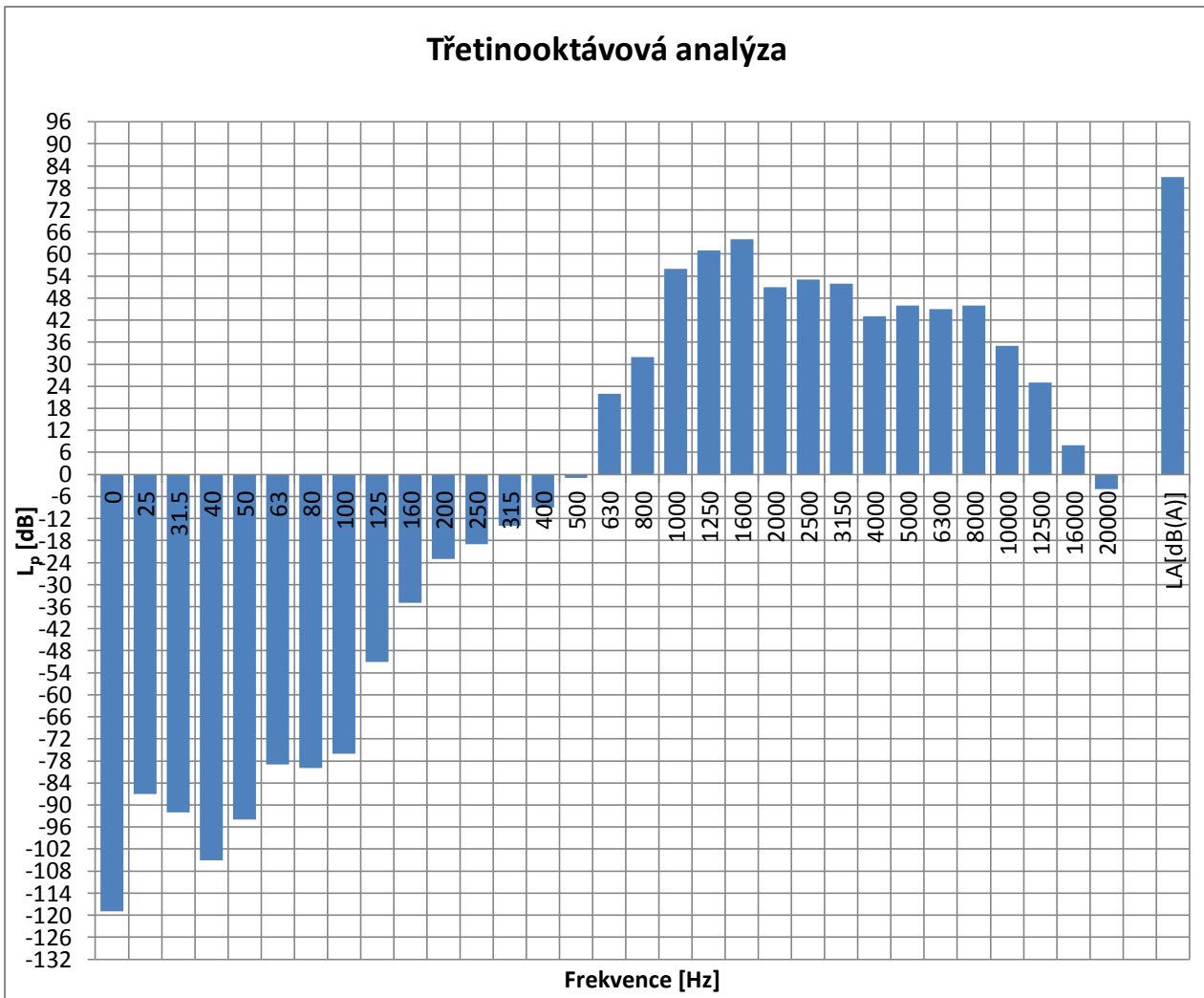
Měřícím časem je opět 5s se vzorkováním 0,05s. Opět si prvně necháme vykreslit komplexní graf všech vzorků, z čehož vybereme právě ten vzorek, který dosahuje decibelového maxima.

Celkový graf všech vzorků:



Obrázek 9.12 Graf všech vzorků při třetinoctávové analýze – otevření zámku

Vyfiltrovaný vzorek:



Obrázek 9.13 Třetinoctávová analýza – vzorek dosahující maximální hodnoty při otevření zámku

Maximální hodnota SPL **64dB** ve třetinoctávovém spektru se vyskytuje v kmitočtovém pásmu jehož střední kmitočtová frekvence je 1600Hz. Celkový akustický tlak měřeného impulsního zvuku je 81dB, což při daném frekvenčním složení impulsního zvuku odpovídá hlasitost o velikosti **23S** (Sone) nebo také **85Ph** (Phone).

POZNÁMKA: Veškeré grafy, hodnoty a výsledky jsou váženy váhovým filtrem typu A!

9. 4 Srovnání výsledných hodnot

Pro sumarizaci si maximální výsledné hodnoty jak zavření, tak otevření zámku srovnáme ještě v tabulce:

Děj	SPL [dB]	Tlak [Pa]	Hlasitost [S]	Hlasitost [Ph]
Zavření zámku	85	0,355655882	38	93
Otevření zámku	81	0,224403691	23	85

Tabulka 9.3 Srovnání maximálních výsledných hodnot

10 Závěr

Bylo provedeno měření impulsního signálu (hluku) a jeho následná analýza a evaluace. Měření bylo simultánně provedeno ve dvou softwarech a to v software PULSE od firmy Brüel & Kjær a softwaru LabVIEW od firmy National Instruments. Zatímco program PULSE pracoval automaticky a my jsme nemohli ovlivňovat spoustu přednastavených funkcí, námi vytvořená aplikace v prostředí LabVIEW plnohodnotně nahradila program PULSE a navíc jsme měli možnost řešit problémy časových konstant při exponenciálním průměrování, sami jsme si volili typy analýz a také potřebné výsledné grafy. Byl vytvořen velice užitečný a silný nástroj pro měření impulsních hluků, který by měl být pro firmu Brose CZ, s. r. o. přínosem v řešení problému impulsních hluků, se kterým se již několik let potýká. V případě jakéhokoliv požadavku firmy je aplikace flexibilně editovatelná a není problém ji upravit či rozšířit o požadované funkce.

Výsledné hodnoty 38S (93Ph) při uzavření zámku a 23S (85Ph) při otevření zámku jsou hodnotami indikujícími vnímání tohoto impulsního hluku lidským uchem. Jak je popsáno v předešlých kapitolách, tyto psychoakustické veličiny v sobě skrývají hodnoty akustického tlaku, frekvenční složení daného hluku nebo například nelinearitu lidského sluchového orgánu. Nyní bude na výrobcí zámkových systémů, aby na základě hygienických předpisů, firemních předpisů a norem, posoudil význam těchto hodnot.

Akustický tlak o hodnotě 85dB je člověk schopen akceptovat bez trvalého poškození sluchu 8hodin denně. Tomuto akustickému tlaku je sice v našem případě respondent vystaven jen po dobu několika desetin sekundy, ale frekvenční rozsah tohoto zvuku může být také faktorem ovlivňujícím lidské zdraví. Závěrem nutno konstatovat, že u námi měřeného impulsního hluku se není třeba obávat o svůj sluch. Důvodem proč spousta firem v dnešní době řeší otázku psychoakustiky, akustiky a kvality zvuku je ten, že trh si žádá výrobky, jejichž zvukový projev je pro lidské ucho příjemný. Výsledkem je pak spokojenost zákazníka a profit firmy z prodeje výrobku.

Seznam použité literatury

- [1] NOVÝ, Richard. ČVUT. *Hluk a chvění*. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-02246-3.
- [2] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. vydání. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-901936-2-5.
- [3] COCKER, J. M. *Handbook of Noise and Vibration Control*. USA: John Wiley & Sons, Inc. 2007. 1038s ISBN 0.4713-9599-4
- [4] ČSN ISO 532. *Akustika: Metóda pre výpočet hlasitosti*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [5] ČSN ISO 226. *Akustika: Normované křivky stejné hlasitosti*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [6] ROSSING, Thomas. SPRINGER. *Springer Hanbook of Acoustics*. Stanford USA: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-30446-5.
- [7] NATIONAL INSTRUMENTS. *LabVIEW: Use Manual* [Pdf]. Austin Texas USA: NI, 2003 [cit. 11.5.2013]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>
- [8] KTH - ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Sound and Vibrations* [Skripta]. Stockholm: KTH, 2003, 357 s. [cit. 11.5.2013].

Seznam digitálních příloh

- Aplikace pro měření a analýzu impulsních hluků – vstup: Měřicí karta
Název aplikace: Impuls_karta
- Aplikace pro měření a analýzu impulsních hluků – vstup: WAV
Název aplikace: Impuls_WAV

Přílohy

Příloha č.1

Tabulka korekcí pro váhové filtry typu A, B a C:

f_m [Hz]	Filtr A [dB]	Filtr B [dB]	Filtr C [dB]
20	-50,5	-	-
25	-44,7	-	-
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
40	-34,6	-14,2	-2,0
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3,0	-0,1
200	-10,5	-2,0	0
250	-8,6	-1,3	0
315	-6,6	-0,8	0
400	-4,8	-0,5	0
500	-3,2	-0,3	0
630	-1,9	-0,1	0
800	-0,8	0	0
1000	0	0	0
1250	0,6	0	0
1600	1,0	0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1,0	-0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,1
6300	-0,1	-1,9	-2,0
8000	-1,1	-2,9	-3,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-	-
16000	-6,6	-	-
20000	-9,3	-	-