

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**POSUZOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO HLUKU
POHONU PSYCHOAKUSTICKÝMI VELIČINAMI**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan BENEK**
Osobní číslo: **E15N0064P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Posuzování elektromagnetického hluku pohonu psychoakustickými veličinami**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování:

1. Sestavte přehled psychoakustických veličin vhodných pro posuzování elektromagnetického hluku pohonu.
2. Sestavte skript v MATLABu počítající hodnoty vybraných psychoakustických veličin pro zvukový záznam elektromagnetického hluku.
3. Porovnejte výsledky hodnocení elektromagnetického hluku člověkem a psychoakustickými veličinami.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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


Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Janda, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vyhodnocení elektromagnetického hluku pohonu pomocí psychoakustických veličin. Jsou vybrány a popsány jednotlivé psychoakustické veličiny, pomocí kterých jsou vyhodnocovány různé časové záznamy elektromagnetických hluků pohonu.

Klíčová slova

Psychoakustika, elektromagnetický hluk, hlasitost, ostrost, hrubost, tonalita, fluktuační síla, sensorická přívětivost, maskování, matlab

Abstrakt

This diploma thesis focuses on evaluating the electromagnetic noise of the electrical propulsion unit using psychoacoustic units. The units used for the evaluation are selected and described in this thesis. Using these units, examples of electromagnetic noise of the propulsion unit are evaluated.

Klíčová slova

Psychoacoustics, electromagnetic noise, loudness, sharpness, roughness, tonality, fluctuation strength, sensory pleasantness, masking, matlab

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 17.5.2017

Jan Benek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Jandovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 METODIKA ŘEŠENÍ.....	16
2 ZÁKLADNÍ POJMY A JEDNOTKY.....	18
2.1 AKUSTICKÝ TLAK.....	19
2.2 AKUSTICKÝ VÝKON.....	20
2.3 AKUSTICKÁ INTENZITA.....	20
2.4 HLADINOVÉ VYJÁDŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN.....	20
2.5 KMITOČTOVÁ PÁSMÁ.....	22
2.6 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA.....	25
2.6.1 Diskrétní a Rychlá Fourierova Transformace.....	25
2.6.2 Spektrální výkonová hustota.....	26
2.6.3 Bartlettova metoda.....	26
2.6.4 Welchova metoda.....	27
3 SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ.....	28
4 PSYCHOAKUSTICKÉ VELIČINY.....	31
4.1 HLASITOST.....	31
4.1.1 Jednotka.....	31
4.1.2 Maskování.....	31
4.1.3 Časové maskování.....	32
4.1.4 Kritická Pásma.....	33
4.1.5 Frekvenční maskování.....	34
4.1.6 Výpočet hlasitosti.....	35
4.2 OSTROST.....	37
4.2.1 Jednotka.....	37
4.2.2 Výpočet.....	37
4.3 HRUBOST.....	39
4.3.1 Jednotka.....	39
4.3.2 Subjektivní doba trvání.....	39
4.3.3 Výpočet.....	40
4.3.4 Modifikace v Danielově modelu.....	43
4.4 FLUKTUAČNÍ SÍLA.....	45
4.4.1 Jednotka.....	45
4.4.2 Výpočet.....	45
4.5 TONALITA.....	46
4.5.1 Výpočet.....	46
5 KOMPLEXNÍ VELIČINY.....	47
5.1.1 Senzorická přívětivost.....	47
5.1.2 Ostatní komplexní veličiny.....	47
6 POPIS SKRIPTŮ A ALGORITMIZACE JEDNOTLIVÝCH VELIČIN.....	48
6.1 POMOCNÉ SKRIPTY.....	48
6.1.1 Call_Sound.....	48
6.1.2 Vstupní Skripty.....	49
6.1.3 PowSpec.....	49
6.1.4 Convert2db.....	50
6.1.5 GenerateFilters.....	50
6.1.6 Oct3dsgn.....	51

6.1.7 Psychv_segmm.....	51
6.1.8 Grafy a výstup na konzoly	52
6.2 CALCULATE LOUDNESS.....	53
6.2.1 Konstrukce křivky hlasitosti.....	54
6.3 SHARPNESS.....	58
6.4 HRUBOST.....	58
6.4.1 Inicializace.....	58
6.4.2 Výpočet Hrubosti.....	60
6.4.3 Využitelnost údajů při výpočtu hlasitosti.....	62
6.5 VÝPOČET TONALITY.....	63
6.6 SENSORY PLEASANTESS.....	63
7 VÝSLEDKY, TESTY A SROVNÁNÍ.....	64
7.1 KONTROLA MODELŮ.....	64
7.1.1 Hlasitost	64
7.1.2 Ostrost.....	65
7.1.3 Hrubost.....	65
7.1.4 Tonalita.....	66
7.1.5 Senzory pleasantess.....	67
7.2 VYHODNOCENÍ ZÁZNAMŮ	68
7.2.1 Vyhodnocení ukázkových záznamů hluku pohonu.....	69
7.2.2 Vyhodnocení elektromagnetického hluku pohonu.....	73

Seznam ilustrací

Obr 2.1: Znázornění vlno-ploch [1].....	18
Obr 2.2: Atmosférický tlak [2].....	19
Obr 2.3: Váhové filtry [3].....	21
Obr 2.4: Třetinooktávové filtry převzato z [3].....	22
Obr 3.1: Sluchové ústrojí [5].....	28
Obr 3.2: Křivky stejné hlasitosti [6].....	29
Obr 4.1: Časové maskování [9].....	32
Obr 4.2: Frekvenční maskování [11].....	35
Obr 4.3: Křivka pro výpočet hlasitosti [12].....	36
Obr 4.4: Definice funkce $g'(z)$ [15].....	37
Obr 4.5: Graf funkce $g'(z)$ [15].....	38
Obr 4.6: Znázornění vnímané maskované hloubky [16].....	39
Obr 4.7: Znázornění filtrování trojúhelníkovými filtry [17].....	41
Obr 4.8: Modulaci transformující funkce [17].....	42
Obr 6.1: Křivka hlasitosti 1kHz, 60dB SPL.....	55
Obr 7.1: Hlasitost základních záznamů.....	69
Obr 7.2: Ostrost základních záznamů.....	70
Obr 7.3: Hrubost základních záznamů.....	70
Obr 7.4: Tonalita základních záznamů.....	71
Obr 7.5: Senzorická přívětivost základních záznamů.....	72
Obr 7.6: Senzorická přívětivost zkrácených záznamů.....	73
Obr 7.7: Hlasitost nezkrácených záznamů.....	80
Obr 7.8: Ostrost nezkrácených záznamů.....	81
Obr 7.9: Hrubost zkrácených záznamů.....	81
Obr 7.10: Tonalita zkrácených záznamů.....	82

Seznam tabulek

Tab 1: Frekvence třetinooktávových pásem [3].....	24
Tab 2: Frekvence kritických pásem [10].....	34
Tab 3: Srovnání metod pro měření ostrosti.....	38
Tab 4: Tabulka hodnot hlasitostí pro kontrolní účely	64
Tab 5: Tabulka hodnot ostrostí pro kontrolní účely	65
Tab 6: Tabulka hodnot hrubostí pro kontrolní účely	66
Tab 7: Tabulka hodnot hrubostí pro kontrolní účely	66
Tab 8: Tabulka hodnot senzorických přívětivostí pro kontrolní účely.....	67
Tab 9: Popis zpracovávaných záznamů.....	68
Tab 10: Srovnání výpočtu a subjektivního vjemu.....	72

Úvod

Psychoakustika je vědní obor, který zkoumá akustiku z hlediska subjektivního lidského vnímání. Tento obor vznikl za účelem zlepšení akustického komfortu. V dnešní době je zvuk posuzován především pomocí hladiny akustického tlaku, případně vážené hladiny akustického tlaku. To se nicméně ukazuje jako nedostatečné, neboť je třeba zohledňovat i ostatní vlastnosti zvuku. Ty mohou mít v lepším případě pouze rušivý účinek, nicméně může dojít až k vážným zdravotním následkům.

Za tímto účelem byly vytvořeny psychoakustické veličiny. Tyto veličiny zohledňují subjektivní vjem na jednotlivé vlastnosti a složky zvuku jako např. obsah vyšších frekvencí, zda se jedná o širokopásmový hluk nebo o čistý tón apod. Díky těmto veličinám by pak mělo být možné posoudit, jak bude daný zvuk subjektivně vnímán. Z těchto informací by pak bylo možné např. měnit parametry řízení pohonů tak, aby byl zvuk co nejméně nepříjemný.

Mým cílem bylo vybrat psychoakustické veličiny pro posouzení hluku pohonu. Hluk pohonu se dělí na tři základní složky:

- Ventilační hluk
- Elektromagnetický hluk
- Mechanický hluk

Ventilační složka je způsobena především chlazením motoru, převážně ventilátorem. Jedná se samozřejmě o aerodynamický hluk, ale zvuk může mít charakter sirény. K tomu dochází, jsou-li před nebo za ventilátorem nějaké překážky.

Mechanická složka je způsobena třením v ložiskách, značně se projevují např. vady valivých drah apod., vibrace způsobené nevyvážením rotujících částí stroje, u stejnosměrných motorů se také projevuje hluk od kartáčů.

Elektromagnetický hluk, na který je tato práce zaměřena, způsobují elektromagnetické síly mezi jednotlivými částmi stroje, ale také způsobují vibrace částí elektrického stroje. Ty se následně přenášejí do okolního prostředí jako hluk. To je způsobeno zejména samotnou konstrukcí stroje jako například počet drážek a zubů. Šíří se ale také z napájecích přívodů a sériových indukčností. U moderních pohonů s asynchronním pohonem je obohacen o frekvence měniče kmitočtu.

Z výsledků práce by pak mělo být zřejmé, zda jsou tyto veličiny vhodné pro posuzování konkrétně elektromagnetického hluku pohonu. Pro posuzování hluku jsem zvolil tyto psychoakustické veličiny: hlasitost, ostrost, hrubost, fluktuační síla a tonalita.

Pro posouzení celkové příjemnosti daného hluku jsou pak tyto veličiny sumarizovány do tzv. sensorické přívětivosti. Díky této veličině je možné vyhodnotit daný hluk z hlediska celkové příjemnosti a je také možné jednotlivé hluky porovnávat mezi sebou.

V závěru práce je pak zhodnocena přesnost výpočtu ve srovnání se subjektivním vjemem na kontrolních zvukových záznamech trakčního pohonu a jsou diskutovány možné úpravy a vylepšení daných výpočtů.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

p_b	Atmosférický tlak [Pa]
p_0	prahový akustický tlak [Pa]
ρ	hustota prostředí [kg/m^3]
c	rychlost akustické vlny [m/s]
v_{\max}	maximální rychlost částic kolem rovnovážné polohy [m/s]
P_0	prahový akustický výkon [W]
I	akustická intenzita
I_0	prahová akustická intenzita
f_1, f_2, f_3, f_4	krajní frekvence třetinooktávových pásem [Hz]
p_{\max}	maximální akustický tlak
P	akustický výkon [W]
E	akustická energie [J]
S	plocha akustické vlny [m^2]
L_P	hladina akustického výkonu [dB]
L_I	hladina akustické intenzity [dB]
L_p, SPL	hladina akustického tlaku [dB]
f_m	centrální frekvence třetinooktávových pásem [Hz]
DFT	diskrétní Fourierova transformace
FFT	rychlá Fourierova transformace
PSD	spektrální výkonová hustota
NMT	noise masking tone
TMN	tone masking noise
NMN	noise masking noise
SMR	signal to mask ratio
N'	specifická hlasitost [son]
L_{TQ}	excitační hladina prahu slyšitelnosti [dB]
L_E	excitační hladina [dB]
S	ostrost [Acum] orig Sharpness
R	hrubost [Asper] orig. Roughness
ΔL	subjektivní maskovací hloubka
f_{mod}	modulační frekvence [Hz]
m_i	zobecněné modulační hloubky
$e_i(t)$	časový průběh excitace

$H_i(f_{\text{mod}})$	modulaci transformující funkce
sBP_i	filtrovaný časový průběh obálky signálu
$r(sBP_i)$	amplitudový rozsah filtrovaného časového průběhu obálky
X_{i-1}, X_{i+1}	korelační koeficienty
F	fluktuační síla [vacil]
SFM	měřítko plochosti spektra
T	tonalita
P	Senzorická přívětivost
SQ	Sound quality index
$H_2, H_5, H_{16}, H_{21}, H_{42}$	vektory koeficientů modulaci transformujících funkcí

1 METODIKA ŘEŠENÍ

V této kapitole je přehled a shrnutí obsahu celé práce, tedy stručný popis jednotlivých kapitol, se zdůvodněním, proč je probírané téma důležité pro dosažení cíle práce.

V kapitolách 2-5 jsou sepsány nezbytné teoretické poznatky o psychoakustických veličinách, informace nezbytné pro sestavení modelů a interpretaci výsledků. V 6. kapitole jsou pak popsány jednotlivé skripty pro výpočet těchto veličin. V poslední kapitole jsou pak popsány výsledky pro jednotlivé záznamy a zhodnocení výsledků.

V 2.kapitole jsou popsány základní veličiny, se kterými se a akustice běžně pracuje a jsou využívány při popisu, případně výpočtu psychoakustických veličin., jako např. akustický tlak. Pro výpočet psychoakustických veličin jsou důležitá třetinooktávová pásma popisována v podkapitole 2.5, jsou jimi aproximována kritická pásma jejichž popis je v kapitole 4.1.4. Poslední část druhé kapitoly je věnována popisu Furieorovy transformace, konkrétně její diskrétní formy. Tato metoda je využívány při výpočtu spektrální výkonové hustoty popsané v podkapitole 2.6.2, jejíž popis je uveden, protože je zásadní při výpočtu některých psychoakustických veličin. Také jsem narazil na komplikace v implementování metody v Matlabu, podrobnosti jsou v kapitole 6.1.3.

Ve 3.kapitole je stručně popsán sluchový orgán a křivky stejné hlasitosti, které zohledňují fakt, že lidský sluch nezpracovává kmitočtové pásmo lineárně. Není tedy důležitý pouze akustický tlak stimulu, ale také jeho frekvence. To je zohledněno ve výpočtech jednotlivých veličin.

Ve 4.kapitole jsou pak uvedeny zvolené psychoakustické veličiny pro posouzení elektromagnetického hluku pohonu. Pro každou veličinu je uvedeno, proč byla zvolena, její jednotka a základní definice, a pak teoretický postup výpočtu. V rámci kapitoly o Hlasitosti je uveden také popis zmiňovaných kritických pásem a tzv. Maskování, které jsou klíčové pro výpočet psychoakustické hlasitosti a ostatních také ostatních veličin.

U výpočtu hrubosti je popisován Auresův a Danielův model. V samotném skriptu je využit Danielův model, ale protože vychází z Auresova modelu, je popsán nejprve Auresův model v kapitole 4.3.3 a poté jsou v kapitole 4.3.4 uvedeny pouze modifikace v Danielově modelu.

V 5. kapitole je uveden popis komplexních veličin, které usnadňují posouzení jednotlivých záznamů zvuků z hlediska přijemnosti. Je uveden výpočet a stručný popis.

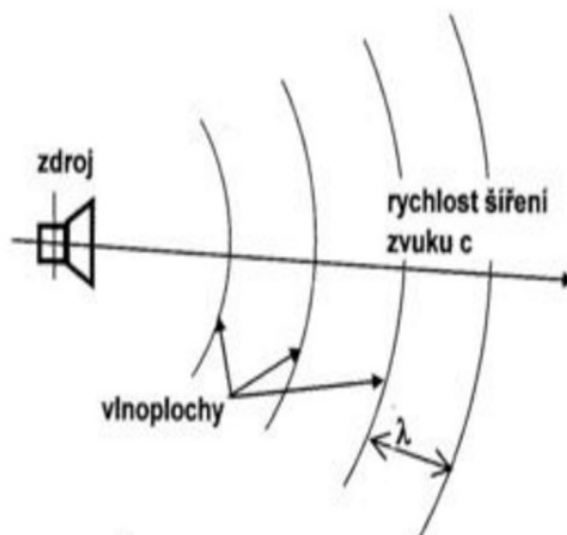
V 6. kapitole je popis samotného skriptu. Nejprve jsou v kapitole 6.1 uvedeny pomocné skripty a skripty pro přípravu záznamu k samotnému výpočtu jednotlivých psychoakustických veličin. Popisy skriptů pro výpočet samotných veličin jsou popsány v kapitolách 6.2-6.6.

V poslední kapitole Výsledky, testy a srovnání je uvedeno ověření funkce pomocí kalibračních tónů pro každou veličinu. Následuje výpočet pro jednotlivé záznamy elektromagnetických hluků pohonu, jejich srovnání a zhodnocení. Nejprve jsou představeny obecné poměry a hodnoty psychoakustických veličin pro předložené záznamy. V následující kapitole pak následuje diskuze výsledků jejichž zhodnocení a případné návrhy na zlepšení jsou uvedeny v závěru.

2 ZÁKLADNÍ POJMY A JEDNOTKY

Pro další popis psychoakustických veličin je třeba vymezit některé základní pojmy a skutečnosti. Zvuk, případně hluk, je mechanické kmitání částic pružného prostředí o frekvenci kmitů 20 Hz až 16 kHz, pokud jde o slyšitelné pásmo. Frekvence pod 20 Hz je oblast infrazvuku, frekvence nad 16 kHz se nazývá ultrazvuk. Pro tuto práci je důležité právě slyšitelné pásmo.

Za obvyklých podmínek se zvuk šíří vzduchem rychlostí 343 m/s. Kmitající částice se nepohybují se šířícím se vlněním, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh a předávají energii sousedním částicím. Akustické vlnění prostupuje prostředím od zdroje ve vlnoplochách, které jsou znázorněny na obrázku 2.1. Po celé ploše vlnoplochy má akustický tlak stejnou hodnotu [1].



Obr 2.1: Znázornění vlnoploch [1]

Pro výpočet psychoakustických veličin se vychází z některých základních veličin využívaných v akustice. Jedná se především o akustický tlak a jeho hladinové vyjádření a třetinooktávové filtry. Těmto a dalším veličinám je v následujících kapitolách věnován stručný popis.

2.1 AKUSTICKÝ TLAK

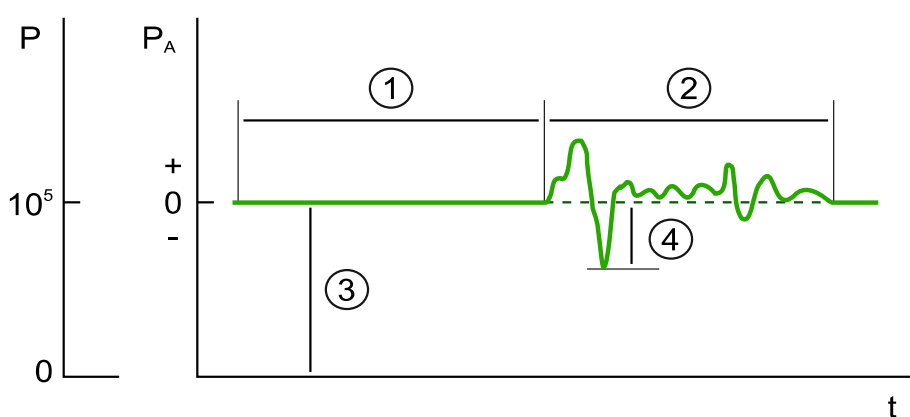
Kmitání částic látek způsobuje lokální zhuštění, čímž se tlak zvýší, případně lokální rozptýlení, což způsobí pokles tlaku. Lidský sluch je trvale vystavován atmosférickému tlaku o hodnotě $p_B = 10^5$ Pa. Na obrázku 2.2 je vidět, že akustický tlak (na obrázku 2.2 značka 4) jsou odchylky od tohoto tlaku (na obrázku 2.2 značka 3). Aby byl zvuk slyšitelný, musí být ve vnímaném frekvenčním pásmu, ale také musí mít akustický tlak nad tzv. prahem slyšitelnosti. Tato křivka byla zjištěna experimentálně, nicméně stejně jako u mnoha následujících veličin se za vztažnou považuje hodnota pro 1 kHz. Minimální odchylka od atmosférického tlaku, kterou je schopen lidský sluch zaznamenat, je označována prahový akustický tlak a jeho hodnota je $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa [1].

Tato hodnota se pak také používá jako referenční při hladinovém akustického tlaku. Vztah pro maximální hodnotu akustického tlaku:

$$p_{max} = \rho c v_{max} \quad (2.1)$$

kde ρ je hustota prostředí, c je rychlost akustické vlny prostupující prostředím a v_{max} je maximální rychlost kmitavého pohybu částic kolem rovnovážné polohy [1]. Pro některé výpočty nicméně stačí znát efektivní hodnotu akustického tlaku, ta se dá spočítat obdobně jako v elektrotechnice:

$$p_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (2.2)$$



Obr 2.2: Atmosférický a akustický tlak [2]

2.2 AKUSTICKÝ VÝKON

Akustický výkon je primární veličina pro popis a porovnávání akustických zdrojů zvuku.

Jde o akustickou energii vyzářenou do okolí za jednotku času, vzorec pro výpočet tedy je:

$$P = \frac{dE}{dt} [W] \quad (2.3)$$

Na rozdíl od akustického tlaku není ovlivněn vnějšími vlivy jako jsou:

- orientace a vzdálenost posluchače
- pohyb posluchače nebo zdroje
- teplota a rychlost proudění prostředí
- odražení zvuku

Rozměrem akustického výkonu jsou Watty. Obdobně jako pro akustický tlak je definován prahový akustický výkon $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$ [1].

2.3 AKUSTICKÁ INTENZITA

Jde o vektor popisující absolutní velikost a směr toku energie v daném místě. Rozměrem intenzity je Wm^{-2} . Lze ji tedy vypočítat dle vzorce:

$$I = \frac{P}{S} \quad (2.4)$$

kde P je akustický výkon a S je plocha, kterou prochází akustická vlna. Pro rovinou plochu pak platí zjednodušený vztah:

$$I = v_{ef} P_{ef} \quad (2.5)$$

Jde tedy o energii za čas, která projde danou plochou. Prahová akustická intenzita je $I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$ [1].

2.4 HLADINOVÉ VYJÁDŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN

Logaritmické vyjádření akustických veličin bylo zavedeno ze dvou hlavních důvodů. První z důvodů je zkrácení značného rozsahu pozorovaných akustických veličin, kde může docházet k výkyvům, např. v případě intenzity o 12 řádů. Druhým důvodem je pak, že lidský sluch zpracovává vnímané zvuky logaritmicky.

Jednotka hladinových veličin je decibel a jedná se o desítkový logaritmus poměru dvou hodnot, změřené a referenční veličiny.

Hladina akustického výkonu:

$$L_p = 10 \log\left(\frac{P}{P_0}\right); P_0 = 10^{-12} W \quad (2.6)$$

Hladina akustické intenzity:

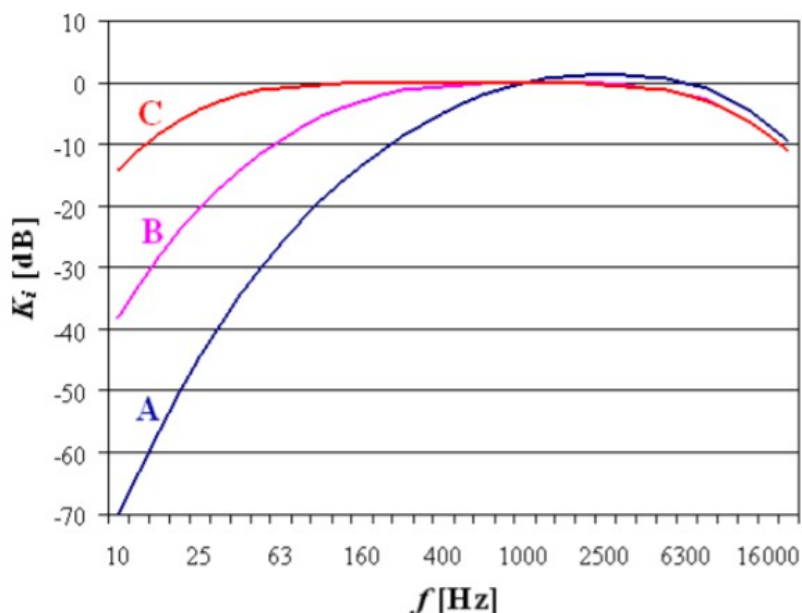
$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right); I_0 = 10^{-12} W m^{-2} \quad (2.7)$$

Hladina akustického tlaku:

$$SPL = L_p = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right); p_0 = 2 * 10^{-5} W \quad (2.8)$$

Využívá se raději označení SPL, aby nedocházelo k zaměňování akustického tlaku a výkonu [3].

Existují také veličiny pro výpočet akustických veličin se započítáním frekvenční závislosti sluchu na frekvenci. Proto byly vytvořeny tzv. váhové filtry typ A, B, C a pro leteckou dopravu typ D. Jedná se o inverzní křivky ke křivkám stejné hlasitosti při hladinách 40,80



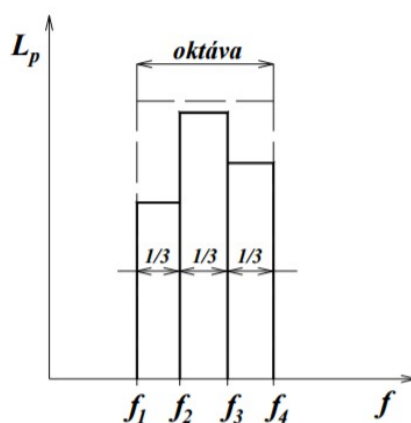
Obr 2.3: Váhové filtry [3]

a 120dB. Nejčastěji se počítá s váhovým filtrem A. Pro frekvenci 1 kHz mají tyto filtry nulovou hodnotu. Jejich průběh je znázorněn na obrázku 2.3 [3].

2.5 KMITOČTOVÁ PÁSMA

Pro subjektivní vjem není důležitá pouze hodnota akustického tlaku, ale také jakou má daný zvuk frekvenci. Proto jsou pro popis daného zvuku důležitá i jejich frekvenční spektra. Nicméně pokud bychom chtěli např. spektrum s frekvenčním krokem 1 Hz, je potřeba získat 1 sekundu dlouhý vzorek ustáleného stavu, který je v praxi problém získat. V praxi se proto pro zjednodušení zavádí tato pásma s ohledem na to, že nechceme příliš zhoršit přesnost měření.

Existují různé druhy pásem, oktávová, třetinooktávová atd. Pro potřeby této práce jsou nejdůležitější právě třetinooktávová pásma. Ta dělí slyšitelnou oblast zvuku do 30 frekvenčních pásem. Frekvence f_1 a f_4 ohraničují pásmo jedné oktávy a frekvence f_2 a f_3 jsou krajní frekvence vnitřních třetinooktávových pásem. Toto je zobrazeno na obrázku 2.4 [3].



Obr 2.4: Třetinooktávové filtry
převzato z [3]

Pro tyto frekvence platí následující vzorec:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \sqrt[3]{2} = 1.26 \quad (2.9)$$

Poměr krajních kmitočtů v jednotlivých oktávách je konstantní. Pro krajní kmitočty f_1 a f_2 pak platí vztah:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{f_m}{\sqrt[6]{2}} \\ f_2 &= f_m \sqrt[6]{2} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Centrální a krajní frekvence těchto pásem jsou zobrazeny v tabulce 1 [3]. V této práci budou třetinooktávové filtry použity pro aproximaci tzv. kritických pásem popsaných v kapitole 4.1.4.

Střední frekvence kmitočtového pásma[Hz]		Mezní frekvence	
Oktávové pásmo	Třetinooktávové pásmo	Dolní mez (f_1)[Hz]	Horní mez (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	285	353
500	400	353	440
	500	440	565
	630	565	707
1000	800	707	880
	1000	880	1130
	1250	1130	1414
2000	1600	1414	1760
	2000	1760	2250
	2500	2250	2825
4000	3150	2825	3530
	4000	3530	4400
	5000	4400	5650
8000	6300	5650	7070
	8000	7070	8800
	10000	8800	11300
16000	12500	11300	14140
	16000	14140	17600
	20000	17600	22500

Tab 1: Frekvence třetinooktávových pásem [3]

2.6 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA

Pro vyhodnocení akustického signálu je důležité znát rozložení výkonu mezi jednotlivými frekvencemi. Tato závislost se zobrazuje pomocí frekvenčních spekter. Lze tak snadno určit, které frekvence mají na hluku největší podíl. Nicméně u akustických signálů je důležité znát tuto závislost také z důvodů nelineární závislosti lidského sluchu na frekvenci.

Základní metoda pro stanovení frekvenčního spektra signálu je Fourierova transformace:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.11)$$

Převod z frekvenční oblasti zpět do časové je realizován pomocí inverzní Fourierově transformaci:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.12)$$

Před výpočtem hlasitosti a ostatních veličin je třeba stanovit tzv. spektrální výkonovou hustotu. K jejímu stanovení se využívá diskrétní Fourierova transformace (DFT) resp. rychlá Fourierova transformace (FFT).

2.6.1 DISKRÉTNÍ A RYCHLÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE

Z definičního vztahu pro Fourierovu transformaci vyplývá, že potřebujeme znát matematické vyjádření signálu pro konečný interval hodnot. V případě reálného signálu je tedy zapotřebí vhodná numerická metoda. Tou je právě diskrétní Fourierova transformace dána vztahem:

$$S_{DFT}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{-j2\pi nk/N}; kde k=0,1,\dots,N-1 \quad (2.13)$$

Zpětná diskrétní Fourierova transformace (IDFT) je dána vztahem:

$$s(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_{DFT}(k) e^{j2\pi nk/N}; kde n=0,1,\dots,N-1 \quad (2.14)$$

Výpočet pomocí DFT vyžaduje dle definice N^2 komplexních součinů a N^2 komplexních součtů, proto byl vyvinut efektivnější algoritmus pro výpočet DFT. Jde o tzv. rychlou Fourierovu transformaci (FFT), která vyžaduje pouze $N \cdot \log_2(N)$ komplexních součinů a součtů. Jak je naznačeno FFT vychází z DFT a pro její výpočet existuje více způsobů.

2.6.2 SPEKTRÁLNÍ VÝKONOVÁ HUSTOTA

Výkonová spektrální hustota (PSD) je vyjádření výkonu v určitém frekvenčním kroku (Δf) ve spojitém spektru. Je vyjádřena ve Watech na Hz.

Pro výpočet PSD existuje řada metod, které se dělí do dvou základních kategorií. Jsou jimi parametrické a neparametrické metody. Parametrické metody pracují s modelem vzniku signálu, proto je třeba znát jeho parametry a strukturu již předem.

U neparametrických metod není třeba předem znát vlastnosti, resp. model vzniku signálu. Jsou také jednoduché na výpočet a využívají výše zmíněnou FFT.

Při výpočtu hlasitosti je využita právě neparametrická metoda, a to sice metoda Welchova. Nicméně tato metoda vychází z Bartlettovy metody a proto je v této kapitole popsána nejdříve tato metoda. Obě tyto metody nicméně vycházejí ze základní metody pro odhad výkonového spektra z periodogramu [4].

Periodogram je kvadrát absolutní hodnoty DFT při použití rovnoměrně vzorkovaného signálu. Vztah pro periodogram je:

$$PSD(f(m)) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{\frac{(-j2\pi mn)}{N}} \right|^2 \quad (2.15)$$

kde N je počet vzorků; $y(n)$ je vzorek číslo n , a $f(m)$ je kmitočet signálu číslo m [4].

2.6.3 BARTLETTOVA METODA

Na rozdíl od prosté metody periodogramu je při Bartlettově metodě (BAR) analyzovaný signál rozdělen do vzájemně se nepřekrývajících segmentů. Základní signál o délce L , a kde délka segmentu je N , je tedy rozdělen dle vzorce:

$$y_l(n) = y(n + lN) \quad (2.16)$$

Pro každý takový segment je pak vypočítán periodogram dle vzorce:

$$PSD_{yy}^l(m) = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_l(n) e^{\frac{(-j2\pi mn)}{N}} \right|^2 = \frac{1}{N} |DFT[y_l(n)]|^2 \quad (2.17)$$

Pro hodnoty $m = 0, 1, \dots, N-1$; $l = 1, 2, \dots, L-2$;

Tyto periodogramy jsou poté průměrovány dle vzorce:

$$PSD_{yy}^L(m) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} PSD_{yy}^l(m) \quad (2.18)$$

2.6.4 WELCHOVA METODA

Welchova metoda (Welch) je modifikací BAR metody ve dvou hlavních bodech:

- Povoluje překrývání jednotlivých segmentů
- Násobení časových oknem před samotným výpočtem

Data jsou tedy tentokrát rozdělena resp. reprezentována dle vzorce:

$$y_l(n) = y(n + lN(1-v)) \quad (2.19)$$

kde v je velikost překryvu.

Výpočet jednotlivých segmentů, tedy zahrnuje také násobení časovým oknem, a výsledný tvar pro výpočet takto upraveného periodogramu je:

$$PSD_l(m) = \frac{1}{NU} \left| y_l(n) w(n) e^{\frac{-j2\pi mn}{N}} \right|^2 \quad (2.20)$$

pro $l = 0, 1, \dots, L-1$. U je normalizační koeficient vypočítaný dle vzorce:

$$U = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w^2(n) \quad (2.21)$$

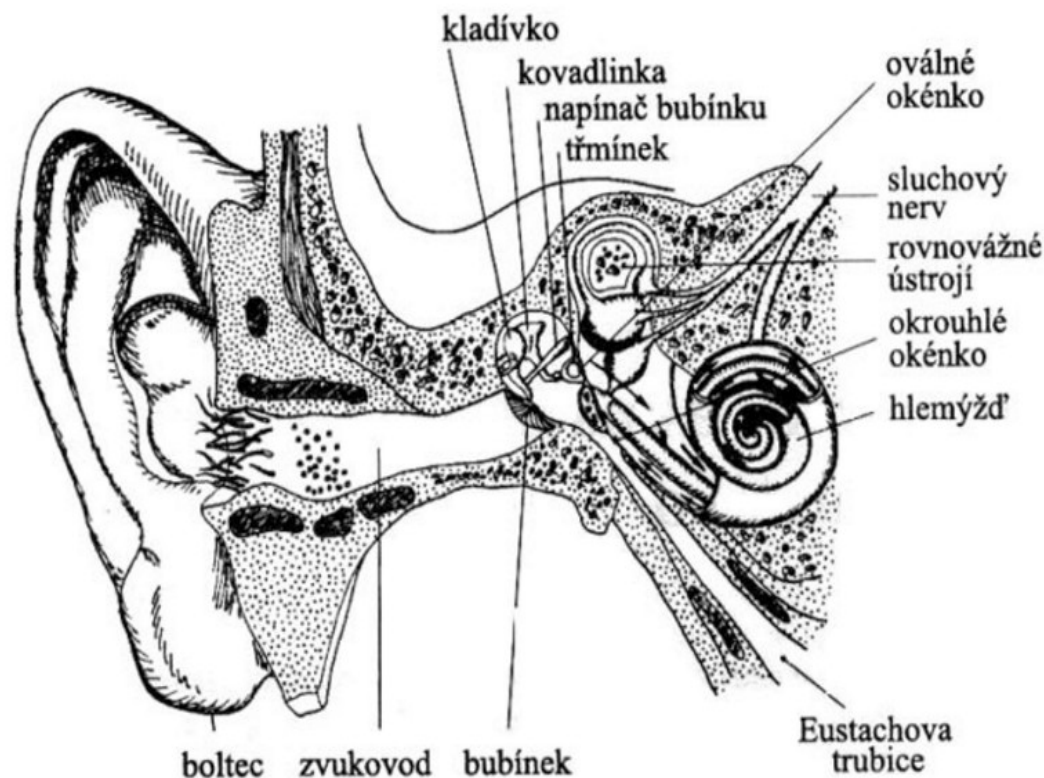
kde w je reprezentace resp. váha zvoleného časového okna.

Dle vzorce:

$$PSD_l^L(m) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} PSD_l(m) \quad (2.22)$$

je pak vypočítaný odhad spektra jako průměr upravených periodogramů [4].

3 SLUCHOVÉ ÚSTROJÍ



Obr 3.1: Sluchové ústrojí [5]

Lidské sluchové ústrojí se skládá ze tří částí: vnějšího, středního a vnitřního ucha. Jednotlivé části sluchového ústrojí jsou zobrazeny na obrázku 3.1. Úkolem vnějšího ucha je dopravit zvuk na bubínek. Zvuk procházející okolním prostředím je tedy zachycen boltcem, který jeho energii soustředí do zvukovodu. Další funkcí boltce je také částečné stínění zvuků znějících zezadu. Díky tomu jsme schopni určit, zda zvuk přichází zezadu. Zvukovod dopravuje energii zvuku na bubínek a dále do středního ucha, nicméně také je svými rozměry nastaven jako rezonátor pro frekvence 3 až 4 kHz. Proto jsme na zvuky v tomto frekvenčním pásmu tak citliví, zvukovod jejich intenzitu až zdesetinásobí ve srovnání se vstupujícím signálem. K bubínku jsou připojeny jemné kůstky středního ucha: kladívko, kovádlínka, napínač bubínku a třmínek. Ty slouží jako jemné mechanické ústrojí pro převod signálu do vnitřního ucha. Ze středního ucha také vede Eustachova trubice, která slouží k vyrovnávání tlaků uvnitř s vnějšími tlaky působícími na bubínek. Další významný úkol tohoto ústrojí je zmenšení amplitud, které působí na bubínek. Pro představu – poměrně velké kmity bubínku, tedy kmity, které způsobují zvuky o 120 dB,

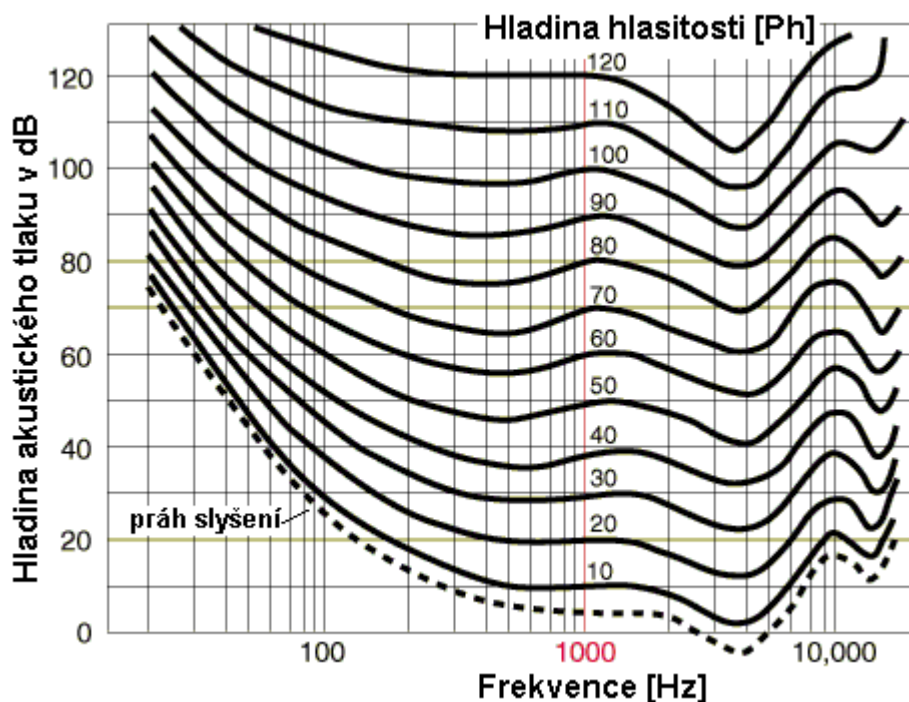
což představuje práh bolesti, byly rovné řádu 10^{-6} m. Pro běžný hovor jsou tyto kmity v řádech 10^{-10} m [5].

Vnitřní ucho se pak skládá z okruhového okénka a hlemýždě, ve kterém je uložen sluchový orgán. Na membráně basialis v hlemýždě je umístěno Cortiho ústrojí, na které ústí jemná vlákénka sluchového nervu. Tyto vlákna jsou uložena po délce bazální membrány v trubici o délce 33 mm, stočené do 2,5 závitů. Zde má akustická energie asi jen tisícinu síly signálu dopadajícího na bubínek. Nicméně pro sluchový orgán je to dostačující pro správné zpracování [5].

Ucho je tedy v podstatě velice citlivý analyzátor akustického tlaku. Rozkládá přijímaný signál na jednotlivé složky ve velmi krátkém čase a s velkou rozlišovací schopností.

Z předchozích odstavců není patrný důležitý fakt, že každý člověk vnímá zvuk subjektivně a každý z nás tedy reaguje na různé zvuky odlišně. Na základě statistického zpracování vjemů reprezentativně složené skupiny jedinců byly zjištěny souvislosti mezi veličinami zvuku, které můžeme objektivně měřit a průměrným sluchovým vjemem. Postupovalo se tak, že se všechny tóny o různých frekvencích posuzují s referenčním tónem o frekvenci 1 kHz [5]. Z takto získaných dat poté byly vypracovány tzv. křivky stejné hlasitosti na obrázku 3.2.

Na obrázku je vidět porovnání objektivní frekvenčně nezávislé hladiny akustického tlaku, a



Obr 3.2: Křivky stejné hlasitosti [6]

subjektivní frekvenčně závislé hladiny hlasitosti (silně vytažené čáry) ve fónech. Tyto

veličiny jsou shodné jen při frekvenci 1 kHz, jak vyplývá z předcházejícího odstavce. Fón je subjektivní hladinová jednotka. Její definice: zvuk o frekvenci 1kHz a hladině akustického tlaku 40 dB má velikost právě 40 Ph. Práh slyšitelnosti odpovídá 0 Ph, práh bolesti odpovídá 120Ph. Nejdůležitější fakt je, že lidé nevnímají všechny frekvence stejně, nejcitlivěji vnímáme rozsah frekvencí 2 až 4 kHz [5].

Tóny o nižších frekvencích tedy musí mít mnohem větší akustický tlak, abychom je vnímali stejně jako tóny o frekvencích mezi 500 Hz až 5 kHz. Také se samozřejmě mění práh slyšení (čárkovaná čára). Pro frekvence kolem 3 kHz je potřeba akustický tlak menší než referenční akustický tlak (pro 1kHz), pro tón o frekvenci 100Hz je třeba akustický tlak $2 \cdot 10^{-3}$ Pa, a například pro 10 kHz přibližně 10^{-4} Pa [5]. Celý práh slyšení se dá aproximovat dle vzorce:

$$T(f) = 3.64 \left(\frac{f}{1000}\right)^{-0.8} - 6.5e^{-0.6\left(\frac{f}{1000}-3.3\right)^2} + 10^{-3} \left(\frac{f}{1000}\right)^4 \text{ db SPL} \quad (3.1)$$

Výpočet prahu slyšení byl přejet z [7].

4 PSYCHOAKUSTICKÉ VELIČINY

Pro posuzování elektromagnetického hluku pohonu jsem vybral následující psychoakustické veličiny: Hlasitost, ostrost, hrubost, flukтуаční sílu a tonalitu. Také se tyto veličiny dají sumarizovat do již definovaných komplexních veličin pro jednodušší vyhodnocení a porovnání různých záznamů zvuku.

V úvodu této kapitoly je třeba ještě zmínit, že pro výpočet jednotlivých veličin existuje více metod pro výpočet a také to, že většina z nich není nijak standardizována. Jednotlivé výpočetní modely jsem tedy vybíral podle dvou hlavních kritérií. Prvním bylo, zda je daná metoda nějakým způsobem standardizována, pak jsem se přikláněl právě k této verzi. Druhým, bohužel nezanedbatelným faktem, že údaje a informace pro samotné zhotovení modelů je často velmi problematické získat.

4.1 HLASITOST

Stejně jako uvedené veličiny zohledňuje akustický tlak, tedy hlasitost jako takovou, obsah frekvencí resp. závislost lidského sluchu na obsažených frekvencích. Hlavním rozdílem oproti běžně využívaným veličinám je, že se pokouší zahrnout také efekt maskování.

4.1.1 JEDNOTKA

Jednotka hlasitosti je son. Vychází ze starší jednotky fón (Ph) popisovanou ve 3. kapitole. Nicméně hladina akustického tlaku nevystihuje přesně subjektivní vjem ze zvuků různých akustických tlaků a proto byla zavedena jednotka son.

Son je na rozdíl od hladinových jednotek jednotka lineární. Je definována pro frekvenci 1 kHz a akustický tlak 40 dB, pak má daný zvuk velikost právě jeden son. Pokud se hladina akustického tlaku zvýší o 10 dB, subjektivně se bude zdát zvuk dvakrát hlasitější a stejně tak se dvakrát zvýší jednotka son. Pro 1 kHz tón tedy platí, že s 10 dB bude mít hodnota hlasitosti v sonech dvakrát vyšší hodnoty např. pro 50 dB bude hlasitost 2 sony atd. [5].

4.1.2 MASKOVÁNÍ

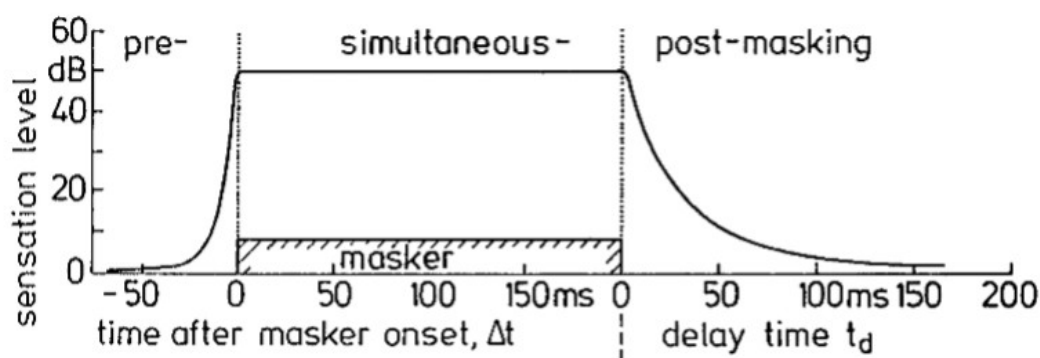
Maskování je jev, při kterém jeden ze zvuků částečně nebo zcela zamaskuje druhý. To znamená, že ve výsledku uslyšíme pouze silnější, anebo jejich sumarizaci. Maskování se dělí na základní dva druhy, na časové a frekvenční maskování.

4.1.3 ČASOVÉ MASKOVÁNÍ

Dochází k němu pokud se dva stimuly nachází v úzkém časovém pásmu. Pokud má jeden z nich vyšší akustický tlak, může být druhý částečně, případně i plně zamaskován, tedy, že ve výsledku bude lidský sluch schopen zaznamenat jen jeden z nich. Časové maskování se dělí na tři druhy[8]:

- Pre-masking
- Post-masking
- Simultaneous-masking

Pre-masking je jev, při kterém silnější stimul maskuje signál, který mu časově předchází, jak je znázorněno na obrázku 4.1. Pokud se maskovaný stimul nachází ve šrafované oblasti, dojde k jeho zamaskování. Časová oblast před maskerem, kde se uplatní pre-masking, je 10-50 ms samozřejmě závisí na akustickém tlaku maskeru [8].



Obr 4.1: Časové maskování [9]

Post-masking je pak podobný efekt, ale s tím rozdílem, že se jedná o oblast za maskerem. Z obrázku 4.1 je vidět, že post-masking má výrazně větší vliv než pre-masking. Působí v delší časové oblasti (až přes 150 ms). Maskovací křivka má také mnohem pomalejší pokles. To je dáno určitou setrvačností lidského sluchu [8].

Simultánní neboli frekvenční maskování je pak jev, kdy se masker a maskovaný signál časově překrývají. Především je třeba zdůraznit, že záleží na charakteru stimulu, který maskuje nebo je maskován. Tři hlavní zjednodušené modely simultánního maskování jsou:

- NMT – šum maskuje tón
- TMN – tón maskuje šum
- NMN – šum maskuje šum

Hlavní rozdíl mezi těmito třemi modely je v tzv. poměru maskování signálu (SMR), který je nejmenší pro frekvence maskovaného signálu blízké centrální frekvenci maskeru. Např. pro NMT je SMR 4-5 dB, což znamená, že pokud bude mít tón o 4-5 dB menší intenzitu než šum, který ho maskuje, stane se tón neslyšitelným. Naproti tomu v případě TMN je SMR 21-28 dB. Tón tedy musí být výrazně silnější pro zamaskování šumu. V případě NMN může být SMR až 26 dB [7].

4.1.4 KRITICKÁ PÁSMA

Před popisem frekvenčního maskování je třeba vysvětlit, co jsou to tzv. kritická pásma. Bylo zjištěno, že lidský sluch dělí frekvenční spektrum do určitých pásem. Člověkem vnímané frekvence (16 Hz až 20 kHz) jsou rozděleny celkem do 24 pásem. [1] Tato pásma jsou vypsány v tabulce 2. Nižší kritická pásma mají šířku kolem 100 Hz, ale s rostoucí frekvencí se tato šířka zvyšuje až na 3.5 kHz pro 24. pásmo. V praktických výpočtech se pak používá bark jako jednotka a ne jako pouhé pásmo. Je tedy možné prakticky během výpočtů narazit na údaj jako 22.1 Bark. To znamená, že se nacházíme v 22 barkovém pásmu, nicméně můžeme i určit v jaké části pásma. Kritická pásma jsou tedy udávána v Barkově stupnici a jejich jednotka je Bark. Pro přepočítání mezi barky a Herzy platí vztah:

$$z = 13 \arctan\left(\frac{0.76f}{1000}\right) + 3.5 \arctan\left(\frac{f}{1000}\right)^2 \quad (4.1)$$

Tato pásma jsou proto důležitá pro výpočet frekvenčního maskování, resp. hlasitosti a psychoakustických veličin [8]. Nicméně pro analyzování hluku mají příliš hrubé rozlišení, proto se aproximují oktávovými, resp. např. třetinooktávovými pásmy.

z[Bark]	Center Frequency (Hz)	Cut-off Frequency (Hz)	Bandwidth (Hz)
1	50	100	100
2	150	200	100
3	250	300	100
4	350	400	100
5	450	510	110
6	570	630	120
7	700	770	140
8	840	920	150
9	1000	1080	160
10	1170	1270	190
11	1370	1480	210
12	1600	1720	240
13	1850	2000	280
14	2150	2320	320
15	2500	2700	380
16	2900	3150	450
17	3400	3700	550
18	4000	4400	700
19	4800	5300	900
20	5800	6400	1100
21	7000	7700	1300
22	8500	9500	1800
23	10500	12000	2500
24	13500	15500	3500

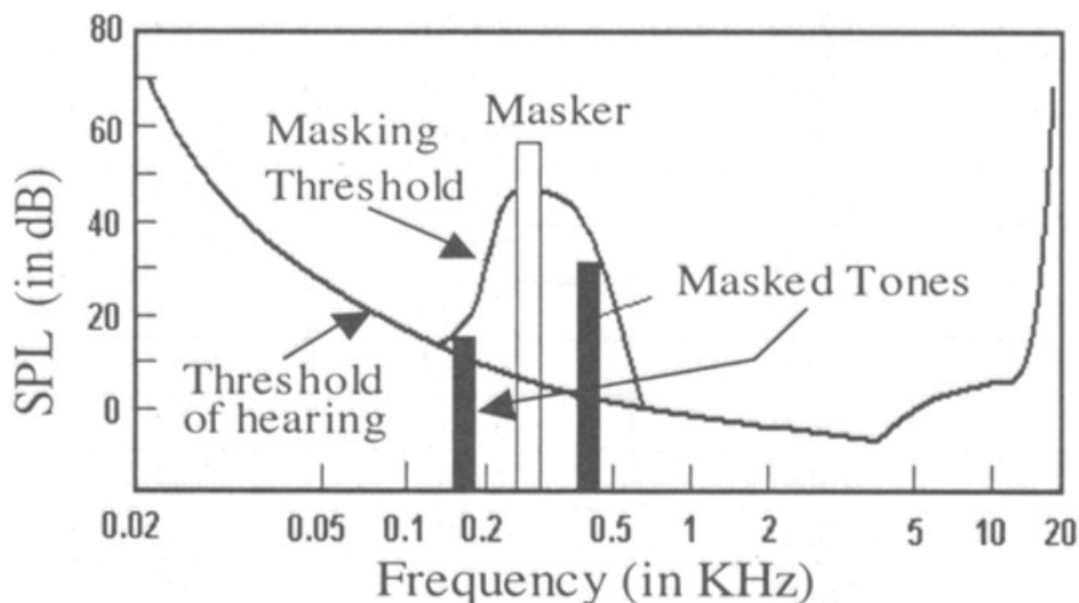
Tab 2: Frekvence kritických pásem [10]

4.1.5 FREKVENČNÍ MASKOVÁNÍ

Princip je podobný jako u časového maskování, ale jedná se o frekvenčně blízké signály, působící na lidský sluchový aparát současně. Frekvenční maskování je naznačeno na obrázku 4.2 Tento jev je nejsilnější právě v rámci kritických pásem. Pokud se dva stimuly nachází oba v jednom kritickém pásmu, dochází k úplnému zamaskování slabšího stimulu [8]. Je ale třeba také zohlednit tzv. rozptyl maskování. Signál nemusí způsobovat maskování jen v rámci jednoho kritického pásma, ale může způsobit zamaskování v blízkých kritických pásmech. Tento jev je často aproximován pomocí trojúhelníkových funkcí s definovanou strmostí (25 a 10 dB na Bark). Obecná aproximace pro tento jev je pak dána vzorcem:

$$SF_{db}(z) = 15.81 + 7.5(z + 0.474) - 17.5 \sqrt{1 + (z + 0.474)^2} \quad (4.2)$$

kde z je barkové pásmo [7].



Obr 4.2: Frekvenční maskování [11]

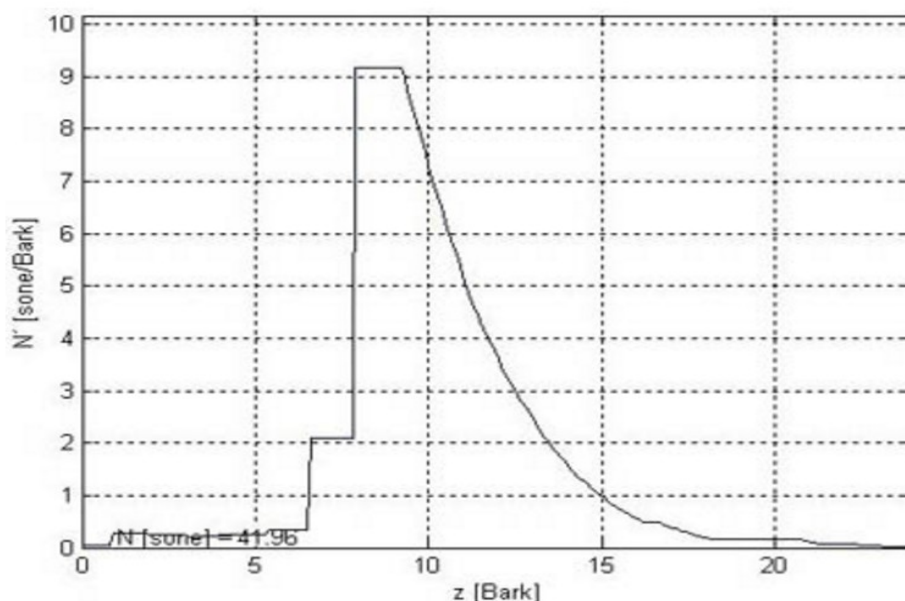
4.1.6 VÝPOČET HLASITOSTI

Pro výpočet hlasitosti využívám Zwickerův model pro měření, resp. výpočet hlasitosti. Vypočítává hlasitost pomocí třetinooktávových filtrů pro lepší rozlišení především na nízkých frekvencích a slouží především pro výpočet zvuků s charakterem šumu. Jeho tři hlavní vlastnosti jsou, že bere do úvahy:

- Závislost lidského sluchu na frekvenci
- Koncept kritických pásem
- Maskování

Zwickerův model je v podstatě grafická metoda pro výpočet hlasitosti, publikovaná např. ve standardu ISO 532 B nebo v DIN 45631. Jako jediná s popsanych metod tedy byla standardizována. Další výhodou byly snadno přístupné informace pro zhotovení, úpravu, popis apod. Metoda graficky popisuje a vypočítává hladinu hlasitosti zvuku, který byl analyzován pomocí třetinooktávových pásem [12].

Hlasitost je na rozdíl od typické frekvenční odezvy, která je funkcí fyzikální hodnoty v závislosti na frekvenci, vyjádřena v tzv. specifických hlasitostech N' [sone/bark] v závislosti právě na kritických pásmech [Bark] [12]. Tato křivka má svůj charakteristický tvar, příklad této křivky pro tón o frekvenci 1kHz a SPL 94 dB je uveden na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Křivka pro výpočet hlasitosti [12]

Celková hlasitost se určí jak obrázek 4.3 naznačuje jako plocha pod touto křivkou, tedy jako integrál specifických hlasitostí přes všechna kritická pásma dle vzorce:

$$N = \int_0^{24} N' dz \quad (4.3)$$

Vzorec pro výpočet specifických hlasitostí je pak dán vztahem:

$$N' = (0.0635 * 10^{0.025L_Q}) * [(0.75 + 0.25 * 10^{L_E - L_{TQ}})^{0.25} - 1] \quad (4.4)$$

Specifická hlasitost je funkcí podráždění (orig. Excitations nebo Excitations Level) definovaných pro jednotlivá kritická pásma. Bere v potaz nelineární vztah mezi podrážděním a specifickou hlasitostí. L_{TQ} je excitační hladina na prahu slyšitelnosti v tichu tedy bez přítomnosti dalšího stimulu, a L_E je excitační hladina [13]. Další popis je uveden na straně 52.

Na stránkách University of Salford [12] je uveden model pro výpočet hlasitosti v prostředí matlab. Tento model jsem zkoumal jako první nicméně jsem se jej rozhodl nevyužít především kvůli nefunkční filtraci signálu. Druhým důvodem je fakt, že model také vychází z DIN 45631, takže jediná výrazná změna oproti modelu z [14] jsou právě nefunkční filtry.

4.2 OSTROST

Další psychoakustickou veličinou je ostrost. Ta zohledňuje obsah akusticky vyšších frekvencí v měřeném hluku. Jedná se o frekvence 2150 Hz a výše. Ostrost není prozatím standardizovaná veličina, nicméně existuje několik možností, jak ji vypočítat. Veličina byla již v minulosti využita pro vyhodnocení např. hluku motorů, vysavačů, fénů apod. V této práci popisují a využívám ostrost tak, jak je popsána v [15], tedy tak, jak ji popsali Zwicker a Fastl. Metodu jsem vybral především ze dvou důvodů. Model a popis byl vyhotoven od stejných autorů jako hlasitost, ale hlavně výpočet vychází z již vypočítaných specifických hlasitostí získaných při výpočtu hlasitosti.

4.2.1 JEDNOTKA

Zwicker a Fastl definují jednotku acum. Jeden acum je definován jako zvuk o šířce jednoho kritického pásma s centrální frekvencí 1 kHz a akustickým tlakem 60 dB [15].

4.2.2 VÝPOČET

Zwickerova a Fastlova metoda spočívá ve vážení prvního momentu specifické hlasitosti, který je pak vážen funkcí, jejíž parametry jsou popsány níže. Tento postup se opakuje pro všechna kritická pásma a výsledek je poté dělen celkovou hlasitostí a násoben proporcionální konstantou [15]. Vzorec tedy potom vypadá takto:

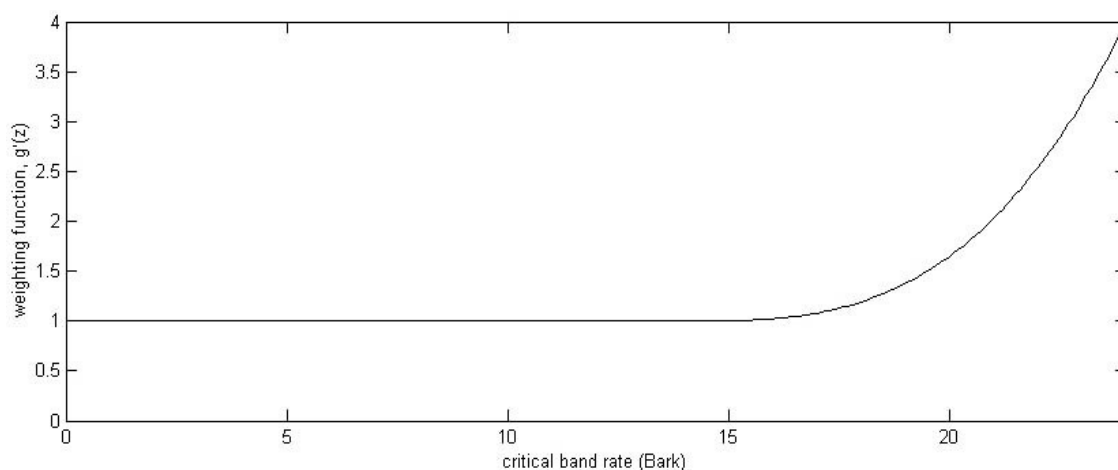
$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} N' g(z) z d_z}{\int_0^{24} N' d_z} acum \quad (4.5)$$

a předpis a graf funkce jsou zobrazeny na obrázcích 4.4 a 4.5.

where:

$$\begin{cases} z < 14, \rightarrow g'(z) = 1 \\ z > 14, \rightarrow g'(z) = 0.00012 \cdot z^4 - 0.0056 \cdot z^3 + 0.1 \cdot z^2 - 0.81 \cdot z + 3.51 \end{cases}$$

Obr 4.4: Definice funkce $g'(z)$ [15]

Obr 4.5: Graf funkce $g'(z)$ [15]

Na závěr bych zmínil, že samozřejmě existuje více způsobů pro výpočet ostrosti, konkrétně jsem zkoušel uvedenou metodu dle Zwickera a Fastla. Dohledal jsem ovšem i výpočet např. dle Aurese v [10]. Výpočet je v podstatě obdobný, zkoušel jsem ji také simulovat, nicméně lepší výsledky vycházely právě pro Zwickerovu a Fastlovu metodu výpočtu. Konkrétně pro tón o frekvenci 1 kHz a SPL 60 dB (tento tón je často používán pro psychoakustické veličiny jako kalibrační) vycházely výsledky dle jednotlivých metod takto.

Tón 1kHz 60dB SPL	Reference	Zwicker&Fastl	Aures
Ostrost [Acum]	1	1,03	2,37

Tab 3: Srovnání metod pro měření ostrosti

Je možné, že jsem neměl zcela korektní informace, případně jsem se dopustil chyby v programu při sestavování modelu dle Aurese, nicméně toto byly hlavní důvody, proč jsem zvolil právě metodu uvedenou na stránkách University of Salford. Postup výpočtu dle Aurese je uveden v [10].

4.3 HRUBOST

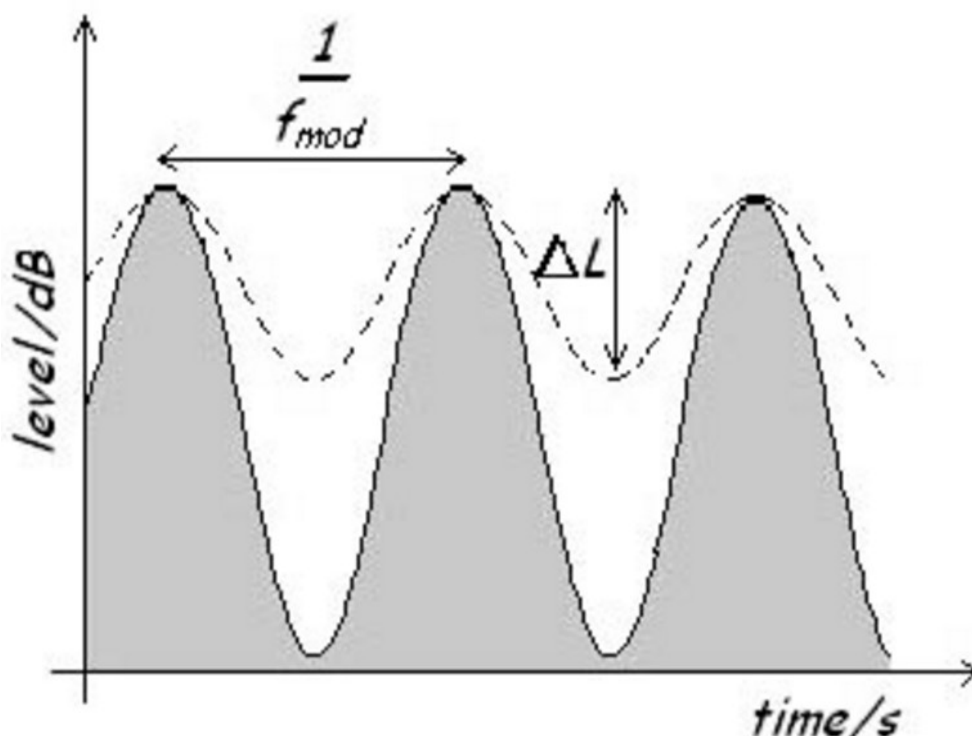
Hrubost je veličina, která zohledňuje vjem z periodických změn obálky zvuku. Veličina, resp. základní jednotka hrubosti, je definována pro amplitudovou modulaci a projevuje se v rozmezí 15-300 Hz modulační frekvence. Nad 300 Hz se již hrubost neprojevuje, neboť sluchový orgán již nestíhá zaznamenávat změny obálky zvuku. Pro frekvence pod 15 Hz se neprojevuje hrubost, ale tzv. fluktuační síla [16].

4.3.1 JEDNOTKA

Jednotka se nazývá asper a je definována pro tón o frekvenci 1 kHz s hladinou akustického tlaku 60 dB s hloubkou modulace 100% a modulační frekvencí 70 Hz [16].

4.3.2 SUBJEKTIVNÍ DOBA TRVÁNÍ

Pro výpočet je důležitá tzv. subjektivní doba trvání nebo subjektivní trvání (orig. Subjective Duration). Projevuje se pro zvuky kratší než 300 ms. Takové zvuky jsou lidským sluchem zaznamenány jako delší, než ve skutečnosti jsou. Pro příklad je uveden např. zvuk s délkou 10 ms může být subjektivně vnímán jako 20 ms dlouhý zvuk a tento fakt je důležitý pro vnímání dočasně se měnících zvuků, tedy změny obálky zvuku [16].



Obr 4.6: Znárodnění vnímané maskované hloubky [16]

Pro lepší přiblížení toho, jak tento fakt souvisí s hrubostí, je na obrázku 4.6 znázorněn průběh amplitudově modulovaného šumu (nepřerušená linie). Nicméně právě kvůli

subjektivní době vnímání nebude propad ve vnímání tak rapidní jako modulační hloubka, ale jen jako nepřerušovaná linie označená jako ΔL znázorňující vnímanou hloubku.

Hrubost je tedy funkcí modulační frekvence vnímané maskované hloubky ΔL (orig. Perceived masking depth). Základní vzorec pro výpočet by tedy měl mít následující formu:

$$R = cal \int_0^{24} f_{mod} \Delta L dz \quad (4.6)$$

Výpočet je tedy opět podobný jako výpočet pro hlasitost a ostrost, kde je signál zpracován v jednotlivých barkových pásmech a celková hrubost je následně spočítána jako integrál přes všechna tato pásma. Nicméně výpočet a stanovení modulační frekvence a především ΔL je velice problematické. Proto nebyla veličina ještě standardizována a z těchto důvodů také existuje více metod pro výpočet hrubosti [16].

Jedna z nejčastěji popisovaných metod je tzv. Auresova metoda, jejíž výpočet je popsán v následující kapitole. V samotném skriptu je pak využita Danielova metoda pro výpočet hrubosti, převzatá z ITA_TOOLBOX. Vybral jsem tuto metodu, jelikož je velice problematické získat konkrétní informace pro zhotovení modelu. Není velkým problémem najít obecný popis modelu, nicméně konkrétní návrh filtrů a parametry různých potřebných funkcí, viz další kapitola, jsou velký problém.

4.3.3 VÝPOČET

Zabýval jsem se tedy nejprve Auresovou metodou výpočtu hrubosti. Kvůli problémům s výpočtem f_{mod} a ΔL , se v Auresově metodě tyto parametry nepočítají přímo, ale počítají se tzv. zobecněné modulační hloubky m_i , které jsou ekvivalentní pro součin f_{mod} a ΔL . Hrubost tedy odpovídá: $R \approx m_i^\alpha$, kde koeficient α se pohybuje mezi hodnotami 1.2 až 2 [17].

Nejprve jsou provedeny základní vstupní úpravy, tzn. převedení signálu do frekvenční oblasti a poté případně úpravy, jako je filtrování signálu vzhledem k vlastnostem vnějšího a středního ucha, výpočet hladiny slyšitelnosti apod.

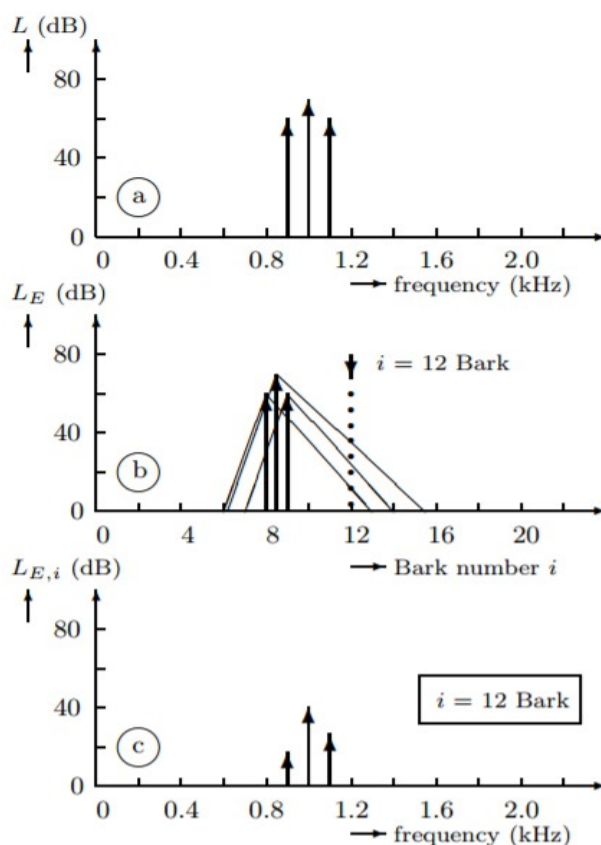
Po těchto vstupních úpravách je signál nejprve upraven z frekvenční stupnice na barkovou stupnici. V tomto modelu se počítá s rozdělením do 24 barkových pásem, a signál je analyzován pro každé pásmo zvlášť. Poté následuje extrakce obálky signálu. Nejprve je každé pásmo filtrováno dvěma zešikmeními, celý proces je znázorněn na obrázku 4.7 [17].

Parametry jednotlivých filtrů pro každé pásmo se liší, jejich parametry jsou udány pomocí následujících vztahů pro vzestupnou složku 27 dB/Bark a sestupná složka je pak závislá na frekvenci a hladině SPL takto:

$$\zeta_2(f, L) = -24 - \frac{230}{f} + 0.2L. \quad (4.7)$$

Toto filtrování se provádí kvůli odstranění vlivů náhodných zvuků, jako je šum, na výpočet hrubosti [17].

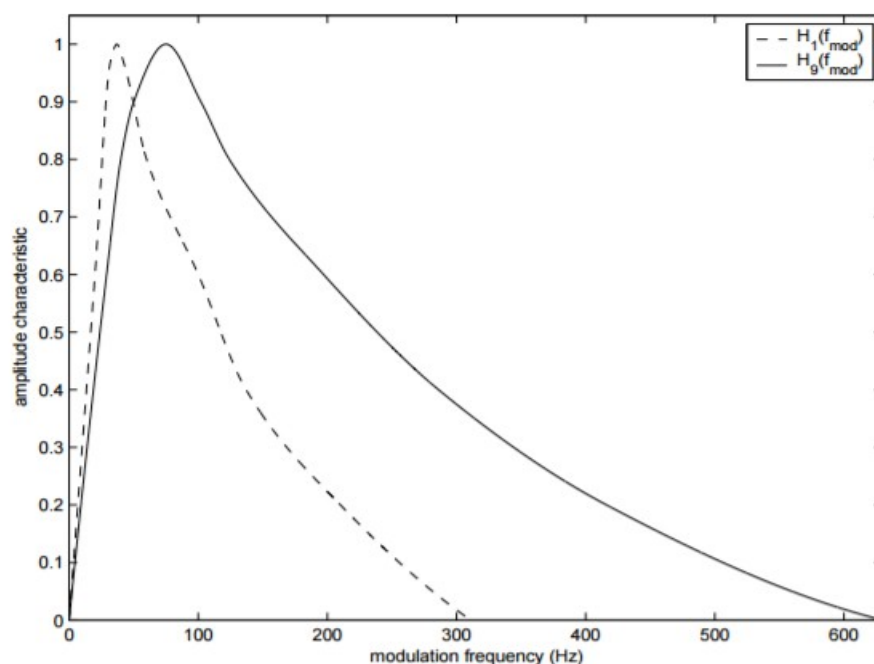
Poté jsou takto filtrované signály převedeny zpět do časové oblasti, kde je vypočítána absolutní hodnota těchto složek $|e_i(t)|$. Z těchto signálů je nejprve vypočítána střední



Obr 4.7: Znárodnění filtrování trojúhelníkovými filtry [17]

hodnota, která bude potřeba při počítání modulačních hloubek. Absolutní hodnota takto filtrovaných signálů je poté opět filtrována, kvůli určení příspěvku každé frekvenční složky na hrubost. Toho je docíleno pomocí tzv. modulaci transformující funkce $H_i(f_{\text{mod}})$ (orig. Modulation transfer function), které zohledňují modulační senzitivitu pro dané pásmo [17]. Právě v těchto funkcích se jednotlivé metody často liší, a informace k jejich namodelování

často nejsou konkrétní. Volba těchto filtrů má přitom kritický dopad na hodnotu hrubosti. Nejčastější udávané filtry jsou zobrazeny na obrázku 4.8.



Obr 4.8: Modulační transformující funkce [17]

První filtr H_1 reprezentuje transformační filtr pro první barkové pásmo. Druhý filtr H_9 reprezentuje transformační filtr pro deváté a všechna vyšší barková pásma. Filtry pro druhé až osmé barkové pásmo jsou vytvořeny lineární interpolací mezi H_1 a H_9 . Pomocí těchto filtrů se tedy spočítá filtrovaný časový průběh obálky signálu:

$$sBP_i(t) = F^{-1}\{F|ei(t)| \cdot Hi(fmod)\} \quad (4.8)$$

Modulační hloubky jsou poté vypočítány dle vzorce:

$$m_i = \frac{r(sBP_i)}{s_0} \quad (4.9)$$

kde čitatel je amplitudový rozsah vyfiltrované obálky signálu a jmenovatel je střední hodnota signálu. Modulační hloubky jsou poté váženy funkcí g_i , která zohledňuje vliv centrálních frekvencí, resp. jednotlivých barkových pásem tak, aby největší hrubost byla dosahována pro frekvence kolem 1 kHz [17].

Specifické hlasitosti v jednotlivých pásmech jsou pak dány vztahem:

$$r_i = cal g_i m_i^2 \quad (4.10)$$

kde g_i je váhová funkce a *cal* zohledňující fakt, že pro amplitudově modulovaný sinusový tón o parametrech 1 kHz, modulační frekvenci 70 Hz, hloubce modulace 1 a SPL 60 dB měl právě hodnotu hrubosti 1 asper [17].

K vypočtení celkové hrubosti chybí poslední úprava. Ukázalo se, že širokopásmové stimuly i přesto, že v jednotlivých frekvenčních kanálech (v jednotlivých kritických pásmech, na které je signál rozdělen při vyhodnocování) vykazují značnou modulaci jejich časových obálek, nejsou vnímány jako obzvlášť hrubé. To je způsobeno nedostatečnou korelací obálek mezi jednotlivými zvukovými kanály. U amplitudově a frekvenčně modulovaných tónů kolísají obálky jednotlivých frekvenčních složek synchronizovaně, což se značně projevuje ve výsledné hrubosti [17].

Aby bylo dosaženo správných nízkých hodnot hrubosti pro signály typu šum, je nutné výpočet doplnit o vzájemnou korelaci $sBP_i(t)$ se sousedními kanály. Výpočet křížové korelace se uvádí v její obvyklé formě dle vzorce:

$$X(x, y) = \frac{\sum xy - \frac{1}{N}(\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[\sum x^2 - \frac{1}{N}(\sum x)^2][\sum y^2 - \frac{1}{N}(\sum y)^2]}} \quad (4.11)$$

kde $X(x,y)$ je křížová korelace mezi signály x a y , a N je počet vzorků signálu x .

Celková hodnota hrubosti dle této metody je pak určena vzorcem:

$$R = cal \sum_{i=1}^{N_{ch}} r_i \frac{(x_{x-1} + x_{x+1})}{2} \quad (4.12)$$

kde N_{ch} je počet kanálů, resp. pásem, do kterých je signál rozdělen (zde uvažováno přesně 24 pásem, každé 1 Bark široké), r_i jsou specifické hlasitosti jednotlivých pásem a X_{i-1} a X_{i+1} jsou koeficienty křížové korelace mezi sousedními kanály [17].

4.3.4 MODIFIKACE V DANIELOVĚ MODELU

K výpočtu hrubosti je využit model dle Daniela a Webera, přejatý z ITA_TOOLBOOX, který využívá Auresova modelu nicméně s několika modifikacemi. Prvním rozdílem je rozdělení signálu na 47 pásem širokých 0.5 Barku. Zlepšilo se tedy frekvenční rozlišení, nicméně H filtry musely být pro tyto pásma přepočítány [17].

Další modifikací je obecný výpočet modulačních hloubek m_i pro libovolný vstupní signál. Vztah 4.9 se může lišit podle typu stimulu, pro který jsou modulační hloubky počítány. DC hodnota signálu je počítána jako průměr absolutní hodnoty dle vztahu:

$$s_{0i} = \text{mean}(|ei(t)|) \quad (4.13)$$

Výpočet amplitudového rozsahu ze vzorce 4.9 se také liší, je počítána z kvadratického průměru podle vzorce:

$$r(sBP_i) = \sqrt{\text{mean}(sBP_i(t) - s_{0i})^2} \quad (4.14)$$

Hodnota sBP_i je počítána stejně jako ve vzorci 4.8, nicméně s rozdílnými filtry $H_i(f_{\text{mod}})$.

Zobecněné modulační hloubky jsou poté počítány dle následujícího vztahu:

$$m_i = \frac{sBP_i}{s_{0i}} \quad (4.15)$$

Výsledek je nicméně omezen pro hodnoty modulačních hloubek větších než 1 na hodnotu právě 1. Tato úprava je zavedena pro omezení extrémně vysokých hodnot hrubosti způsobených pulsy v časové obálce stimulu [17]. Popis samotného skriptu je uveden na stránce 57.

4.4 FLUKTUAČNÍ SÍLA

Fluktuační síla zohledňuje subjektivní vnímání pomalejší změny obálky zvuku. Také je definována pro amplitudovou modulaci jako hrubost, nicméně pro modulační frekvence 20 Hz a nižší. Nad touto modulační frekvencí zcela převládne hrubost. Mezi těmito subjektivními vjemy existuje určitá frekvenční oblast (mezi 15 a 20 Hz), kdy jeden vjem přechází v druhý a je velmi obtížné stanovit, respektive odlišit jeden od druhého.[16]

4.4.1 JEDNOTKA

Jednotka pro měření fluktuační síly je vacil. Jeden vacil je produkován tónem o frekvenci 1 kHz s hladinou akustického tlaku 60 dB, který je modulovaný frekvencí 4 Hz s hloubkou modulace 100% [16].

4.4.2 VÝPOČET

Vzorec pro výpočet uvedený na [16].

$$F = \frac{0.008 \int_0^{24} \Delta L dz}{\frac{f_{mod}}{4\text{Hz}} + \frac{4\text{Hz}}{f_{mod}}} \quad (4.16)$$

Pro výpočet fluktuační síly se mi bohužel nepovedlo sehnat dostatečné množství informací. Na [16] chybí podrobnější popis výpočtu ΔL a f_{mod} . Jiný model pro výpočet fluktuační síly a také hrubosti je popisován v [18], kde je uveden vzorec pro výpočet totožný se vzorcem 4.16, ovšem výpočet ΔL je dán rovnicí:

$$\Delta L = 4 \log\left(\frac{N_{S_{max}}}{N_{S_{min}}}\right) \quad (4.17)$$

Kde N_s jsou specifické hlasitosti. Přirozeně jsem proto chtěl tento výpočet využít, vzhledem k faktu, že tyto hodnoty počítám již v předchozích výpočtech. Nicméně opět chybí bližší informace pro stanovení f_{mod} . Ze stejných důvodů jsem nevyužil ani výpočet hrubosti uvedený v tomto článku.

Nejslibněji se jeví informace obsažené v [19]. Zde popisovaný model je prakticky jen upravený model hrubosti dle Daniela, který je popisován v kapitolách 4.3.3 a 4.3.4. Bohužel chybí doplňující informace především k úpravě $H_{f_{mod}}$ funkcí a váhové funkce. Také jsou pravděpodobně rozdílné kalibrační koeficienty (především koeficient c_{al} ve vzorci 4.16 číslo 0.008). Dodávám, že jsem se pokoušel funkce a koeficienty zvolit a

zkalibrovat sám, bohužel bez většího úspěchu. Z těchto důvodů jsem tedy bohužel nebyl schopen zhotovit skript v prostředí matlab pro výpočet fluktuační síly.

4.5 TONALITA

Poslední z psychoakustických veličin je tonalita. Zohledňuje, zda se jedná o širokopásmový nebo úzkopásmový signál. Pro určitou představu se nejspíše hodí siréna. Sirény mají široké spektrum frekvencí, protože se hodí, aby samozřejmě obsahovaly frekvence, kde je lidský sluch nejcitlivější, tedy 3-4 kHz. Nicméně v tomto rozsahu má lidský sluch také největší problémy s lokalizací zdroje zvuku. Proto obsahují sirény i další frekvence, abych mohli i zachytit směr, odkud se zvuk šíří, což je důležité např. v případně sanitních vozů [20].

4.5.1 VÝPOČET

Lze ji spočítat pomocí poměru geometrického a aritmetického průměru spektra. Jde o měřítko plochosti spektra:

$$SFM = \frac{\sqrt[N]{\prod_{k=0}^{N-1} P(k)}}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P(k)} \quad (4.18)$$

Tento poměr se poté logaritmuje a přepočítá na tonalitu dle vzorců:

$$SFM_{db} = 10 \log_{10}(SFM)$$

$$T = \min\left(\frac{SFM_{db}}{-60}, 1\right) \quad (4.19)$$

Pokud bude zvuk úzkopásmový, bude se tonalita rovnat nebo blížit jedné. Pro širokopásmové stimuly je pak tonalita nižší v přímé úměře k počtu obsažených frekvencí. Výsledek je bezrozměrná jednotka [10].

5 KOMPLEXNÍ VELIČINY

Komplexní veličiny se používají pro sumarizaci předchozích veličin do jedné veličiny, která určitým způsobem charakterizuje komplexní škodlivost nebo „otravnost“ daného zvuku. Také je poté méně obtížné jednotlivé záznamy porovnávat na základě jedné veličiny, než na základě více veličin. Z tohoto důvodu bylo zavedeno několik komplexních veličin, opět nestandardizovaných, které byly již v minulosti použity k posouzení některých typů zvuků. Z logiky věci jsem vybral ty, které využívají mnou počítané veličiny.

5.1.1 SENZORICKÁ PŘÍVĚTIVOST

První veličinou, kterou jsem se zabýval je tzv. sensorická přívětivost (orig. Sensory Pleasantness), kterou lze vypočítat dle vzorce:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-0.7 \frac{R}{R_0}} e^{-1.08 \frac{S}{S_0}} (1.24 - e^{-2.43 \frac{T}{T_0}}) e^{-(0.023 \frac{N}{N_0})^2} \quad (5.1)$$

kde R odpovídá hrubosti, S ostrosti, T tonalitě a N hlasitosti [10]. Výsledkem je pak právě sensorická přívětivost označená písmenem P. Indexy 0 označují parametry pro zvuk, se kterým je daný záznam srovnáván. Jde tedy o poměrnou veličinu, nicméně ji lze využít i jako veličinu absolutní (tedy bez srovnání a hodnoty s indexem 0 nahradí číslo 1). Popis samotného skriptu je pak na straně 62.

5.1.2 OSTATNÍ KOMPLEXNÍ VELIČINY

Existuje samozřejmě více komplexních veličin. Dalšími veličinami, které jsem dohledal byly: Sound quality index počítaný dle vzorce:

$$SQ = -10 + 17SL + 10SS + 10SF \quad (5.2)$$

Kde SL je hlasitost, SS je ostrost a SF je flukтуаční síla.

A tzv. Annoyance index počítaný dle vzorce:

$$Annoyance = 0.655L - 2.618S + 0.047R + 2.708F \quad (5.3)$$

Kde L je hlasitost, S ostrost, R Hrubost a F je flukтуаční síla.

Uvedené veličiny nejsou počítány z důvodů uvedených v kapitole 4.4.2. Popis jsem nicméně ponechal z informativních důvodů.

6 POPIS SKRIPTŮ A ALGORITMIZACE JEDNOTLIVÝCH VELIČIN

V této části popisují jednotlivé skripty pro výpočet daných veličin, pomocné skripty, apod. Záznam zvuku musí být ve formátu .wav, mono a vzorkovací frekvenci 44,1kHz nebo 48kHz. Pro stimuly, které výrazně mění svoji amplitudu v průběhu času, doporučuji využít segmentování, tedy rozdělení stimulu do kratších časových úseků a pro každý jednotlivý úsek počítat veličiny zvlášť. Podrobnosti jsou v kapitolách 6.1.1 a 6.1.7

6.1 POMOCNÉ SKRIPTY

Pro výpočet psychoakustických veličin jsou třeba některé výpočty a úpravy záznamu zvuku. Jedná se především o výpočet spektrální hustoty výkonu, výpočet třetinooktávových filtrů a následná filtrace. Jsou zde ale uvedeny další pomocné skripty, např. pro načtení záznamu zvuku. V této části se zabývám právě popisem těchto pomocných výpočtů. Pomocné skripty a výpočet hlasitosti jsou převzaty z [14]. Provedl jsem nějaké spíše minoritní úpravy, nicméně hlasitost je standardizována, proto jsem využil již existující skript pro výpočet hlasitostí a některých pomocných výpočtů. Výpočet hrubosti je převzat z [21].

6.1.1 CALL_SOUND

Jedná se o jakýsi main, odkud jsou volány všechny ostatní m-file, výpočet všech psychoakustických veličin, ale i ostatních výpočtů. Nejprve je načtený záznam zpracován pomocí vstupních skriptů popsáných v kapitole 6.1.2. Poté je rozhodnuto, zda bude zpracován celý záznam najednou (tedy výpočet všech psychoakustických veličin pro celou délku záznamu najednou), anebo zda bude zvuk segmentován dle stanovených časových úseků (je přednastavena 1s). Nejprve je popsán postup výpočtu pro celý záznam, následující soubory tedy popisují obsah skriptu psychv_cek.m. Skript pro segmentovaný záznam je popsán v samostatné podkapitole 6.1.7. Funkce psychv_cek by tedy měla být využívána především k vykreslení jednotlivých segmentů, pro záznamy s délkou přibližně 1s, a pro libovolně dlouhé tóny. Na ostatní druhy záznamů je nutné použít funkci psychv_segm.

6.1.2 VSTUPNÍ SKRIPTY

Zde se volají skripty LoadSound a Calibrate. LoadSound nahraje zvuk ze záznamu a převede do potřebného tvaru pro další zpracování. Funkce wavread() z původní verze byla nahrazena funkcí audioread(), která původní funkci v budoucích verzích matlabu nahradí.

Calibrate slouží ke zkalibrování dle naměřené efektivní hodnoty akustického výkonu dle vztahu 2.8 Srovnáním s vypočítanou hodnotou je poté vypočítán korekční koeficient dle vztahu:

$$c = 10^{\frac{(SPL_{meas} - SPL_{mat})}{20}} \quad (6.1)$$

kde SPL_{meas} je naměřená hodnota a SPL_{mat} je hodnota vypočítaná pomocí matlabu. Tímto koeficientem jsou následně násobeny jednotlivé vzorky načteného signálu. Skript calibrate lze také použít jako kontrolu měření pro kalibrační zvuky popisované v kapitole Kontrola Modelů.

6.1.3 POWSPEC

Slouží k výpočtu spektrální výkonové hustoty, která je důležitá pro popis a další zpracování signálu. Je využita Welchova metoda popisovaná na stránce 26.

Před samotným výpočtem je třeba určit počet vzorků FFT a s tím související frekvenční rozlišení. Jedna ze vstupních proměnných je df , která udává minimální požadované rozlišení, které je přednastaveno na hodnotu 2 Hz. Uvnitř skriptu pak probíhá výpočet za účelem zvýšení rozlišení tak, aby byl počet vzorků roven mocnině dvou.

Pro výpočet výkonového spektra je pak využita funkce psd. Jedná se o implementaci welchovy metody s následujícími syntaxí:

psd (data, počet bodů pro FFT, vzorkovací frekvence, časové okno, překrytí oken)

Počet vzorků je označen konstantou NFFT, časové okno je přednastaveno Hanningovo. Překrytí oken (NOVERLAP) je nastaveno na 0.

Před dalším zpracováním je třeba ještě data upravit, protože funkce PSD neváží data s ohledem na vzorkovací frekvenci (výsledná hustota není správně normalizována). Na konci skriptu je tedy korekční výpočet, aby bylo výkonové spektrum korektní.

Kvůli varování o budoucím nahrazení funkce PSD, jsem zvažoval její nahrazení funkcí pwelch. Nicméně spektrální výkonová hustota získaná díky této funkci se mi nezdála korektní z několika důvodů. Především šlo o nekorektní hodnoty hlasitosti a mírně odlišný

tvár křivky spektrální výkonové hustoty. Zjistil jsem, že pro zobrazení korektního spektra je třeba aplikovat korekční faktor, protože funkce `pwelch` aplikuje v dokumentaci blíže nedefinovaný korekční faktor, který způsobuje nekorektní výpočet spektrální výkonové hustoty. Na [22] jsou diskutovány některé možné korekční faktory pro správný výpočet. Nicméně, jak je zmíněno na [22], pokud je značný rozptyl spektrální hustoty, dochází k větším chybám. Při svých měřeních jsem nezjistil odchylku při výpočtu hlasitosti více než 4%, nicméně s ohledem na fakt, že není nezbytně nutné funkci PSD nahrazovat, jsem ji ponechal ve skriptu s odkazem na [22] pro případnou korekci.

6.1.4 CONVERT2DB

Slouží k převedení signálu na decibely. Výpočet je pouze jednoduchý logaritmus. Jako referenční výkon je využito obvyklých $20e^{-6}$ Wattu.

6.1.5 GENERATEFILTERS

Slouží k výpočtu jednotlivých třetinooktávových filtrů, využívá k tomu další `m.file` `Oct3dsgn`. Zde jsou uvedeny jednotlivé centrální frekvence, ze kterých jsou pak filtry počítány. Frekvenční odezvy filtrů jsou pak řazeny do proměnné `H` a odeslány k dalšímu zpracování.

Filtry pro prvních deset třetinooktávových pásem jsou navíc převzorkovány tak, že je vzorkovací frekvence vydělena pro první filtr šestnácti, pro druhý, třetí a čtvrtý filtr osmi apod. Převzorkování je nutné z důvodů stability jednotlivých filtrů tak, aby jejich póly ležely uvnitř jednotkové kružnice. Tato úprava je uzpůsobena především pro vzorkovací frekvence 44,1kHz. Nicméně měla by fungovat i pro jiné, nicméně je doporučeno, aby mezi centrální frekvencí jednotlivých pásem a vzorkovací frekvencí platil vztah:

$$\frac{F_s}{200} < F_c < \frac{F_s}{5} \quad (6.2)$$

Ostatní filtry jsou pak vytvořeny v rámci jednoho FOR cyklu. Takto je vypočítáno 28 třetinooktávových filtrů pro centrální frekvence 25Hz až 12.5kHz. Je tedy zpracováváno kmitočtové pásmo v rozsahu 22 Hz až 14,14 kHz jak je znázorněno v tabulce 1. Jak je ale vidět v 2. tabulce, horní mez kritických pásem je 15,5 kHz. Model tedy počítá hlasitost s určitou chybou, kterou jsem se pokoušel napravit dopočítáním dalšího, tedy 29. třetinooktávového filtru. Návrh filtru jako takového není problém, jeho výpočet je v původní verzi skriptu připraven, nicméně nelze jej využít k výpočtu hlasitosti kvůli čteným

koeficientům, které je k výpočtu třeba a jejichž hodnoty nejsou uvedeny pro celý kmitočtový rozsah. Více podrobností je kapitole 6.2.1.

6.1.6 OCT3DSGN

Filtry jsou navrhovány dle standardu ANSI S1.1-1986. Ve standardu je popsán výpočet koeficientů pro oktávové a třetinooktávové filtry s Butterworthovou aproximací. Z důvodů lepšího rozlišení jsou voleny třetinooktávové filtry.

Při návrhu se nejprve určí krajní frekvence daného filtru dle vztahu 2.10

Následuje výpočet koeficientů souvisejících se šířkou pásma. První je koeficient Q_r , tedy referenční šířka pásma, vypočítaná ze vztahu:

$$Q_r = \frac{F_c}{f_2 - f_1} \quad (6.3)$$

kde frekvence f_1 a f_2 jsou vypočítány dle výše zmíněných vztahů. Nicméně kvůli zlepšení vlastnosti filtru (co nejvyšší plochost) je nutné, aby skutečná šířka pásma byla menší než Q_r . To je zohledněno koeficientem návrhové šířky pásma Q_d který se počítá dle vztahu:

$$Q_d = \left[\frac{\left(\frac{\pi}{2N}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2N}\right)} \right] Q_r \quad (6.4)$$

Z těchto hodnot je pak dopočítaná korekční hodnota alpha:

$$alpha = \frac{(1 + \sqrt{(1 + 4 * Q_d^2)})}{(2 * Q_d)}; \quad (6.5)$$

Dolní cutoff frekvence je vypočítána dle vztahu:

$$W1 = \frac{F_c}{\frac{F_s}{2} * alpha} \quad (6.6)$$

A horní cutoff frekvence pásmové propusti je vypočítána dle vztahu:

$$W2 = \frac{F_c * alpha}{\frac{F_s}{2}} \quad (6.7)$$

6.1.7 PSYCHV_SEGM

Nejprve je záznam rozdělen do zadaných časových úseků pomocí skriptu `seg_zaznm`. Kvůli přizpůsobení váhovacího okna pro analýzu spektrální výkonové hustoty je zaveden koeficient úpravy okna, který zajistí, že okno není delší než zpracovávaný záznam. V

případě, že by byly zadané segmenty delší než zpracováváný záznam, spočítají se psychoakustické veličiny pro celý záznam najednou.

Záznam je pak v rámci while cyklu rozdělen na segmenty, jejichž počet odpovídá délce záznamu v sekundách. Pole takto získaných segmentů je pak předáno pro další zpracování spolu s jejich počtem a koeficientem pro úpravu okna.

Pro každý segment jsou pak v rámci while cyklu spočítány psychoakustické veličiny pomocí skriptu psychv_celek, ovšem bez vykreslování grafů. Výsledné veličiny jsou pak uloženy ve vektorech, ze kterých lze posoudit vývoj psychoakustických veličin v čase. Grafy se nevykreslují z důvodů vysokého počtu, nicméně ve vektoru y_s jsou uloženy všechny segmenty, pro vykreslení tedy stačí zavolat funkci psychv_celek a pro příslušný úsek signálu budou vykresleny grafy.

6.1.8 GRAFY A VÝSTUP NA KONZOLU

Ve skriptu psychv_celek jsou na konci uvedeny následující grafy:

Výkonové spektrum v grafu číslo 1

Křivka hlasitosti v grafu číslo 2

Frekvenční odezvy třetinooktávových filtrů a rozložení výkonu v jednotlivých třetinooktávových pásmech v grafu číslo 3

Graf signálu v časové oblasti v grafu číslo 4

Následuje také výpis hodnot jednotlivých psychoakustických veličin na konzolu. Tyto grafy a výpis na konzolu jsou uvedeny jen pro psychv_celek. Pro segmentované záznamy nejsou uvedeny z důvodů vysokého počtu segmentů a tedy i vysokého počtu grafů a výstupů na konzolu.

6.2 CALCULATE LOUDNESS

Základní popis je uveden v kapitole 4.1.6. Zde jsou postupně popsány jednotlivé funkční bloky M-File DIN-45631 s doplněním některých obecných informací důležitých pro výpočet.

Nejprve jsou inicializovány pracovní proměnné, jedná se hlavně o různé korekční parametry, např. korekce pro nízké frekvence, korekce rozdílu mezi kritickými pásmy a třetinooktávovými pásmy apod.

První blokem je korekce hladin třetinooktávových pásem dle křivek stejné hlasitosti a následný přepočet SPL pro nižší kritická pásma (pro frekvence do 315 Hz.)

Do této frekvence se tyto hladiny přepočítávají s ohledem na fakt, že první kritické pásmo odpovídá svým frekvenčním pásmem šesti třetinooktávovým pásmům, druhé kritické pásmo odpovídá 7.-9. třetinooktávovému pásmu a třetí kritické pásmo odpovídá svým rozsahem 10.-11. kritickému pásmu.

Korekce vychází ze vzorce:

$$LCB = 10 \log_{10}(GI) \quad (6.8)$$

kde GI je určeno dle vzorce:

$$GI = \sum_{j=k}^{k+l-1} 10^{0.1(p_{band}^j + DLL_j)} \quad (6.9)$$

Proměnná k ve vzorci 6.9 je index pro první kritické pásmo, od kterého se počítá. Proměnná l je pak počet třetinooktávových pásem, obsažených v daném kritickém pásmu. Takže např. pokud budeme počítat LCB pro 2 kritické pásmo, bude proměnná $k=7$ a $l=3$. Proměnná p_{band} ve skriptu odpovídá vstupní hodnotě LT , tedy hladiny akustického tlaku v daných třetinooktávových pásmech. DLL je korekce počítaného třetinooktávového pásma na nízkých frekvencích v souladu s křivkami stejné hlasitosti. V samotném skriptu je nejprve v rámci funkce `for` a `while` rozhodnuto, mezi kterými hladinami se daný akustický tlak pohybuje, a následně je vypočítána výše popsaná korekce, kdy se nejprve vypočítá exponent ze vzorce 6.9. Poté je vypočítána hodnota TI (intenzita akustické tlaku), cykly se opakují, dokud nejsou stanoveny všechny hodnoty. Z hodnoty TI jsou poté určeny jednotlivé GI hodnoty, ze kterých jsou pomocí vzorce 6.8 vypočítány hodnoty LCB .

Následuje blok výpočet hlavní hlasitosti.

Při výpočtu SPL skutečných hladin v jednotlivých kritických pásmech je třeba proměnná L_E a vektor konstant L_{TQ} , jak je naznačeno v odstavci se základním popisem pro výpočet hlasitosti na straně 34.

Vektor L_{TQ} je zadán v inicializační části. Proměnná L_E se určuje dle základního vzorce:

$$L_E = LCB - a_0 - DCB \quad (6.10)$$

kde LCB odpovídá efektivní hodnotě hladiny akustického tlaku v prvních třech kritických pásmech s příslušnou korekcí. A_0 je vektor konstant zohledňující přenos mezi okolím a lidských sluchovým orgánem. DCB je pak vektor konstant zohledňující rozdíl mezi kritickými pásmy a třetinooktávovými pásmy. V samostatném skriptu je nejprve od LCB odečten a_0 a pak DCB . Před samotným výpočtem hlasitosti je ještě započítán vektor konstant DDF , pokud se jedná o difúzní pole.

Samotný výpočet hladin pak vychází ze vzorce 4.4. Pokud excitační hladina L_E je vyšší než práh slyšitelnosti L_{TQ} , dojde k výpočtu hlasitosti. Výpočet je rozdělen do dvou mezivýsledků $MP1$ a $MP2$, které jsou poté násobeny a jejich výsledek NM , tedy hladina akustického tlaku v jednotlivých aproximovaných kritických pásmech s ohledem na vlastnosti lidského sluchu. Pro první kritické pásmo je ještě třeba korekce vzhledem k absolutní hodnotě prahu slyšitelnosti [13].

6.2.1 KONSTRUKCE KŘIVKY HLASITOSTI

Před popisem konstrukce křivky hlasitosti (příklad křivky hlasitosti je uveden na obrázku 4.3) doplním některé informace k frekvenčnímu rozsahu modelu.

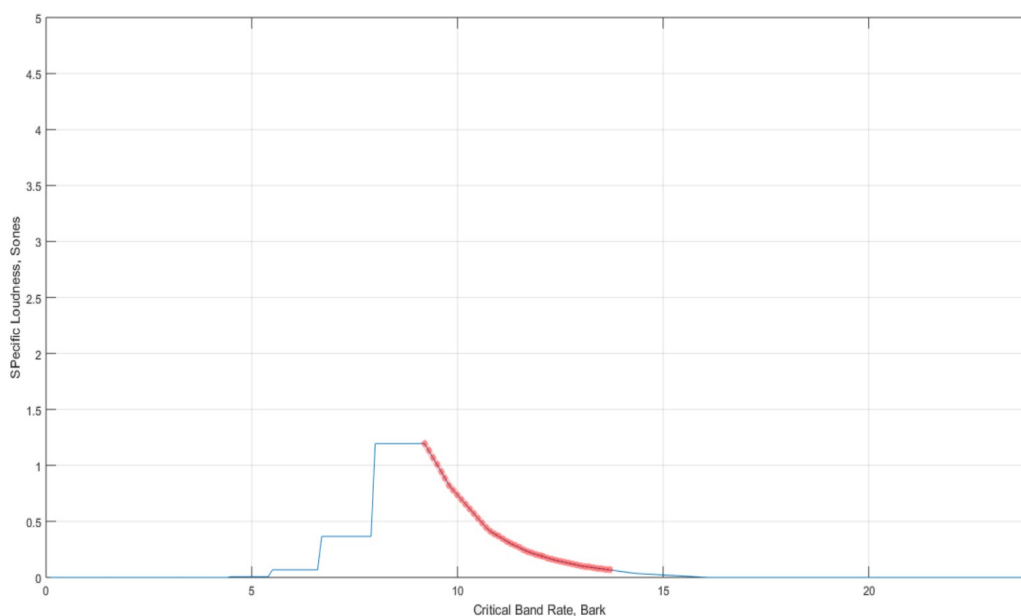
V kapitole 6.1.5 je uvedeno, že frekvenční rozsah je zkrácen o 1.36 kHz kvůli chybějícím koeficientům. Jedná se o všechny koeficienty využitě pro výpočet NM vedené v kapitole 6.2. Konkrétně jde o parametry L_{TQ} , A_0 , DDF a DCB . Tyto koeficienty se mi bohužel nepodařilo dohledat, a výpočet tedy zůstává omezen. Nicméně v rámci tohoto frekvenčního pásma je stále počítána maskovací křivka. Postupuje se tedy tak, že v tomto pásmu není předpokládána žádná frekvenční složka, nicméně maskovací křivka je i přesto vypočítána, jakoby byla přítomna zcela zamaskovaná frekvenční složka.

Pro konstrukci křivky se využívají hodnoty NM získaných z předchozích výpočtů. Pro každý záznam má vektor hladin akustického tlaku v jednotlivých aproximovaných kritických pásmech 21 hodnot, nicméně 21. hodnota je přednastavena na 0 vzhledem k faktům zmiňovaných v předchozím odstavci.

Pro lepší pochopení následujícího popisu silně doporučuji ke čtení následujících odstavců otevřít skript DIN 45631. Následující popis se vztahuje k řádkům 191 a níže.

Výpočet probíhá v rámci for cyklu, s pomocným while cyklem pro nastavení hodnot proměnných po proběhnutí dílčích výpočtů. Pro samotný výpočet jsou pak důležité dva vektory konstant a jedno pole konstant definovaných v inicializační části. První je *ZUP*, což je vektor konstant horních limitů jednotlivých aproximovaných kritických pásem. Kvůli faktu, že bylo pro filtrování využito třetinooktávových filtrů a je pomocí nich vypočítáno pouze 21, resp. 20 hodnot *NM*, je třeba upravit rozsahy kritických pásem tak, aby odpovídaly frekvenčním rozsahům *NM*. To je zajištěno právě vektorem konstant *ZUP*. V souvislosti s odstavcem o výpočetní chybě této metody doplňuji, že 24. aproximované barkové pásmo má rozsah 0.4 Barku.

Vektor konstant *RNS* a pole konstant *USL* pak slouží přímo ke konstrukci křivky hlasitosti, konkrétně její pravé části, jak je naznačeno na obrázku 6.1 zvýrazněním.



Obr 6.1: Křivka hlasitosti 1kHz, 60dB SPL

Vektor *RNS* určuje rozsah specifických hlasitostí a určuje tedy celkovou strmost křivky a rozsah maskovacího jevu. Pole hodnot *USL* pak určuje dílčí části této křivky, v souladu s vektorem *RNS*. Také zohledňuje, v jakém kritickém pásmu je daná část křivky počítána.

V rámci funkce *while*, která určuje, zda již bylo zpracováno celé počítané kritické pásmo, je nejprve pomocí funkce *if* rozhodnuto, zda je zvuk maskován předcházejícím pásmem.

Pokud není maskováno, je v rámci celého právě počítaného kritického pásma hodnota hlasitosti rovna hodnotě NM . Poté je dopočítán příspěvek daného pásma k celkové hlasitosti dle vztahu:

$$N_p = N_2 * (Z_2 - Z_1) \quad (6.11)$$

Kde N je celková hlasitost, N_2 je hodnota hlasitosti v rámci momentálního kritického pásma a hodnoty Z_2 a Z_1 jsou horní a spodní hranice daného kritického pásma. Tyto hodnoty na obrázku 6.1 představují vodorovné úsečky ve směru osy x . Jsou také dopočítány specifické hlasitosti v rámci jednoduchého cyklu while. Poté následuje krok do dalšího kritického pásma, resp. segmentu, protože dané kritické pásmo nemusí být zpracováváno celé najednou. Je zjištěna hodnota RNS , tedy rozsah specifické hlasitosti v rámci funkce if . Výstupem je koeficient J , který je pak využit při určování hodnoty USL . Před dalším výpočtem jsou také nastaveny nová hodnota Z_2 a hodnota N_1 , která určuje hodnoty hlasitosti předcházejícího kritického pásma nebo jeho segmentu.

Pokud je hodnota NM daného kritického pásma menší než hlasitost předcházejícího kritického pásma, je nejprve zjišťováno, zda je maskováno celé jedno kritické pásmo nebo jeho část. To je určeno koeficientem DZ určující rozsah maskování a také jeho strmost. Toho je docíleno právě díky poli USL . DZ je počítáno dle vztahu:

$$DZ = \frac{N_1 - N_2}{USL(J, IG)} \quad (6.12)$$

Index J je získán právě díky vektoru RNS určujícím, jak strmá křivka bude a tedy jak silný je maskovací jev v daném segmentu. Index J se pohybuje v rozmezí 1-18. IG pak určuje konkrétní hodnotu strmosti dle právě zpracovávaného kritického pásma. IG se pak pohybuje v rozmezí 0-8 dle zpracovávaného pásma. Pro prvních 9 kritických pásem se hodnota mění od nuly do 8. Není předpokládáno, že by první pásmo mohlo být maskováno s ohledem na velkou strmost levé strany maskovací křivky. Pro vyšší pásma je je pak index IG již vždy roven 8.

Pokud je pásmo zamaskováno celé, má hodnota momentálně zpracovávaného pásma Z_2 , vypočítaná jako součet Z_1 a DZ , hodnotu větší než je horní hranice daného pásma ZUP . Hlasitost v daném pásmu je pak dána maskovací křivkou předchozího pásma dle vztahu:

$$N_2 = N_1 - DZ * USL(J, IG) \quad (6.13)$$

Příspěvek daného pásma, který se přičítá k celkové hlasitosti N , je pak počítán jako střední hodnota dané křivky dle vztahu 6.14 bez ohledu na to, zda je pásmo maskováno celé, anebo jen částečně.

$$N_p = \frac{N1 + N2}{2} \quad (6.14)$$

Je-li pásmo maskováno pouze částečně, je hodnota DZ menší než ZUP daného pásma a je tedy počítána nejprve maskovaná část pásma. Podle hlasitosti předchozího pásma je zvolena hodnota RNS udávající hodnotu rozsahu maskování a dle té je pak volena i strmost momentálně zpracovávané části křivky USL . Křivka je v takovém případě zpracovávána po menších částech, tak aby strmost odpovídala maskovacímu jevu.

Pokud hodnota RNS bude nižší než hodnota NM pro momentálně zpracovávaný segment, je hodnota $N2$ nastavena na hodnotu NM a další část pásma tedy již není maskována předcházejícím pásmem. Výpočet pro nezamaskovanou část probíhá pak probíhá dle vztahu 6.11 a příspěvek k celkové hlasitosti části pásma dle vzorce 6.14.

Takto se postupuje pro všechna dílčí aproximovaná kritická pásma. Po skončení výpočtů v rámci cyklu `for` je pak ještě aplikována kalibrace pro výslednou hlasitost. Je-li hodnota hlasitosti menší nebo rovna hodnotě 16 sonů, je výsledná hlasitost přepočítána dle vztahu

$$N = \frac{\text{floor}(N * 1000 + 0.5)}{1000} \quad (6.15)$$

Pro hodnoty hlasitosti větší než 16 sonů je výsledek přepočítán dle vztahu:

$$N = \frac{\text{floor}(N * 100 + 0.5)}{100} \quad (6.16)$$

kde funkce `floor` slouží k zaokrouhlení hodnoty na nejbližší nižší celé číslo.

6.3 SHARPNESS

Pro výpočet ostrosti je tedy využit vektor specifických hlasitostí vypočítaný ve skriptu pro hlasitost. Jelikož se jedná o vektor s 240 prvky (tedy 240 dílčími specifickými hlasitostmi – krok je tedy 0.1 Barku), bylo tedy nutné uzpůsobit funkční předpis a krok výpočtu.

Prvním krokem je tedy sestavení funkce pro vážení specifické hlasitosti, jejíž popis je v kapitole 4.2.. Následuje samotný výpočet dle vzorce 4.5.

Jak je vidět oproti např. hlasitosti je výpočet mnohem jednodušší, to je nicméně dáno právě tím, že specifické hlasitosti jsou již vypočítány. Popis výpočtu specifických hlasitostí je popsán v kapitolách 6.2 a 6.2.1.

6.4 HRUBOST

Skript začíná přípravnou fází, kde jsou přiřazeny jednotlivé prvky zpracovávaného záznamu do jednotlivých proměnných tak, jak jsou vyžadovány ve skriptu. Jedná se o vzorkovací frekvenci a počet vzorků signálu, normovací konstantu c_{al} ze vzorce 4.12, počet kritických pásem, kterých je, jak je uvedeno v kapitole 4.3.4 47, s překrytím 0.5 barku. Také je uveden počet dílčích kritických pásem pro krok 0.1 Barku, tedy 241 dílčích pásem. Před inicializační částí se také nachází pomocný výpočet, který zaručí, že počet vzorků zpracovávaného záznamu nebo jeho části je beze zbytku dělitelný dvěma. V případě, že není, je poslední vzorek zpracovávaného záznamu vymazán. Při praktických výpočtech, kdy při záznamu dlouhém 0.1s se vzorkovací frekvencí 48 kHz dojde k zahození 1 vzorku z 4800. Chyba jsem tedy považoval za zanedbatelnou.

6.4.1 INICIALIZACE

Následuje inicializační část. Nejprve jsou vypočítány základní parametry, tedy čas signálu, frekvenční rozlišení ze kterého jsou poté vypočítán:

- 1) Počet frekvenčních složek obálky spektra pro frekvence do 645 Hz
- 2) Počet frekvenčních složek signálu pro frekvence do 16 kHz
- 3) Počet frekvenčních složek signálu pro frekvence do 15.5 kHz

Frekvenční složky obálky jsou využívány v souvislosti s výpočtem modulaci transformujících funkcí a výpočtem modulačních hloubek (naznačeno např. na obrázku 4.8). Frekvenční složky do 16kHz jsou využívány při výpočtu a_0 zohledňující přenos zvuku

z okolí do vnitřního ucha. Frekvenční složky do 15.5 kHz jsou pak využívány pro výpočet barkových pásem vypsanych v tabulce 2. Následuje definice váhové funkce

využívané pro normalizování specifických hlasitostí tak, aby celková hrubost odpovídala definici dle 4.3.1.

Následuje blok přípravných výpočtů. Nejprve je proveden výpočet koeficientu a_0 v rámci funkce $a_0\text{damp}$. V tomto skriptu jsou nejprve inicializována data pro výpočet, tzn. vektor frekvencí pro výpočet koeficientu a hodnoty koeficientu pro jednotlivé frekvence. Hodnoty a_0 jsou tedy známé, nicméně v rámci tohoto skriptu jsou hodnoty vypočteny pro všechny dílčí frekvence. Vektor frekvencí je v rozmezí 1kHz až 13,5 kHz. Výpočet ale probíhá pro 16 kHz pásmo. Pro frekvence pod 1,25 kHz je koeficient a_0 roven nule. Pro frekvence nad 13,5 kHz je proveden výpočet nárůstu koeficientu od 13,5 kHz do frekvence 16 kHz. S touto strmostí pak koeficient roste až do hodnot přibližně 40. Před samotným výpočtem koeficientu jsou ještě počítány hraniční frekvence, tedy hodnoty frekvencí, kde se mění hodnoty koeficientu. Ty se mohou v závislosti na délce signálu, a tedy na frekvenčním rozlišení, lišit. Pak již následuje samotný výpočet, kdy je pro každé pásmo mezi hraničními koeficienty vypočítána určitá strmost, resp. krok, který určuje lineární pokles nebo nárůst mezi hraničními frekvencemi. Pro každou frekvenci je tedy vypočítána hodnota a_0 . Tento vektor je pak předán k dalšímu zpracování.

Následuje výpočet prahu hlasitosti v rámci skriptu lhs . Výpočet je prováděn pro frekvence od 25 Hz do 15.5 kHz. Nejprve jsou inicializována data pro výpočet, tedy vektor frekvencí od 25 Hz do 1 kHz a k tomu příslušný vektor hs určující excitační hladiny na prahu hlasitosti pro příslušné frekvence. Další postup je podobný jako při výpočtu koeficientu a_0 , nejprve jsou vypočítány hraniční frekvence pro dané frekvenční rozlišení a poté jsou vypočítány hodnoty L_{TQ} pro jednotlivé frekvence, opět s vypočteným krokem a rovnoměrným rozložením pro všechny dílčí frekvenční složky. Pro frekvence nad 1 kHz, jsou hodnoty vypočítaného vektoru excitačních hladin (ve skriptu $lethr$) vyplněny hodnotou 4.

Dalším krokem je přepočtení frekvenčních složek z frekvenční stupnice do barkové, tedy všechny frekvenční složky jsou přepočítány do míry kritického pásma v rámci skriptu $f2z$. K tomu je využit vzorec 4.1. Kritické pásmo je pak rozděleno s krokem 0.1 Barku a pro toto rozlišení je proveden přepočtení zpět do frekvenční stupnice, k čemuž je využit skript $z2f$. Výpočet probíhá podobně jako v předchozích případech. Nejprve jsou inicializovány vektory dat pro výpočet. Vektor frekvencí a vektor kritických pásem těmito frekvencím

odpovídajících. Je třeba vzít v potaz, že 0.1 Barku v barkové stupnici neznamena lineární nárůst v celém frekvenční stupnici. Mezi frekvencemi 20 až 100 Hz odpovídá 0.1 barku kroku 8Hz. Mezi frekvencemi 100 až 400 Hz odpovídá 0.1 barku kroku 10 Hz atd. Takto vypočítané frekvence jsou tedy předány k dalšímu výpočtu. Pro další výpočty jsou pak vypočítány dolní a horní hranice překrývajících se kritických pásem ve frekvenční a barkové stupnici.

Dalším krokem je výpočet spektra signálu, který je rozložen do několika kroků. Před samotným zpracováním dat pomocí FFT algoritmu je provedeno vážení dat Blackmanovým oknem. Po výpočtu dat pomocí FFT je vypočtena amplituda spektra jako absolutní hodnota výsledku FFT, fáze spektra pomocí funkce angle a výkon amplitudového spektra. Výpočet výkonového spektra není prováděn přímo, např. pomocí funkce PSD, protože v následujících výpočtech je nutná znalost o fázi spektra. Výkonové spektrum je pak váženo parametrem a_0 .

Konečným krokem v rámci inicializační části je výpočet modulaci transformujících funkcí H_{fmod} . Výpočet je proveden v rámci skriptu hfmod. Nejprve je inicializováno 5 vektorů pro funkce H2, H5, H16, H21 a H42, kde číslo za H odpovídá vždy kritickému pásmu. Ve vektoru je pak vždy uvedena nejprve frekvence a poté její váha. Výpočet jednotlivých funkcí pak probíhá lineární interpolací mezi jednotlivými frekvencemi uvedenými v příslušných vektorech. Např. ve vektoru H2 je první dvojice hodnot 0,0 a druhá dvojice hodnoty 17,0.8. Pro frekvence 0-17 Hz je tedy provedena lineární interpolace od hodnoty 0 do hodnoty 0.8. Takto je postupováno pro všechny dvojice, dokud není namodelována celá funkce. Tímto výpočtem také končí inicializační část výpočtu hrubosti.

6.4.2 VÝPOČET HRUBOSTI

Výpočet se dá rozdělit do tří základních částí. Nejprve jsou zpracována jednotlivá kritická pásma jak je naznačeno v kapitole 4.3.4 resp. 4.3.3. Druhou částí je výpočet křížové korelace jednotlivých pásem, jak je uvedeno na stránce 42. Posledním bodem je pak výpočet modulačních hloubek s ohledem na fakta zmíněná v kapitole 4.3.4 a výpočet hrubosti.

Pro všech 47 kritických pásem jsou tedy provedeny následující výpočty. Nejprve je vypočítána vyfiltrovaná excitační hladina v barkové stupnici pro zpracovávané kritické pásmo. K tomu je určen skript lez. Nejprve jsou stanoveny vektory frekvencí ve frekvenční a barkové stupnici. Poté je výkonové spektrum prohledáno, tak aby byly dále zpracovány

pouze složky nad minimální hodnotou prahu slyšitelnosti v decibelech. K dalšímu zpracování je předán vektor frekvencí příslušný těmto složkám. Tyto složky jsou dále rozděleny na tři skupiny:

- složky překračující horní barkový limit zpracovávaného pásma
- složky pod dolním barkovým limitem zpracovávaného pásma
- složky nacházející se mezi barkovými limity zpracovávaného pásma

Podle toho, v jaké skupině se jednotlivé složky nacházejí, jsou nebo nejsou filtrovány trojúhelníkovými filtry uvedenými na straně 40. Pro horní nebo také pravou část trojúhelníkových filtrů je v tomto skriptu napsána funkce hislope. Dolní nebo levá strana má strmost 27 dB/bark.

Spektrum je tedy nejprve filtrováno dle následujícího postupu. Pokud frekvenční složky překračují horní mez právě zpracovávaného pásma, jsou filtrovány dle funkce hislope. Pokud jsou pod dolní mezí, jsou filtrovány dle dolní části filtru. Složky mezi těmito hranicemi zůstávají nezměněny. Poté následuje porovnání takto filtrovaného spektra s prahem slyšitelnosti. Pro složky, které mají výše než tento práh, je pak vypočítána filtrovaná excitační hodnota uložena ve vektoru *leiz*.

V následujícím kroku je započten vliv fáze na spektrum excitačních hodnot. Poté již může být spočítána hodnota $|e_i(t)|$, tedy časový průběh excitace pomocí inverzní Fourierovy transformace a funkce *abs* počítající absolutní hodnotu. Tato hodnota je uložena do proměnné *envexcit*.

Dalším krokem je výpočet DC složky dle vztahu 4.13, uložené v proměnné *h0*. Na následujících řádcích probíhá výpočet $sBP_i(t)$ tedy výpočet časového průběhu obálky signálu dle vzorce 4.8. Nejprve je pomocí FFT spočítáno spektrum $|e_i(t)|$ uložené do proměnné *spexcit*. Poté následuje filtrování pomocí modulaci transformujících funkcí. Takto filtrované excitační spektrum je pak převedeno pomocí inverzní Fourierovy transformace zpět do časové oblasti. Výsledek je pak uložen v proměnné *tsenv*. Tato hodnota je pak předána do následující části výpočtu, tedy do výpočtu křížové korelace jednotlivých pásem. Před tímto výpočtem je ovšem ještě vypočítána hodnota amplitudového rozsahu obálky dle vzorce 4.14.

Následuje výpočet křížové korelace a modulačních hloubek. Křížové korelace jsou vypočítány dle vzorce 4.11 pomocí funkce *corrcoef*. Výpočet modulačních hloubek pak

probíhá dle vzorce 4.15 s uvedeným omezením modulačních hloubek na hodnotu 1. Posledním krokem je pak výpočet specifických hrubostí a vlastní hrubosti dle vzorce:

$$R = 0.25 * \sum_{i=0}^{47} (cors \ gr \ ms)^2 \quad (6.17)$$

Kde i jsou kritická pásma, $cors$ jsou koeficienty křížové korelace, gr je váhová funkce a ms jsou modulační hloubky. Výpočet tedy probíhá mírně odlišně od vzorce 4.12, pravděpodobně vlivem úprav během výpočtu. Dalším důvodem je, že vzorec 4.12, je vzorec pro výpočet hrubosti dle Aurese. Výpočet celkové hrubosti se tedy také odlišuje.

6.4.3 VYUŽITELNOST ÚDAJŮ PŘI VÝPOČTU HLASITOSTI

Z předcházejícího popisu výpočtu hrubosti je zřejmé, že některé kroky jsou stejné jako v případě výpočtu hlasitosti. S ohledem na kapitoly 6.2.1 a 6.1.5 tedy dodávám, že koeficienty počítané při výpočtu hrubosti by šly využít také při výpočtu hlasitosti, nicméně i přesto budou některé koeficienty chybět.

Druhou možností by pak bylo nahrazení celého filtrování a výpočtu excitačních hladin při výpočtu hlasitosti výpočtem excitačních hladin pro hrubost. To by bylo možné za předpokladu přizpůsobení koeficientů RNS a USL z kapitoly 6.2.1, využívaných při konstrukci hlasitosti. Ty jsou přizpůsobeny právě pro aproximovaná kritická pásma a neměl jsem informace pro jejich výpočet.

Úprava výpočtu hlasitosti by tedy byla možná v případě získání doplňujících údajů popsanych v předchozích odstavcích. Jelikož jsem těmito informacemi nedisponoval, ponechal jsem výpočet hlasitosti nezměněn.

6.5 VÝPOČET TONALITY

Je uveden zde, protože přímo vychází z výkonového spektra signálu. Pomocí funkcí *mean* a *geomean* je určen aritmetický a geometrický průměr. Z jejich následného poměru je pak vypočítána „plochosť“ spektra. Po logaritmování je díky jednoduché funkci *min* určeno, zda je zvuk širokopásmový nebo úzkopásmový. Pro širokopásmový zvuk se hodnoty tonality pohybují od 0 do 1. Úzkopásmový zvuk má tonalitu rovnou 1. Vzorce pro výpočet jsou uvedeny na straně 45, odpovídající prakticky přesně vzorcům ze skriptu.

6.6 SENSORY PLEASANTESS

Výpočet jsem původně vyhotovil dle vzorce uvedeného na straně 46. Nicméně v původním použití měly hodnoty tonality obrácený smysl, tedy vyšší tonalita znamenala méně tonální zvuk. To samozřejmě vedlo na špatné vyhodnocení sensorické přívětivosti, více tonální složky byly vyhodnocovány jako více příjemné. Pro jsem vzorec 5.1 upravil, konkrétně hodnotu váhy tonality do následujícího tvaru:

$$\frac{P}{P_0} = 10 * \left(e^{-0.7 \frac{R}{R_0}} e^{-1.08 \frac{S}{S_0}} e^{-1.42 \frac{T}{T_0}} e^{-(0.023 \frac{N}{N_0})^2} \right) \quad (6.18)$$

Konstantu jsem volil experimentálně, tak aby byla přibližně zachována váha tonality. Nicméně vzhledem k faktu, že tonalita se mění v mezích 0 až 1, jsem se rozhodl mírně navýšit její váhu s ohledem na fakt, že např. ostrost se pohybuje ve větším rozsahu, viz kapitola 7.1.2. Tonalita je tedy vyhodnocena přísněji než v původním modelu. Výslednou hodnotu jsem také násobil hodnotou 10, aby hodnoty v grafech pro porovnání sensorické přívětivosti nebyly příliš nízké a dalo se mezi jednotlivými výsledky lépe orientovat.

Výpočet tedy probíhá dle vzorce 6.18. Je počítána jako absolutní hodnota sensorické přívětivosti, tzn. bez srovnání s kalibračním tónem, a poměrná hodnota pro srovnání s kalibračním záznamem (může se měnit, přednastaven je tón o parametrech 1 kHz 60dB SPL). Nejprve se provede výpočet psychoakustických veličin pro kalibrační záznam, poté výpočet sensorické přívětivosti pro tento záznam uložený v proměnné SP0.

Poté je spočítaná absolutní sensorická přívětivost uložena v proměnné SP_d a poměrná hodnota pak v proměnné SP. Následuje výstup na konzolu vypisující dané veličiny a posuzující, zda je veličina více či méně příjemná než zvolený kalibrační záznam. Vyšší hodnota sensorické přívětivosti znamená více příjemný zvuk a naopak.

7 VÝSLEDKY, TESTY A SROVNÁNÍ

V rámci této kapitoly jsou nejprve otestovány jednotlivé veličiny pro známé parametry a zda je vytvořené modely splňují. Poté je provedeno měření příslušných záznamů elektromagnetických hluků pohonu a zhodnocení výsledků.

7.1 KONTROLA MODELŮ

Pro každý model jsem zvolil několik kalibračních tónů. Kalibrační tóny jsem vybral s ohledem na definice daných veličin, případně takové tóny abych prokázal, že model zohledňuje vlastnosti daného záznamu v literatuře a v kapitole Psychoakustické veličiny.

7.1.1 HLASITOST

Pro ověření hlasitosti jsem použil nejprve 3 tóny o frekvenci 1 kHz, protože je snadné určit očekávanou hodnotu hlasitosti. Další dva tóny mají frekvence 100 Hz a 10 kHz pro ověření zohlednění frekvenční závislosti lidského sluchu. Záznam maska je pak popsán v samostatném odstavci pod tabulkou 4. V této tabulce jsou pak vidět výsledky výpočtů. Pro každý zpracovávaný záznam je uvedena udávaná, resp. naměřená hodnota SPL, matlabem vypočítaná hodnota ze skriptu calibrate, a hodnota definovaná, anebo předpokládaná hodnota nebo rozmezí hlasitostí daného záznamu. Definice jednotky son je uvedena v kapitole 4.1.1.

Název	Centrální frekvence	Udávaná hodnota SPL	Vypočítaná hodnota SPL	Očekávaná hlasitost	Vypočítaná hlasitost
Kalibrace	1kHz	60dB	59.97dB	4 son	3.95son
sin1k40dB	1kHz	40dB	39.98dB	1 son	0.98 son
sin1k80dB	1kHz	80dB	79.97dB	16 son	15.94 son
sin0_1k80dB	100Hz	80dB	79.97dB	N < 16 son	9.78 son
sin10k80dB	10kHz	80dB	79.99dB	N < 16 son	8.25 son
sin14k80dB	14kHz	80dB	79.99dB	N < 8.25 son	2.8 son
maska	X	X	80dB	15.94 son	15.89 son

Tab 4: Tabulka hodnot hlasitostí pro kontrolní účely

Zvukový záznam maska.wav je pak směs dvou tónů. Prvním z nich je sin1k80db jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 4 na 3. řádce. Druhý je tón o centrální frekvenci 1.1 kHz a 60dB SPL. Tento zvukový záznam má prokázat, že funguje také výpočet maskovacího

jevu. V ideálním případě by tedy hlasitost tohoto zvuku měla být stejná jako hlasitost samotného tónu sin1k80db.

Výpočet hlasitosti tedy dle mě známých skutečností odpovídá literatuře. Neprováděl jsem žádné testy pro širokopásmové zvuky, protože jsem si nebyl jist, jaké hodnoty hlasitosti bych měl pro dané záznamy očekávat.

Pro správné použití nicméně uvádím některá varování. Pro zvuky kratší nebo delší než 1s je nutné využít segmentování. Pro zvuky delší než 1s, protože výpočet hlasitosti počítá s vůbec nebo jen nevýrazně se měnící časovou obálkou zvuku. Pro více se měnící časovou obálku je vhodné rozdělit zvuk do segmentů kratších než 1s. Čím více se bude obálka měnit tím kratší časový úsek. Pro zvuky kratší, ale i delší je pak zaveden koeficient úpravy okna jak je naznačeno v kapitole 6.1.1.

7.1.2 OSTROST

Pro ověření funkce modelu ostrosti jsem využil tři základní tóny o frekvencích 100Hz, 1Khz a 10kHz. Definice jednotky acum je uvedena v kapitole 4.2.1.

Název	Centrální frekvence	Udávaná hodnota SPL	Vypočítaná hodnota SPL	Očekávaná ostrost	Vypočítaná ostrost
Kalibrace	1kHz	60dB	59.97dB	1 acum	1.03 acum
sin1k80dB	1kHz	80dB	79.97dB	1 acum	1.06 acum
sin0_1k80dB	100Hz	80dB	79.97dB	$S < 1$ acum	0.28 acum
sin10k80dB	10kHz	80dB	79.99dB	$S > 1$ acum	7 acum

Tab 5: Tabulka hodnot ostrostí pro kontrolní účely

Platí stejná doporučení jako při výpočtu hlasitosti, ohledně délky záznamů, nicméně ostrost by jako taková neměla být ovlivněna délkou záznamu tak výrazně jako hlasitost. Výpočet tedy souhlasí s informacemi z literatury, širokopásmové zvuky jsem nevyhodnocoval ze stejných důvodů jako v případě hlasitosti.

7.1.3 HRUBOST

Pro ověření funkce hrubosti bylo třeba zohlednit, že hrubost se mění především v závislosti na: hloubce modulace, modulační frekvenci a frekvenci. To vyplývá z popisu hrubosti v kapitole 4.3. Definice jednotky asper je pak uvedena v kapitole 4.3.1. Nejprve bylo na již využitých tónech otestováno, zda model vrací nízké hodnoty hrubosti pro nemodulované zvuky, resp. tóny. Poté byl samozřejmě k posouzení funkce využit tón udáván v definici

jednotky. Další zvolené tóny měly za úkol ověřit závislost hrubosti na modulační frekvenci, hloubce modulace a frekvenci tónů.

Název	f	SPL	SPL_mt	m	f _{mod}	R _{očekávaná}	R _{vypočtená}
Kalibrace	1kHz	60dB	59.97dB	X	X	R<1 asper	0.0002 asper
Hr1	1kHz	60dB	60.19dB	1	70Hz	1 asper	1.09 asper
Hr2	1kHz	60dB	59dB	0.5	70Hz	R<1 asper	0.39 asper
Hr3	1kHz	60dB	60.18dB	1	40Hz	R<1 asper	0.83 asper
Hr4	1kHz	60dB	60.19dB	1	100Hz	R<1 asper	0.69 asper
Hr5	5kHz	60dB	60.19dB	1	70Hz	R<1 asper	0.74 asper
Hr6	500Hz	60dB	60.19dB	1	70Hz	R<1 asper	0.5 asper
Kart	X	X	80.35dB	X	X	R<1 asper	0.13 asper

Tab 6: Tabulka hodnot hrubostí pro kontrolní účely

Z tabulky vyplývá, že všechny hodnoty odpovídaly teoretickým předpokladům. Poslední tón Kart je záznam nespecifikovaného točivého stroje. V záznamu se nevyskytuje žádná výrazná modulace na frekvencích, které by měla hrubost zohledňovat, chtěl jsem tedy ověřit, že model vrátí správnou nízkou hodnotu.

7.1.4 TONALITA

Pro ověření funkce tonality jsem nejprve zvolil dva tóny o frekvenci 1 kHz s rozdílnou hodnotou SPL. Dále jsem zvolil záznamy Kart a Hr1 pro posouzení výpočtu hrubosti. Kart abych ověřil, že model vyhodnotí záznam jako netonální, resp. ne čisté tonální, tedy s hodnotou tonality menší než 1. Modulovaný tón Hr1 jsem pak volil, abych ověřil funkčnost modelu i pro modulované záznamy.

Název	Centrální frekvence	Udávaná hodnota SPL	Vypočítaná hodnota SPL	Očekávaná tonalita	Vypočítaná tonalita
Kalibrace	1kHz	60dB	59.97dB	1	1
sin1k80db	1kHz	80dB	79.97dB	1	1
Kart	X	X	80.35dB	T < 1	0.6
Hr1	1kHz	60dB	60.19dB	1	1

Tab 7: Tabulka hodnot hrubostí pro kontrolní účely

Dle mě známých skutečností je tedy model funkční, nicméně vzhledem k jednoduchosti modelu a nedostatku informací ohledně hodnot, které by měl model vracet pro konkrétní záznamy, byl model pro výpočet tonality řádně zhodnocen až s obdržnými záznamy.

7.1.5 SENZORY PLEASANTESS

Vzhledem k faktu, že sensorická přívětivost má zohledňovat subjektivní vjem člověka na daný záznam, a také faktu, že jsem neměl naprosto žádné informace ohledně hodnot, bylo ohodnocení tohoto výpočtu značně subjektivní. Pro posuzování funkčnosti jsem bral v potaz pouze absolutní hodnotu sensorické přívětivosti, poté jsem dle vlastního rozvážení seřadil uvedené záznamy dle příjemnosti. Toto pořadí je uvedeno v sloupci Pořadí v tabulce. Výpočet poměrné hodnoty a další informace jsou uvedeny v kapitolách 5.1.1 a 6.6. Před uvedením samotné tabulky je důležité poznamenat, že vyšší hodnota senzory pleasantess znamená příjemnější tón a naopak.

Název	N	S	R	T	Pořadí	Senzorická přívětivost
Kalibrace	3.95 son	1.03 acum	0.0002 asper	1	2	0.79
sin0_1k80dB	9.78 son	0.28 acum	0.03 asper	1	1	1.66
sin10k80dB	8.25 son	7 acum	0.0002 asper	1	6	0.0012
maska	15.89 son	1.07 acum	0.18 asper	1	4	0.6
Hr1	4.06 son	1.02 acum	1.08 asper	1	3	0.37
Kart	31.1 son	1.2 acum	0.12 asper	0.6	5	0.06

Tab 8: Tabulka hodnot sensorických přívětivostí pro kontrolní účely

Z důvodů šetření místem, jsou další parametry pro jednotlivé tóny uvedeny pouze v předcházejících tabulkách. Z tabulky vyplývají dvě důležitá fakta. Prvním je výrazná závislost příjemnosti zvuku na obsahu vysokých frekvencí. Druhým je fakt, na který bych chtěl upozornit především a to, že sensorická přívětivost nebere příliš v potaz hlasitost zvuku. To se projevilo v mém subjektivním srovnání záznamů Hr1 a maska, se mi zdál zvuk maska méně příjemný právě kvůli výrazně vyšší hlasitosti. Sensorická přívětivost nicméně vyhodnotila Hr1 jako méně příjemný právě kvůli nízké citlivosti na hlasitost. Tento fakt se později samozřejmě také projevilo při posuzování jednotlivých záznamů zvuků pohonu. Více detailů je pak v kapitole 7.2. Záznamy jsou spolu se skripty na přiloženém CD ve složce zvuky. Před poslechem bych také opět rád upozornil na fakt, že se mnou zvoleným pořadím nemusí nutně souhlasit každý, příjemnost daného záznamu je stále do značné míry subjektivní prožitek a každý ho vnímá jinak. Nicméně díky tomuto a předcházejícím výpočtům by se názory na jednotlivé záznamy neměly výrazněji odlišovat.

7.2 VYHODNOCENÍ ZÁZNAMŮ

Pro vyhodnocení záznamů elektromagnetického zvuku pohonu jsem obdržel záznamy pro trakční asynchronní pohon EM Brno 1AY90L-4 s následujícími parametry.

- Jmenovitý výkon 4kW
- Jmenovité napětí 380V
- Jmenovitý proud 8.9A
- Frekvence 50Hz
- Jmenovité otáčky 1420 ot/min
- Počet pólů 4

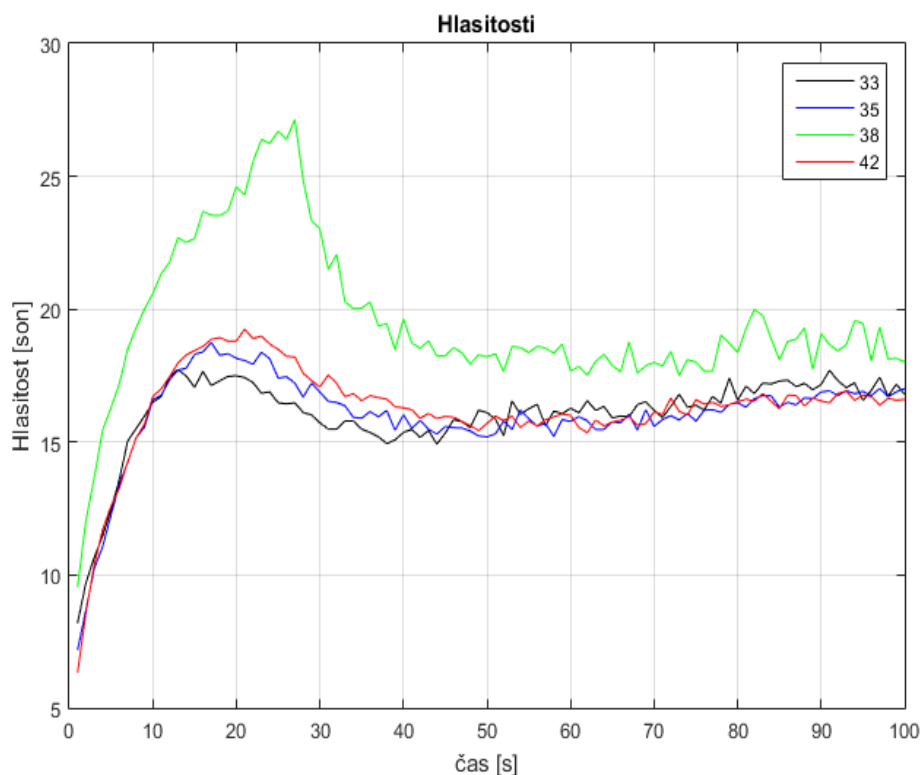
Všechny záznamy byly pořízeny na tomto motoru s PWM nebo RPWM modulací. Spínací frekvence byla nastavena na 2.5 kHz. Této frekvenci odpovídá 30 000 tiků čítače. Při RPWM modulaci se pak spínací frekvence měnila v závislosti na změně počtu tiků čítače. Dosáhlo se tak určitého rozkmitu hodnot spínací frekvence a to by se mělo příznivě projevit na přijemnosti zvuku. Vše je znázorněno v tabulce 9. Ve sloupci typ modulace je také u některých záznamů připsán parametr eps. Eps znamená, že byl proveden rozdílný výpočet úhlu prostorového vektoru napětí z požadované statorové frekvence. Záznamy označeny navíc písmenem Z byly použity při základním posouzení výpočtů v následující kapitole 7.2.1.

Označení	Typ modulace	Spínací frekvence [Hz]
33	PWM +Z	2500
35	RPWM +Z	2500 ± 170,66
37	RPWM	2500 ± 341,33
38	RPWM + Z	2500 ± 682,66
39	RPWM	2500 ± 85,33
42	RPWM + eps + Z	2500 ± 1365
43	RPWM + eps	2500 ± 682,66
44	RPWM + eps	2500 ± 170,66
46	RPWM + eps	2500 ± 85,33
48	RPWM + eps	2500 ± 21,33
50	PWM + eps	2500

Tab 9: Popis zpracovávaných záznamů

7.2.1 VYHODNOCENÍ UKÁZKOVÝCH ZÁZNAMŮ HLUKU POHONU

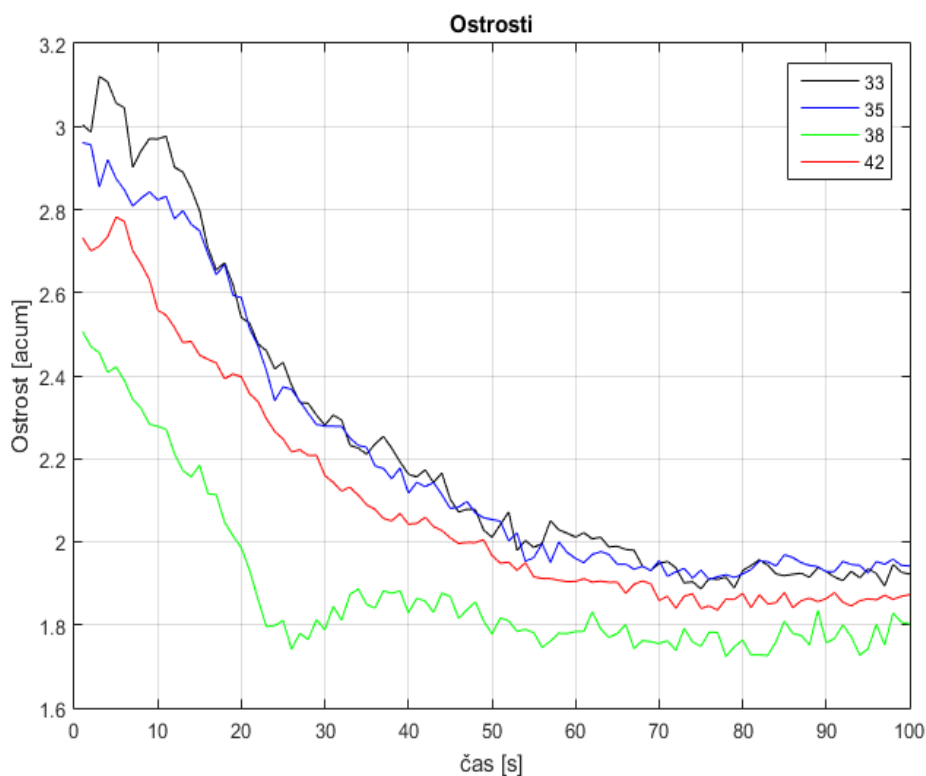
Nejprve jsem každý záznam po provedení počátečních úprav, rozdělil na segmenty dlouhé 1s a pro každý vypočítal hodnotu psychoakustických veličin, včetně hodnoty senzorické přívětivosti. Pro vybrané záznamy 33, 35, 38 a 42 jsou na následujících obrázcích zobrazeny grafy těchto veličin v celé délce záznamu, tak aby byl ukázán rozsah veličin a některá fakta, kterými je zdůvodněn následující postup.



Obr 7.1: Hlasitost základních záznamů

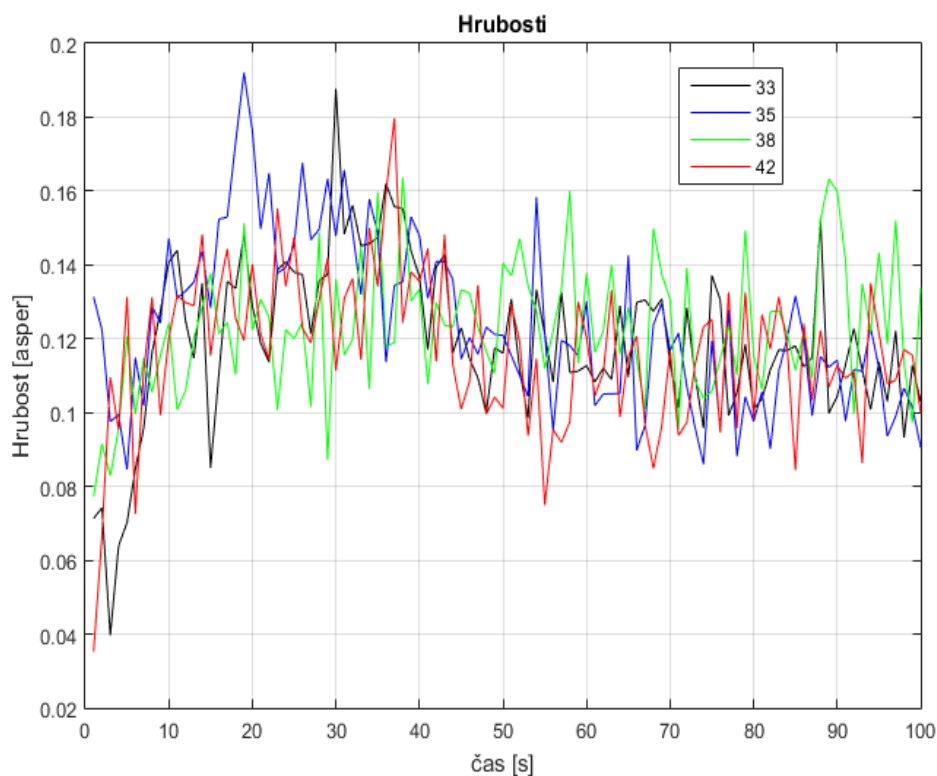
Nejprve jsou tedy na obrázku 7.1 zobrazeny hlasitosti. Při rozjíždění motoru je patrná vyšší hlasitost v prvních přibližně 30 sekundách, která poté poklesne a již se v celé délce pro daný záznam prakticky nemění. Záznam 38 má oproti ostatním vyšší hlasitost (rozdíl až 6 sonů v maximálních hodnotách).

V prvních 20 vteřinách se nejvíce projevuje podíl vyšších frekvencí, jak je patrné také z grafů ostrotí na obrázku 7.2. Pískání poté dále klesá a podobně jako hlasitost se také ostrost ustálí pro každý záznam na určité hodnotě. V pozdějších fázích rozběhu motoru je také pískání měniče stále více přehlušováno mechanickým hlukem, který motor vydává.



Obr 7.2: *Ostrost základních záznamů*

Na obrázku 7.3 je pak znázorněn průběh hrubostí. Jak je patrné z průběhů, hrubost se v

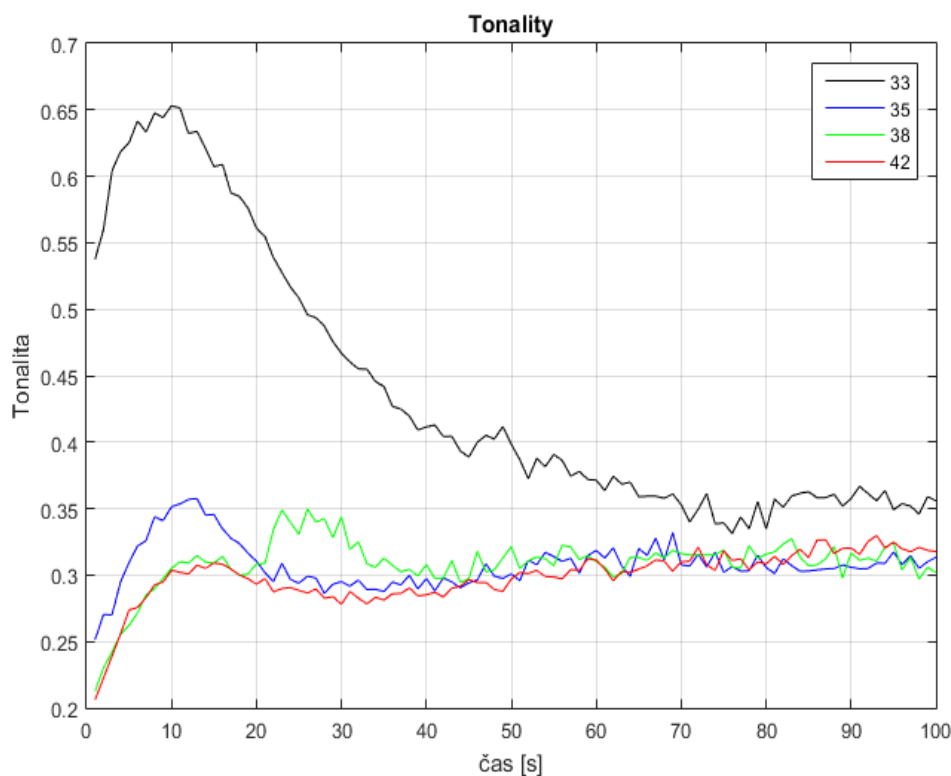


Obr 7.3: *Hrubost základních záznamů*

průběhu záznamů příliš nemění a také, jsou její hodnoty pro všechny čtyři záznamy

podobné. Na hodnotě sensorické přívětivosti se tedy hodnota hrubosti příliš neprojevila.

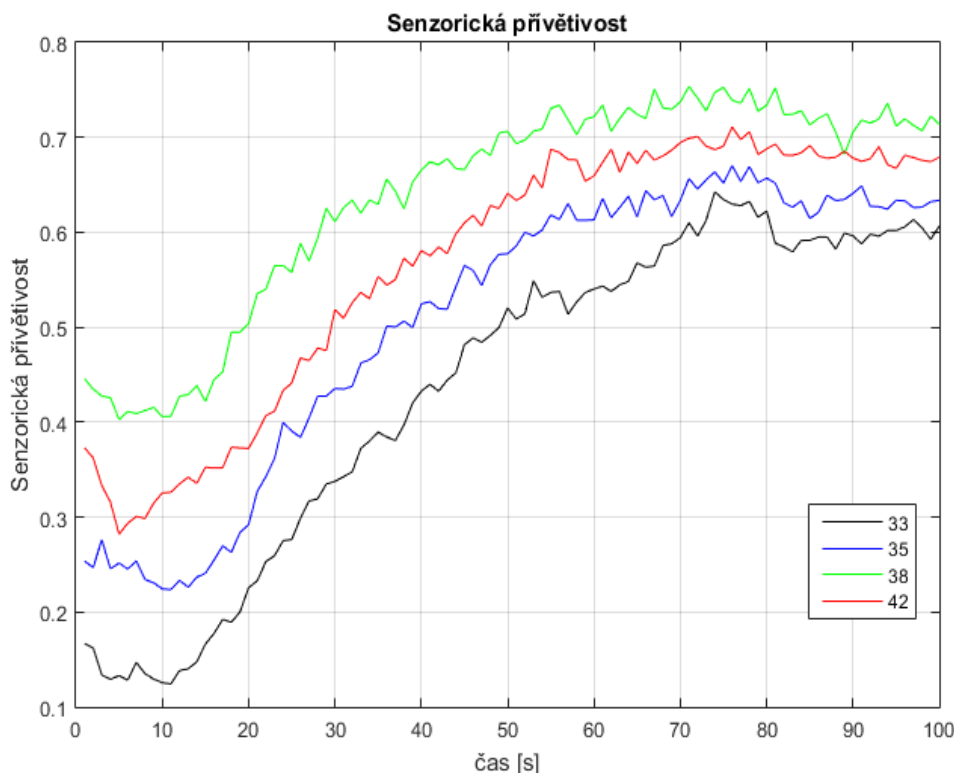
Poslední psychoakustickou veličinou je pak tonalita, jejíž průběhy jsou znázorněny na obrázku 7.4. Patrná je tonalita především průběhu 33, tedy průběhu bez RPWM.



Obr 7.4: Tonalita základních záznamů

Všechny předchozí veličiny jsou pak sumarizovány do sensorické přívětivosti jejíž průběh v závislosti na čase je znázorněn na obrázku 7.5. Mezi všemi čtyřmi záznamy je patrný rozdíl ve vypočítané příjemnosti v prakticky celé délce záznamů, což byl také jeden z důvodů pro výběr právě těchto konkrétních záznamů. Nejpříjemněji vyšel záznam 38 i přes zmiňovanou vyšší hlasitost. Největší vliv na příjemnost zde viditelně měla výrazně nižší ostrost, jak je patrné z obrázku 7.2. Ostatně i pro ostatní veličiny vyšla sensorická přívětivost v pořadí přesně stejném jako v případě ostrosti. V případě záznamů 35, 38 a 42 je to dáno ostatními velmi podobnými hodnotami. Záznam 33 má pak oproti ostatním také výrazně vyšší tonalitu, což se také negativně projevilo v hodnocení tohoto záznamu.

Z grafu sensorické přívětivosti je také patrné, že počáteční pískání, resp. elektromagnetický hluk pohonu se jeví jako méně příjemný než hluk mechanický. Nicméně diplomová práce je cílena právě na elektromagnetický zvuk a proto jsem se v další části rozhodl vyhodnocovat záznamy pouze v délce 50 vteřin, kdy se ještě mechanický zvuk tolik neprojevuje.



Obr 7.5: Senzorická přívětivost základních záznamů

Posledním krokem tedy je srovnání výsledků vypočítaných v Matlabu a subjektivního posouzení daných záznamů člověkem. Za tímto účelem je vytvořena tabulka 10. Subjektivní vjem byl posuzován čtyřčlennou skupinou s přiřazenými římskými čísly. V poslední sloupci SP je pak pořadí odpovídající výpočtům.

Záznam	I	II	III	IV	SP
33	4	4	4	4	4
35	3	2	3	3	3
38	2	3	2	2	1
42	1	1	1	1	2

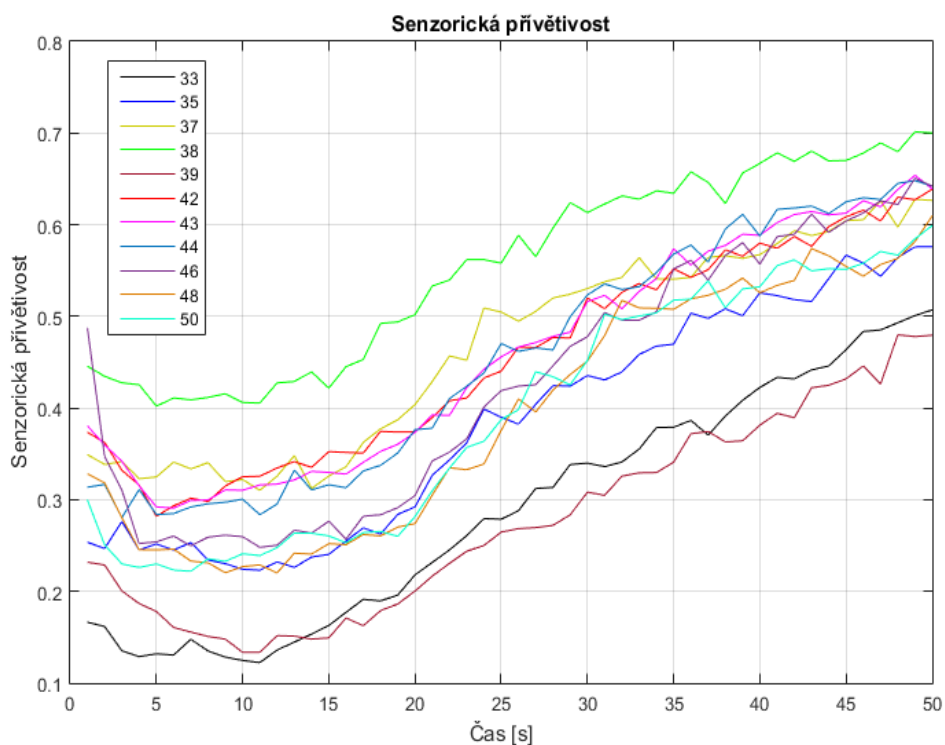
Tab 10: Srovnání výpočtu a subjektivního vjemu

Jak je patrné ze srovnání, všichni se jednomyslně shodli na dvou faktech, a to sice, že záznam 33, tedy záznam jen s PWM modulací je nejméně příjemný a 42 je nejvíce příjemný. Zatímco první fakt se shoduje s vypočtenou hodnotou senzorické přívětivosti, záznam 42 se jeví jako více příjemný, především kvůli nižší hlasitosti oproti záznamu 38. V jednom hodnocení se hlasitost projevila dokonce tak silně, že byl záznam 38 ohodnocen jako druhý nejhorší. Všechny hodnotící osoby se nicméně shodly také na tom, že

mechanický hluk se jevil jako příjemnější. Výsledky, důsledky a návrhy pro zlepšení jsou pak diskutovány v následující kapitole a v závěru.

7.2.2 VYHODNOCENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO HLUKU POHONU

Zde jsou pak výsledky pro obdržené záznamy ovšem již ve zkrácené délce. Zde jsou pak uvedeny výsledky pouze pro sensorickou přívětivost, grafy ostatních veličin jsou uvedeny v přílohách. Všechny záznamy jsou popsány v tabulce 9.



Obr 7.6: Sensorická přívětivost zkrácených záznamů

Na obrázku 7.6 jsou tedy znázorněny výsledky předložených záznamů. Jako nejméně příjemné se jeví záznamy 33 a 39, i přestože má např. záznam 46 menší rozkmit RPWM než záznam 39. Zde se projevuje zmiňovaný rozdílný výpočet vektoru napětí eps zmiňovaný v úvodu kapitoly 7.2. Neměl jsem bohužel konkrétní informace o postupu výpočtu, nicméně z grafů psychoakustických veličin v přílohách je vidět, že záznamy s tímto výpočtem se jeví jako příjemnější kvůli nižší hodnotě ostrosti oproti záznamům 33 a 39 a hodnotě tonality oproti záznamu 33. Při osobním srovnání např. záznamu 33 a 50, což jsou záznamy modulované pouze PWM, ale záznam 50 je pro rozdílný výpočet vektoru napětí a jeví se tedy dle výpočtů jako příjemnější. Totéž platí pro dvojice 35, 44 a 39, 46 a 37, 43. Při poslechu jsem nicméně buď nebyl schopen rozpoznat rozdíl, anebo jen při pozorném poslechu, rozdíly mezi záznamy zkrátka nebyly příliš velké.

Totéž platí i pro záznamy 50, 48, 46, kdy je mezi jednotlivými záznamy jen malý rozdíl rozkmitů PWM, na poslech se rozdílně, resp. příjemněji jevil záznam 44. Tento fakt správně zohledňuje i výpočet, kdy první tři zmiňované záznamy mají velmi podobný průběh sensorické přívětivosti a až záznam 44 se jeví jako příjemnější.

Pokud jsou tedy srovnávány záznamy se stejným typem výpočtu prostorového vektoru napětí, jeví se výpočet jako správný, tedy souhlasný se subjektivním vjemem s odkazem na problém s hlasitostí v kapitole 7.2.1. Obecně, záznamy pouze s PWM modulací jsou na poslech nejméně příjemné, RPWM při dostatečném rozkmitu spínací frekvence je na poslech příjemnější.

Dodávám, že druhou část výpočtů jsem již posuzoval převážně sám, hodnotící skupině jsem pouze dal k posouzení, zda dokáží rozlišit zmiňované podobné záznamy 50,48 a 46, případně mezi výše zmiňovanými dvojicemi. Z důvodů časté podobnosti těchto záznamů jsem nevyplňoval novou tabulku, nicméně doplňuji, že až na drobné rozdíly souhlasili s mým subjektivním posouzením. Dodal bych ovšem, že toto posouzení nemůže být bráno jako směrodatné, protože hodnotící skupina byla relativně malá.

Posledním faktem, který bych zmínil, je fakt, že záznamy bez eps, potřebují být výrazněji rozmítané, aby bylo docíleno požadovaného příjemnějšího hluku. U těchto záznamů byl pak také problém s několikrát zmiňovanou vyšší hlasitostí záznamů při větších rozkmitech RPWM.

ZÁVĚR

Prvním cílem této diplomové práce bylo vybrat vhodné psychoakustické veličiny pro posouzení elektromagnetického hluku pohonu. V prvních několika kapitolách jsou tedy popsána důležitá fakta při výpočtu vybraných psychoakustických veličin, kterými jsou: hlasitost, ostrost, hrubost, flukтуаční síla a tonalita. Veličiny byly vybrány, protože se vyskytují v komplexních veličinách především pak v senzorické přívětivosti. Druhým důvodem pak byla dostupnost informací k daným veličinám.

Druhým úkolem bylo sestavení skriptů pro výpočet vybraných psychoakustických veličin v Matlabu. Pro hlasitost jsem zvolil standardizovaný postup dle německé národní normy DIN 45631. Jak ze jména veličiny vyplývá, zohledňuje hlasitost zvuku, nicméně na rozdíl od běžně užívaných veličin počítá s tzv. efektem maskování. V rámci této práce jsem popsal princip funkce, samotný skript a pak na několika záznamech ověřil správnost výpočtu. Dle mně dostupných informací je výpočet korektní při dodržení popisovaných doporučení.

Druhou psychoakustickou veličinou je ostrost, která zohledňuje podíl vyšších frekvencí v daném zvuku. Výpočet prozatím nebyl standardizován, proto jsem volil mezi dvěma způsoby výpočtu, které využívají výsledků získaných při předchozím výpočtu hlasitosti. Konečnou použitou metodou je postup výpočtu dle Zwickera a Fastla. Opět následuje popis skriptu a poté ověření funkce na několika záznamech hluku. Dle mně dostupných informací je výpočet také korektní.

Třetí a čtvrtou psychoakustickou veličinou jsou hrubost a flukтуаční síla. Obě veličiny zohledňují vliv modulace obálky zvuku na subjektivní lidský vjem, ale v rozdílném rozsahu frekvencí. Hrubost zohledňuje frekvence v rozsahu 15 až 300Hz a flukтуаční síla modulační frekvence do 20Hz. Pro obě veličiny je bohužel problém dohledat dostatečné množství informací pro sestavení korektního výpočtu.

Pro hrubost jsem nejprve zkoušel sestavit model dle Zwickera a Fastla kvůli návaznosti na výpočet hlasitosti. Druhou možnou metodou byl model dle Aurese. Ani k jedné metodě ovšem není uváděno nebo se mi nepodařilo dohledat dostatečné množství informací. Pro výpočet je tedy využita metoda dle Daniela. Jako u předchozích veličin je postup výpočtu popsán, poté samotný skript s kapitolou ověřující správnost výpočtu.

Pro flukтуаční sílu se mi nepodařilo dohledat informace k sestavení matlabovského skriptu. Je uveden popis veličiny a odkaz na částečné informace postupu výpočtu.

Poslední psychoakustickou veličinou je tonalita. Veličina zohledňuje, zda je zvuk tonální, anebo širokopásmový. Zvolil jsem postup výpočtu uváděný ve zprávě Hluk trakčního pohonu - přehled řešení používaných ve světě. Jako v případě předcházejících veličin je uveden krátký popis a ověření funkce výpočtu.

Pro posouzení celkového vjemu ze zpracovávaného zvuku jsou předcházející veličiny sumarizovány do jedné komplexní veličiny. Touto veličinou je sensorická přívětivost, kterou jsem vybral především proto, že započítává všechny předcházející veličiny. Každá z veličin je započítána s rozdílnou vahou tak, aby zohledňovala komplexní subjektivní vjem.

Posledním úkolem bylo ověření funkce výpočtů a srovnání se subjektivním posouzením zvuků. Postup a výsledky jsou popisovány v poslední kapitole. Nejprve je ověřena správnost výpočtů jednotlivých veličin. Následuje kapitola s popisem měřených záznamů hluku pohonu a základních rozsahů hodnot, ve kterých se veličiny pohybují a také srovnání s lidským subjektivním vjemem. Poslední částí jsou samotné výpočty pro zbytek záznamů a diskuze výsledků.

Vyhodnocení záznamů se jeví jako správné, dobře rozeznají rozdíl mezi mechanickým hlukem pohonu a mezi pískáním, tedy mezi elektromagnetickým hlukem pohonu. Vyhodnocení elektromagnetického hluku je korektní za předpokladu, že je prováděno pro stejně řízený pohon, včetně např. výpočtu prostorového vektoru napětí. Pokud není tento předpoklad dodržen, mohou se výsledky lišit, i přesto, že při subjektivním posuzování byl rozdíl mezi těmito záznamy nerozlišitelný anebo jen velmi obtížně.

Model rozezná PWM od RPWM, za předpokladu, že má RPWM dostatečný frekvenční rozkmit spínací frekvence. Dodávám, že i při vyhodnocování člověkem bylo pro nízké rozkmity poznat, který záznam je pro PWM modulaci a pro RPWM modulaci. Tento fakt je ve výpočtech také dobře zohledněn.

Během vyhodnocování subjektivních názorů měřící skupiny se také ukazovalo, že hlasitost může mít na celkový podíl sensorické přívětivosti větší vliv, než jaký je uváděn v původním vzorci. Jako jedno z možných vylepšení tedy doporučuji zvýšení váhy hlasitosti, doplněné o kontrolní měření a posouzení vhodně zastoupenou skupinou jedinců pro srovnání naměřených hodnot a subjektivních názorů této skupiny.

V současné době tedy považuji model za dostatečně přesný pro kontrolu, zda hluk pohonu nepřekročil krajní hodnoty jednotlivých psychoakustických veličin a celkové příjemnosti hluků, nicméně např. pro jemné ladění RPWM nejsou výpočty dostatečně přesné.

Mezi možná vylepšení, případně možné směry pokračování zkoumání problematiky určitě doporučuji doplnění flukтуаční síly za předpokladu, že se podaří sehnat dostatečné množství informací. Další možnou úpravou by bylo přepočítání vah jednotlivých psychoakustických veličin v sensorické přívětivosti, především zmiňovaná hlasitost, nicméně problémy jsem měl také při zohledňování tonality, jelikož v původním modelu výpočtu sensorické přívětivosti byl použit rozdílný model tonality, musel jsem váhu upravovat dle svého vlastního posouzení. Poslední možností na vylepšení výpočtů je pak samozřejmě výpočet zcela nové komplexní psychoakustické veličiny.

Seznam použité literatury

- [1]:NOVÝ, Richard. Hluk a chvění. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01306-5.
- [2]:Sound pressure diagram. In: Wikipedia.org [online]. San Francisco: wikipedia, 2010 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure#/media/File:Sound_pressure_diagram.svg
- [3]:Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma. Ústav fyziky a materiálového inženýrství [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf
- [4]:VAŠÁTKO, KAREL. Spektrální analýza v reálném čase v programovém prostředí LabVIEW [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42890. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. ONDŘEJ RÁŠO.
- [5]:BERAN, Vlastimil. Chvění a hluk. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-916-6.
- [6]:BERNAT, Petr. Křivky stejné hlasitosti. In: [Http://homen.vsb.cz](http://homen.vsb.cz) [online]. Ostrava: FEI VŠB-TU Ostrava, ©2001-2008 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [7]:HE, Xing. Signal processing, perceptual coding, and watermarking of digital audio: advanced technologies and models [online]. Hershey, PA: Information Science Reference, c2012 [cit. 2017-04-25]. ISBN 978-161-5209-255.
- [8]:LEPA, Ondřej. PSYCHOAKUSTICKÝ MODEL LIDSKÉHO SLUCHU [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42960. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR SYSEL, Ph.D.
- [9]:Time Masking. In: Filozofski fakultet Sveučilišta u Zagrebu [online]. Záhřeb: Filozofski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2009 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.ffzg.unizg.hr/fonet/djelatnici/bakran/psi/maskiranje/Maskiranje-Zwicker.htm>
- [10]:JANDA, M., KRONEISL, M. Hluk trakčního pohonu - přehled řešení používaných ve světě. Plzeň : Západočeská univerzita, 2013. 20 s.
- [11]:CHOW, Edward. Masking. In: CS525 Multimedia Computing and Communications [online]. Colorado: University of Colorado, 2006 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://cs.uccs.edu/~cs525/audio/audio.html>
- [12]:Loudness. Salford [online]. Manchester: University of Salford Manchester, ©2017 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.salford.ac.uk/computing-science-engineering/research/acoustics/psychoacoustics/sound-quality-making-products-sound-better/sound-quality-testing/loudness>
- [13]:Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering: Acoustical topology optimization for Zwicker's loudness model – Application to noise barriers [online]. 2012, (Volumes 237–240) [cit. 2017-04-25]. ISSN 0045-7825. <http://doi.org/10.1016/j.cma.2012.05.004>.
- [14]:DIN 45631. In: Auditory.org [online]. AUDITORY Research in Auditory Perception, 2000 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://www.auditory.org/mhonarc/2000/msg00498.html>

- [15]:Sharpness and booming. Salford [online]. Manchester: University of Salford Manchester, ©2017 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.salford.ac.uk/computing-science-engineering/research/acoustics/psychoacoustics/sound-quality-making-products-sound-better/sound-quality-testing/sharpness-booming>
- [16]:Roughness - fluctuation strength. Salford [online]. Manchester: University of Salford Manchester, ©2017 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.salford.ac.uk/computing-science-engineering/research/acoustics/psychoacoustics/sound-quality-making-products-sound-better/sound-quality-testing/roughness-fluctuation-strength>
- [17]:DUISTERS, Ronnie. The modeling of auditory roughness for signals with temporally asymmetric envelopes [online]. Eindhoven, 2005 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://ronnieduisters.files.wordpress.com/2009/10/report.pdf>. Technische Universiteit Eindhoven.
- [18]:Psychoacoustic evaluation of a garden tractor noise. CIGR Journal [online]. 2015, 17(3), 11 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/3242/2199>
- [19]:Modelling the sensation of fluctuation strength. Proceedings of Meetings on Acoustics [online]. 2016, 28(1), 9 [cit. 2017-05-06]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1121/2.0000410>. Dostupné z: <http://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/2.0000410>
- [20]:Alarms and sirens. Psychics.org [online]. Londýn: Institute of Physics, ©2012 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.physics.org/featuredetail.asp?id=75>
- [21]:ITA-Toolbox. In: ITA-TOOLBOX [online]. Aachen: RWTH AACHEN University, 2016 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://www.ita-toolbox.org/download.php>
- [22]:Pwelch power correction factor. MathWorks [online]. Natick: MathWorks, 2010 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/matlabcentral/newsreader/view_thread/296527

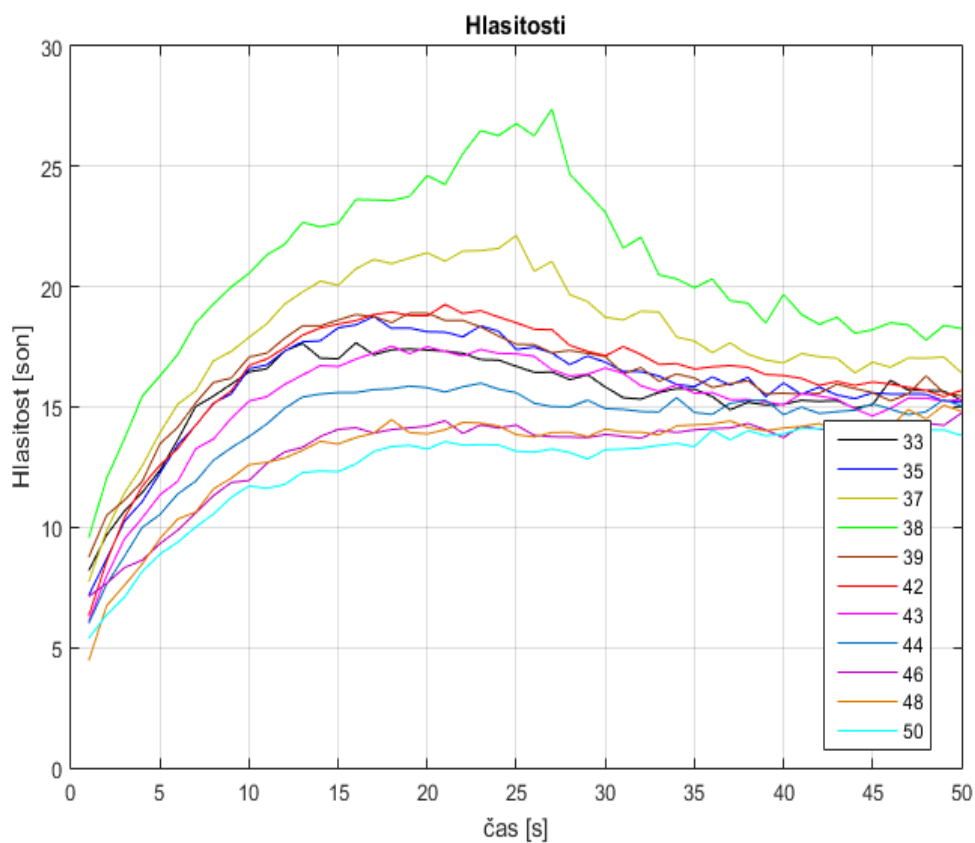
Skript pro hrubost byl tedy převzat z [21]. V souladu s licenční smlouvou udáván následující oznámení:

This product includes software developed by the Institute of Technical Acoustics (RWTH Aachen University).

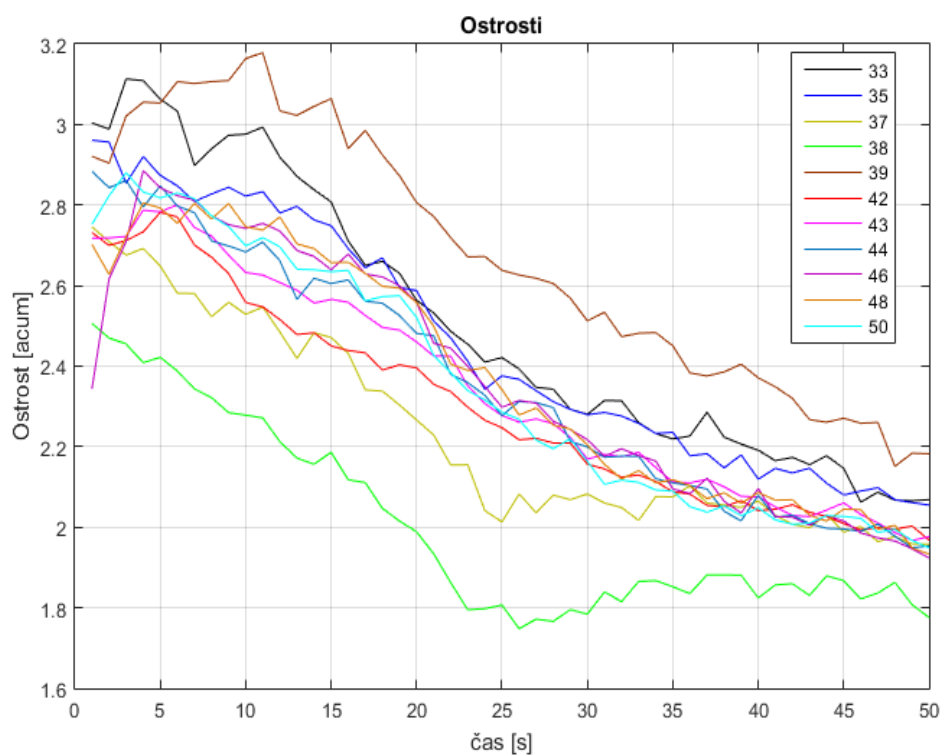
Licence je uložena ve složce Rougness_daniel, v textovém souboru license.txt. Zde je uvedeno požadované upozornění.

PŘÍLOHY

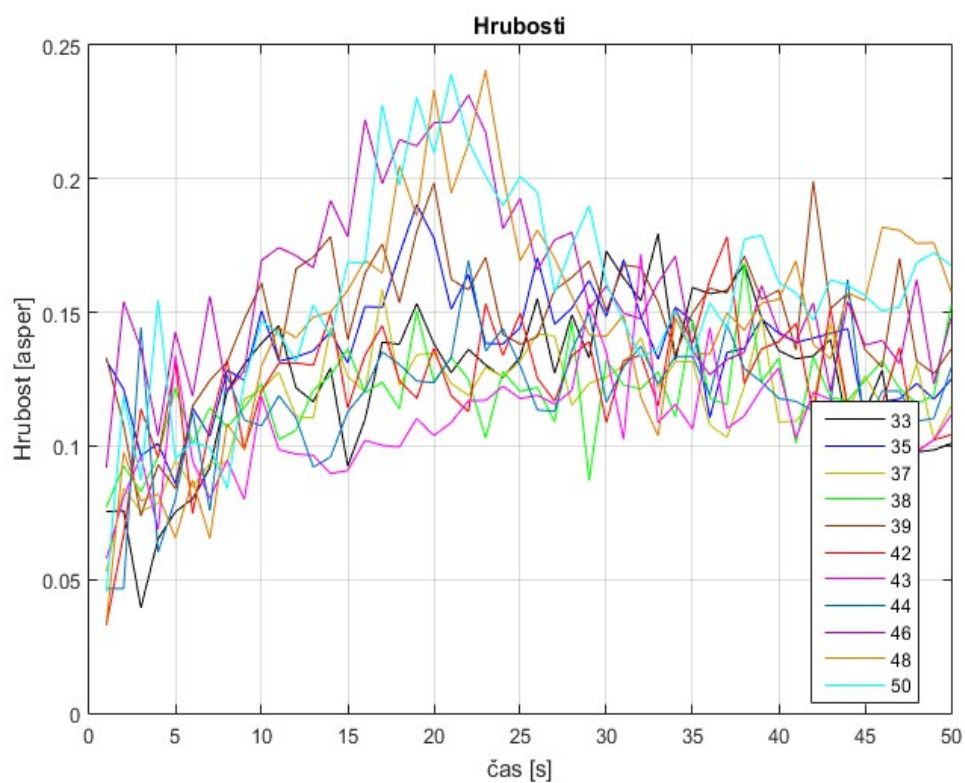
Skripty pro výpočet psychoakustických veličin jsou uloženy na přiloženém CD. Grafy psychoakustických veličin pro kapitolu 7.2.2.



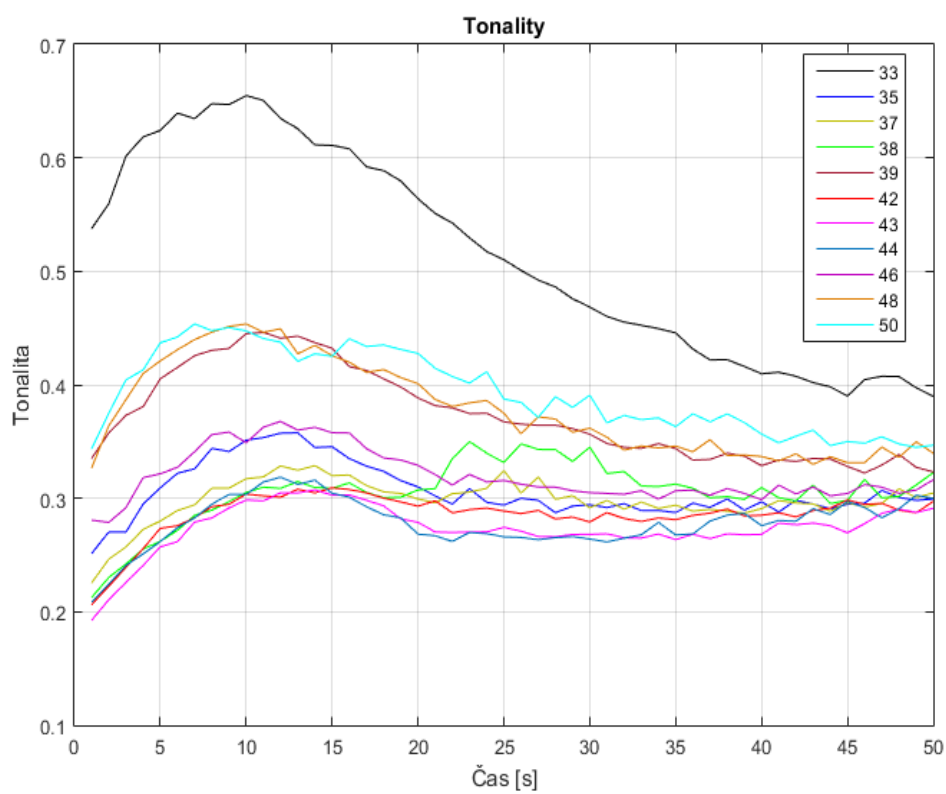
Obr 7.7: Hlasitost nezkrácených záznamů



Obr 7.8: Ostrost nezkrácených záznamů



Obr 7.9: Hrubost zkrácených záznamů



Obr 7.10: Tonalita zkrácených záznamů