



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## OBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ KVALITY ZVUKU POMOCÍ PSYCHOAKUSTICKÝCH METRIK

OBJECTIVE ASSESSMENT OF AUDIO QUALITY USING PSYCHOACOUSTIC METRICS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Michal Vajda**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**

**BRNO 2025**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Audio inženýrství**  
specializace Zvuková produkce a nahrávání  
Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Michal Vajda

**ID:** 200953

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2024/25

## NÁZEV TÉMATU:

### Objektivní hodnocení kvality zvuku pomocí psychoakustických metrik

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte a popište metody objektivního hodnocení kvality zvuku pomocí psychoakustických metrik, zejména hodnocení hlasitosti, ostrosti, síly kolísání, a drsnosti. V prostředí Matlab vytvořte funkce pro výpočet jednotlivých metrik a doplňte je uživatelským rozhraním pro snadné použití. Pro ověření metrik použijte databázi zvuků nebo vytvořte vlastní a výsledky porovnejte s výstupy ověřeného profesionálního software nebo funkcí Audio Toolboxu Matlabu.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ZWICKER, E. a FASTL, H. Psychoacoustics: facts and models. 2nd ed. Berlin: Springer, c1999. ISBN 3-540-65063-6.
- [2] MELKA, Alois. Základy experimentální psychoakustiky. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. ISBN 80-7331-043-0.

**Termín zadání:** 10.2.2025

**Termín odevzdání:** 27.5.2025

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

**doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá objektivním hodnocením kvality zvuku pomocí psychoakustických metrik. Zatímco fyzikální akustika se soustředí na měřitelné parametry zvuku, psychoakustika propojuje tyto parametry s vnímáním lidského sluchového aparátu. Práce představuje teoretický úvod do psychoakustických metrik, jako jsou hlasitost, ostrost, síla kolísání a drsnost, a dále rozebírá jejich význam v hodnocení kvality zvuku.

V praktické části byla provedena implementace výpočtu těchto metrik v prostředí Matlab, zahrnující vytvoření funkcí `mvjrFilters`, `mvjrLoudness`, `mvjrSharpness`, `mvjrFluctuation` a `mvjrRoughness`. Součástí práce je také návrh uživatelského rozhraní pro jednoduchý výpočet zmíněných metrik a funkce `mvjrMatlabCheck` pro porovnání výsledků s referenčními funkcemi Audio Toolbox Matlab. Výsledky byly získány na základě testovacích souborů a jsou prezentovány pomocí grafů a číselných hodnot. Závěr obsahuje zhodnocení výsledků a doporučení pro případnou revidaci a zpřesnění výpočtů. Práce tak přispívá k lepšímu porozumění a praktickému využití psychoakustických metrik při objektivním hodnocení kvality zvuku.

## **Klíčová slova**

Psychoakustika, objektivní hodnocení kvality zvuku, hlasitost, ostrost, síla kolísání, drsnost, psychoakustická metrika, Matlab, uživatelské rozhraní

# **Abstract**

This master thesis focuses on the objective evaluation of sound quality using psychoacoustic metrics. While physical acoustics concentrates on measurable sound parameters, psychoacoustics connects these parameters with human auditory perception. The thesis provides a theoretical introduction to psychoacoustic metrics such as loudness, sharpness, fluctuation strength, and roughness, and further discusses their significance in assessing sound quality.

In the practical part, the calculation of these metrics was implemented in the Matlab environment, including the creation of functions `mvjrFilters`, `mvjrLoudness`, `mvjrSharpness`, `mvjrFluctuation`, and `mvjrRoughness`. The work also includes the design of a user interface for the simple calculation of the mentioned metrics and the function `mvjrMatlabCheck` for comparing the results with the reference functions of the Matlab Audio Toolbox. The results were obtained based on test files and are presented using graphs and numerical values. The conclusion includes an evaluation of the results and recommendations for possible revision and refinement of the calculations. This work thus contributes to a better understanding and practical use of psychoacoustic metrics in the objective evaluation of sound quality.

# **Keywords**

Psychoacoustics, objective sound quality assessment, loudness, sharpness, fluctuation strength, roughness, psychoacoustic metric, Matlab, user interface

## **Bibliografická citace**

VAJDA, Michal. *Objektivní hodnocení kvality zvuku pomocí psychoakustických metrik*. Online, diplomová práce. Jiří SCHIMMEL (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/167247>. [cit. 2025-05-20].

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Bc. Michal Vajda
<b>VUT ID studenta:</b>	200953
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2024/25
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Objektivní hodnocení kvality zvuku pomocí psychoakustických metrik

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 27. května 2025

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za účinnou odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Poděkování také věnuji Robertu Polákovi za odbornou konzultaci.

V Brně dne: 27. května 2025

-----  
podpis autora

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
ÚVOD.....	11
<b>1. PSYCHOAKUSTIKA A OBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ KVALITY ZVUKU .....</b>	<b>13</b>
1.1 PŘEHLED METRIK A JEJICH ÚČEL.....	13
1.2 NORMY A STANDARDY.....	13
1.3 HLASITOST (LOUDNESS) .....	14
1.3.1 <i>Teorie a modely hlasitosti</i> .....	14
1.3.2 <i>Metody výpočtu hlasitosti</i> .....	14
1.4 OSTROST (SHARPNESS).....	15
1.4.1 <i>Teorie a definice ostrosti</i> .....	15
1.4.2 <i>Metody výpočtu ostrosti</i> .....	16
1.5 SÍLA KOLÍSÁNÍ (FLUCTUATION STRENGTH) .....	16
1.5.1 <i>Teorie a definice síly kolísání</i> .....	16
1.5.2 <i>Metody výpočtu síly kolísání</i> .....	16
1.6 DRSNOST (ROUGHNESS) .....	17
1.6.1 <i>Teorie a definice drsnosti</i> .....	17
1.6.2 <i>Metody výpočtu drsnosti</i> .....	18
1.7 SOUHRN METOD OBJEKTIVNÍHO HODNOCENÍ KVALITY ZVUKU .....	18
<b>2. OBECNÁ IMPLEMENTACE METOD V MATLAB .....</b>	<b>19</b>
2.1 IMPLEMENTACE VÝPOČTU HLASITOSTI .....	19
2.2 IMPLEMENTACE VÝPOČTU OSTROSTI .....	19
2.3 IMPLEMENTACE VÝPOČTU SÍLY KOLÍSÁNÍ .....	19
2.4 IMPLEMENTACE VÝPOČTU DRSNOSTI .....	20
<b>3. IMPLEMENTACE VÝPOČTU PSYCHOAKUSTICKÝCH METRIK .....</b>	<b>21</b>
3.1 REALIZACE FUNKCE PRO VÝPOČET HLASITOSTI .....	21
3.1.1 <i>Funkce mvjrFilters</i> .....	21
3.1.2 <i>Funkce mvjrLoudness</i> .....	25
3.2 REALIZACE FUNKCE PRO VÝPOČET OSTROSTI .....	35
3.2.1 <i>Funkce mvjrSharpness</i> .....	35
3.3 REALIZACE FUNKCE PRO VÝPOČET SÍLY KOLÍSÁNÍ.....	36
3.3.1 <i>Funkce mvjrFluctuation</i> .....	37
3.4 REALIZACE FUNKCE PRO VÝPOČET DRSNOSTI.....	38
3.4.1 <i>Funkce mvjrRoughness</i> .....	38
3.5 VÝSLEDKY IMPLEMENTACÍ VÝPOČTU .....	39
3.6 OVĚŘENÍ VÝSTUPŮ S AUDIO TOOLBOX MATLAB.....	49
3.6.1 <i>Funkce mvjrMatlabCheck</i> .....	49
3.7 UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ .....	50

<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>60</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>62</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1: Křivky stejné hlasitosti čistých tónů pro difuzní pole [17].....	14
1.2: Závislost ostrosti pásmového šumu na kmitočtu [17] .....	15
1.3: Váhová funkce pro výpočet ostrosti [17].....	16
1.4: Drsnost 100% amplitudově modulovaných tónů dané střední frekvence v závislosti na frekvenci modulace [14].....	17
3.1: Struktura filtru druhého řádu [12].....	23
3.2: Struktura dolnoproustného filtru prvního řádu [12] .....	23
3.3: Část blokového schématu metody výpočtu celkové hlasitosti [12].....	29
3.4: Výpočet hodnot hlasitosti a k nim příslušící vzdálenosti.....	32
3.5: Časové vážení celkové hlasitosti [12] .....	33
3.6: Specifická hlasitost pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1, mvjrLoudness .....	40
3.7: Specifická hlasitost stacionárního zvukové signálu, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), mvjrLoudness .....	41
3.8: Hlasitost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness .....	42
3.9: Ostrost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness .....	42
3.10: Síla kolísání časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness.....	43
3.11: Drsnost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness .....	43
3.12: Specifická hlasitost pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1, mvjrMatlabCheck .....	44
3.13: Specifická hlasitost stacionárního zvukové signálu, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), mvjrMatlabCheck .....	45
3.14: Hlasitost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck .....	46
3.15: Ostrost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck .....	46
3.16: Síla kolísání časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck.....	47
3.17: Drsnost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck .....	47
3.18: Ruční zápis hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech.....	51
3.19: Volba vstupních parametrů.....	52
3.20: Výpis výsledků psychoakustických metrik.....	53

## SEZNAM TABULEK

3.1: Hlasitost a ostrost pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1, mvjrLoudness/mvjrSharpness.....	40
3.2: Hlasitost a ostrost stacionárního zvukové signálu, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), volné pole, mvjrLoudness/mvjrSharpness.....	41
3.3: Hlasitost $N_{\max}$ a $N_5$ časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness .....	41
3.4: Hlasitost a ostrost pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1, mvjrMatlabCheck .....	44
3.5: Hlasitost a ostrost stacionárního zvukové signálu, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck .....	44
3.6: Hlasitost $N_{\max}$ a $N_5$ časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck .....	45
3.7 Porovnání výsledků z uváděných funkcí pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1 .....	48
3.8 Porovnání výsledků z uváděných funkcí pro stacionární zvukový signál, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), volné pole .....	48
3.9 Porovnání výsledků z uváděných funkcí pro časově proměnný zvukový signál, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole .....	48

# ÚVOD

Psychoakustika je vědecký obor, který zkoumá, jak lidé vnímají zvuk a jeho vlastnosti. Zatímco fyzikální akustika se zaměřuje na měřitelné vlastnosti zvukových vln, jako jsou intenzita, frekvence a spektrum, psychoakustika zkoumá, jak tyto vlastnosti vnímá lidský sluchový aparát.

Cílem psychoakustiky je propojení objektivních fyzikálních parametrů zvuku s jejich subjektivním vnímáním. Díky tomu hraje klíčovou roli při vývoji technologií, které mají za úkol optimalizovat kvalitu zvuku, jako jsou audiozařízení, akustické prostory nebo algoritmy pro zpracování zvuku.

Například parametry jako hlasitost (Loudness) nebo drsnost (Roughness) přímo souvisí s vnímáním intenzity a nerovnoměrností zvuku, což je důležité například při hodnocení komfortu v automobilech či při vývoji reproduktorů.

Počátky psychoakustiky sahají do 19. století, kdy vědci jako Ernst Weber a Gustav Fechner začali studovat vztah mezi fyzikálními podněty a subjektivním vnímáním. Jejich práce vedla k formulaci a vydání Weber-Fechnerova zákona, který popisuje logaritmický vztah mezi intenzitou podnětu a jeho vnímáním.

Na počátku 20. století přispěl Hermann von Helmholtz k pochopení mechanismů slyšení díky své teorii rezonance basilární membrány v hlemýždi. Významný pokrok nastal ve 20. století, kdy byly vyvinuty první psychoakustické modely, které umožňovaly kvantifikaci subjektivních vlastností zvuku, jako je Zwickerův model hlasitosti aj.

Moderní psychoakustika zahrnuje i pokročilé výpočtové modely a algoritmy, které využívají vysoký výpočetní výkon počítačů. Díky tomu se metriky, jako jsou hlasitost (Loudness), ostrost (Sharpness), síla kolísání (Fluctuation Strength) a drsnost (Roughness) staly běžnou součástí hodnocení zvuku v průmyslu.

Tradiční subjektivní poslechové testy jsou důležitým nástrojem pro hodnocení zvuku, ale jejich provedení je časově náročné a výsledky mohou být ovlivněny variabilitou mezi jednotlivými posluchači. Proto byly vyvinuty objektivní metriky, které umožňují reprodukovatelné a standardizované hodnocení.

Objektivní metody měření kvality zvuku, založené na psychoakustických metrikách, tento problém řeší. Poskytují konzistentní a reprodukovatelné výsledky, které lze snadno integrovat do procesů vývoje produktů nebo analýzy zvuku. Například v automobilovém průmyslu umožňují tyto metody hodnotit nepříjemné zvuky a optimalizovat akustické vlastnosti vozidel.

Tato diplomová práce zahrnuje teoretický úvod do psychoakustiky a objektivního hodnocení kvality zvuku pro pochopení rozebíraného tématu. Dále jsou zde teoreticky popsány implementace daných metod ve výpočetním prostředí Matlab. Vlastní implementace psychoakustických metrik v interaktivním vývojovém prostředí Matlab popisuje vytvořené funkce `mvjrFilters`, `mvjrLoudness`, `mvjrSharpness`, `mvjrFluctuation` a `mvjrRoughness`, ve kterých jsou provedeny výpočty jednotlivých metrik. Tyto výpočty

byly realizovány s pomocí přiložené literatury. Součástí je také uživatelské rozhraní sloužící k jednoduchému výpočtu uváděných psychoakustických metrik. Byl vytvořen popis postupu použití této aplikace, který je založený na výpočtu metrik testovacích souborů poskytnutých v příloze této diplomové práce. Pro ověření uváděných metrik byla použita databáze zvuků a číselné hodnoty hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech a výsledky byly porovnány s výstupem funkcí Audio Toolbox Matlab. K tomuto postupu slouží vlastní funkce mvjrMatlabCheck. Patříčnými kroky lze ověření zapojit do operací celého systému.

Vytvořením vlastních funkcí pro stanovení jednotlivých metrik bylo možné dosáhnout výsledků uvedených implementací. Pojednání o výsledcích na základě vstupních dat zobrazuje a srovnává číselné hodnoty společně s grafy související s výpočty daných psychoakustických metrik. Vyhodnocení získaných závěrů obsahuje porovnání dosažených výsledků a udává doporučení pro případnou revidaci ke zpřesnění výpočtů.

# 1. PSYCHOAKUSTIKA A OBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ KVALITY ZVUKU

## 1.1 Přehled metrik a jejich účel

Psychoakustické metriky představují nástroje pro kvantifikaci různých aspektů subjektivního vnímání zvuku. Mezi nejvýznamnější patří:

- Hlasitost (Loudness): Kvantifikace subjektivní intenzity zvuku, která zohledňuje frekvenční citlivost lidského ucha.
- Ostrost (Sharpness): Vnímání vysokofrekvenčních složek zvuku.
- Síla kolísání (Fluctuation Strength): Míra vnímání pomalé modulace amplitudy zvuku.
- Drsnost (Roughness): Míra vnímání rychlé modulace amplitudy nebo fluktuací zvuku.

Každá z těchto metrik odpovídá určitému modelu lidského vnímání, který je ověřen studii. Tyto metriky umožňují objektivní hodnocení zvuku v různých aplikacích.

## 1.2 Normy a standardy

Pro implementaci psychoakustických metrik jsou klíčové následující normy:

- ČSN ISO 532-1: Akustika – Metody výpočtu hlasitosti – Část 1: Zwickerova metoda.
- ČSN ISO 532-2: Akustika – Metody výpočtu hlasitosti – Část 2: Moore-Glasbergova metoda
- DIN 45631: Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Zwicker-Verfahren (stanovuje metodu výpočtu hlasitosti)
- DIN 45692: Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe (stanovuje metodu výpočtu ostrosti)
- DIN 45693: Berechnung der Schwankungsstärke aus dem Geräuschspektrum (stanovuje metodu výpočtu síly kolísání)
- DIN 45694: Berechnung der Rauigkeit aus dem Geräuschspektrum (stanovuje metodu výpočtu drsnosti)

Detailní popis postupů a vzorců je uveden v těchto normách, které je možné získat prostřednictvím odborných knihoven nebo akreditovaných institucí.

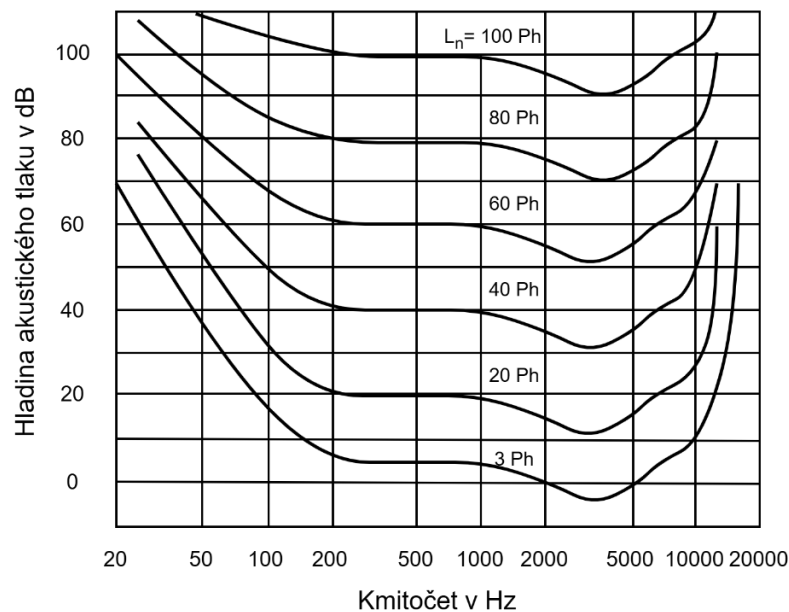
## 1.3 Hlasitost (Loudness)

### 1.3.1 Teorie a modely hlasitosti

Hlasitost je definována jako subjektivní vnímání intenzity zvuku lidským sluchovým aparátem. Tento vjem není přímo úměrný fyzikální intenzitě zvuku, ale závisí na frekvenci, amplitudě a dalších faktorech. Lidské ucho je nejcitlivější na frekvence mezi 2 až 5 kHz, což je zohledněno v modelech hlasitosti. Hlasitost se měří v jednotkách son, přičemž hodnota 1 son odpovídá hlasitosti čistého tónu o frekvenci 1 kHz a intenzitě 40 dB (SPL). Zvýšení intenzity zvuku o 10 dB je vnímáno přibližně jako dvojnásobné zvýšení hlasitosti. [17]

Moderní modely hlasitosti zahrnují:

- Zwickerův model: Založen na kritických pásmech a modelování excitace basilární membrány.
- Mooreův model: Také založen na kritických pásmech a modelování excitace basilární membrány. Používá však jiné definice kritických pásem a excitace.



Obrázek 1.1: Křivky stejné hlasitosti čistých tónů pro difuzní pole [17]

### 1.3.2 Metody výpočtu hlasitosti

Výpočet hlasitosti se provádí na základě frekvenční analýzy a kritických pásem. Zwickerův model lze zjednodušeně popsat následujícím vztahem [17]

$$N = \int_{z=0}^{24 \text{ bark}} N'(z) dz, \quad (1.1)$$

kde  $N$  je celková hlasitost v sonech,  $z$  je kritické pásmo v jednotkách bark a  $N'(z)$  je specifická hlasitost v sonech na bark. Bark je psychoakustická jednotka používaná k popisu kritických pásem slyšení v lidském uchu.

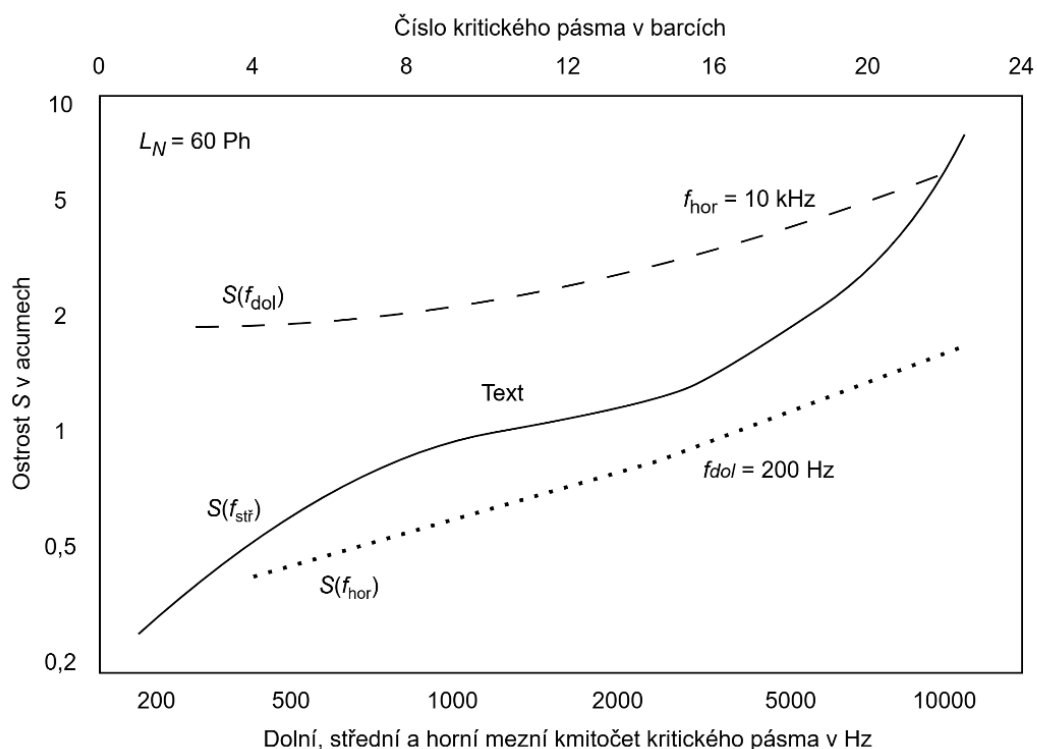
Specifická hlasitost je vypočítána pomocí analýzy zvukového spektra a zahrnuje korekce pro frekvenční citlivost sluchu. Kompletní popis algoritmu je uveden v normě [12].

## 1.4 Ostrost (Sharpness)

### 1.4.1 Teorie a definice ostrosti

Ostrost je psychoakustická metrika, která kvantifikuje vnímání vysokofrekvenčních složek zvuku. Zvuky s dominantním zastoupením vyšších frekvencí (například píšťaly) jsou subjektivně vnímány jako „ostřejší“, než zvuky s rovnoměrnějším rozložením energie.

Ostrost se měří v jednotkách acum, kde 1 acum odpovídá zvuku o frekvenci 1 kHz a šířce pásma 1 bark, při intenzitě 60 dB (SPL). Zvýšená ostrost může být u některých zvuků považována za nepříjemnou, například při hodnocení hlučnosti strojů nebo šumu v interiérech automobilů. [17]



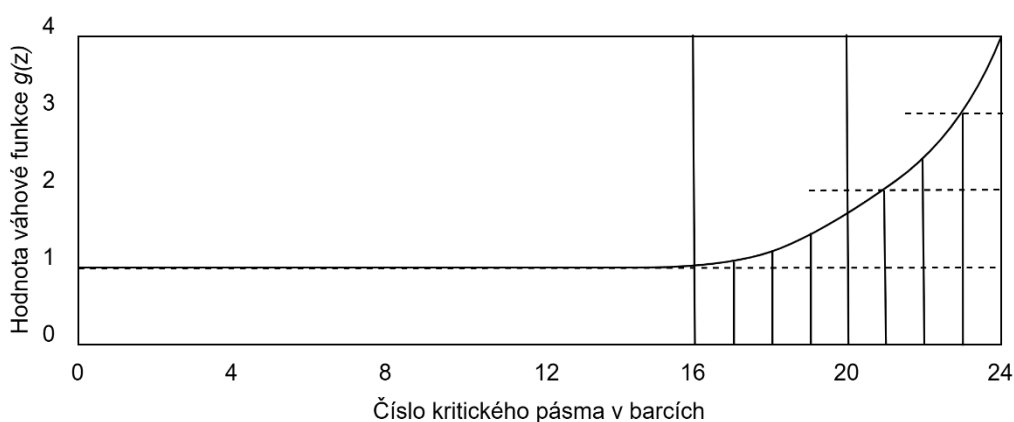
Obrázek 1.2: Závislost ostrosti pásmového šumu na kmitočtu [17]

### 1.4.2 Metody výpočtu ostrosti

Výpočet ostrosti zahrnuje analýzu specifické hlasitosti a její vážení podle funkce vážení ostrosti  $g(z)$ , kde  $z$  je kritické pásmo v barcích [17]

$$S = 0,11 \frac{\int_{z=0}^{24\text{Bark}} N' g(z) z dz}{\int_{z=0}^{24\text{Bark}} N' dz}, \quad (1.2)$$

dále  $S$  je celková ostrost v acumech,  $N'(z)$  je specifická hlasitost v sonech na bark a  $g(z)$  je váhová funkce, která zdůrazňuje vyšší frekvence. Průběh váhové funkce je znázorněn na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Váhová funkce pro výpočet ostrosti [17]

## 1.5 Síla kolísání (Fluctuation strength)

### 1.5.1 Teorie a definice síly kolísání

Síla kolísání popisuje vnímání periodických změn v intenzitě zvuku. Tento efekt je zvláště významný při posuzování šumu nebo zvuků s pravidelnými fluktuacemi, jako jsou např. šumové signály. Lidský sluch je schopen vnímat změny v intenzitě zvuku při frekvencích až do několika hertzů. Kolísání se obvykle vnímá jako pulzování nebo kmitání zvuku.

Síla kolísání se měří v jednotkách son a je závislá na frekvenčním rozdělení signálu a jeho časových změnách. Tento jev je kvantifikován podle velikosti amplitudových změn v signálu a jeho periodicitě. [17]

### 1.5.2 Metody výpočtu síly kolísání

Výpočet síly kolísání zahrnuje analýzu časových změn v amplitudě signálu, což se provádí pomocí několika metod. Jedním z přístupů je metoda založená na výpočtu

modulace signálu. Síla kolísání může být definována jako součet amplitudových modulací v nízkých frekvenčních pásmech, kde je lidský sluch nejcitlivější.

Matematicky lze sílu kolísání vyjádřit jako [17]

$$F = \frac{0,032 \int_{z=0}^{24\text{Bark}} \log \frac{N'_{\max}}{N'_{\min}} dz}{\frac{T}{0,25} + \frac{0,25}{T}}, \quad (1.3)$$

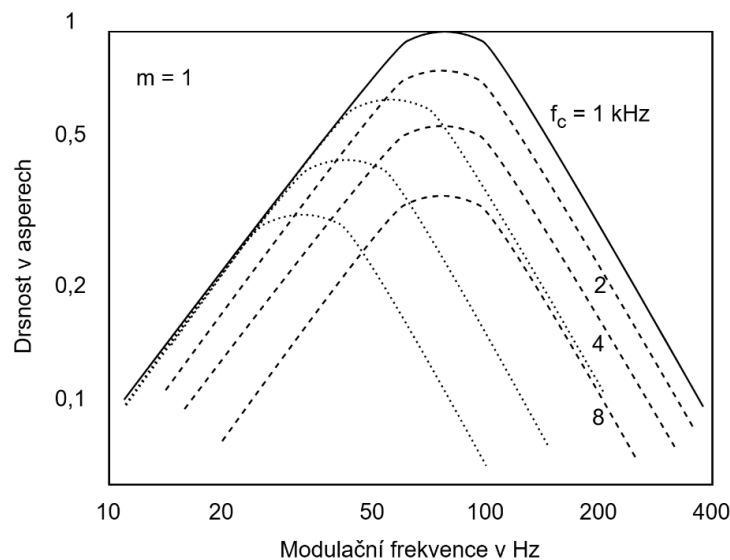
kde  $F$  je síla kolísání ve vacilech,  $N'_{\max}$  je maximální dílčí hlasitost v přípustném kritickém pásmu v sonech na bark,  $N'_{\min}$  je minimální dílčí hlasitost v přípustném kritickém pásmu v sonech na bark a  $T = 1/f_{\text{mod}}$  je perioda kolísání v sekundách.

## 1.6 Drsnost (Roughness)

### 1.6.1 Teorie a definice drsnosti

Drsnost je psychoakustický jev, který se vztahuje k vnímání jemné změny v intenzitě zvuku. Při vyšší drsnosti se zvuk vnímá jako „hrubý“ nebo „syrový“, zatímco při nižší drsnosti je zvuk vnímán jako „hladší“. Tento efekt je důležitý při hodnocení agresivních zvuků, jako jsou zvuky motorů nebo šum.

Drsnost je specifická pro zvuky, které obsahují rychlé změny v amplitudě nebo kmitání. Zvuk se může jevit drsný při vysoké frekvenci kmitání (typicky mezi 30 a 500 Hz) dle obrázku 1.4. Při vyšší drsnosti může být vnímání nepříjemné a způsobovat únavu. [17]



Obrázek 1.4: Drsnost 100% amplitudově modulovaných tónů dané střední frekvence v závislosti na frekvenci modulace [14]

### 1.6.2 Metody výpočtu drsnosti

Výpočet drsnosti zahrnuje analýzu kmitání nebo modulace v nízkofrekvenčním pásmu, kde je lidský sluch citlivý na rychlé změny amplitudy. Drsnost lze vyjádřit jako součet výkyvů v amplitudě signálu, které probíhají ve stanoveném časovém intervalu.

Drsnost lze modelovat podle následujícího vzorce [17]

$$R = 0,3f_{\text{mod}} \int_{z=0}^{24\text{Bark}} \Delta L(z) dz, \quad (1.4)$$

kde  $R$  je drsnost v asperech,  $f_{\text{mod}}$  je modulační kmitočet v kHz a  $\Delta L(z)$  je hloubka časového maskování v  $z$ -tém barkovém pásmu.

## 1.7 Souhrn metod objektivního hodnocení kvality zvuku

V rámci objektivního hodnocení kvality zvuku pomocí psychoakustických metrik bylo v teoretické části rozebráno několik metod, které slouží k posuzování různých aspektů vnímání zvuku. Mezi klíčové metriky patří hlasitost, ostrost, síla kolísání a drsnost. Každá z těchto metrik vychází z konkrétních psychoakustických jevů a vztahuje se k odlišným charakteristikám vnímání zvuku, které jsou důležité pro aplikace v oblasti akustiky, audio inženýrství a hodnocení kvality zvuku.

- Hlasitost se zaměřuje na vnímání intenzity zvuku a je jednou z nejzákladnějších metrik. Je definována jako subjektivní vjem, který závisí na amplitudě zvuku a frekvenčním spektru. Metody výpočtu hlasitosti se často opírají o modely jako je Zwickerův nebo Mooreův.
- Ostrost se vztahuje k vnímání vysokých frekvencí a ostrých zvukových jevů. Tato metrika je užitečná pro analýzu zvuků s vysokým podílem vysokofrekvenčních komponent.
- Síla kolísání popisuje vnímání periodických změn v intenzitě zvuku. Tato metrika se používá především k hodnocení zvuků s pravidelnými fluktuacemi a je významná při analýze šumu a dalších modulovaných signálů.
- Drsnost se vztahuje k jemným změnám v amplitudě a je používána pro posuzování hrubosti zvuku, např. motorových nebo mechanických zvuků.

## 2. OBECNÁ IMPLEMENTACE METOD V MATLAB

### 2.1 Implementace výpočtu hlasitosti

Výpočet hlasitosti [3] v prostředí Matlab vyžaduje zpracování zvukového signálu v několika na sebe navazujících krocích, které odpovídají běžně užívaným modelům, jako je model Zwickerův nebo Mooreův. Nejprve je nutné zvukový signál načíst a připravit pro další zpracování. K tomu je využívána funkce `audioread`, která umožňuje import zvukového souboru a jeho převedení na vektor amplitud. Pokud je zvuk stereofonní, je nutné jej převést na monofonní signál. Toho je dosaženo výpočtem průměru hodnot z levého a pravého kanálu.

Následně je signál převeden z časové oblasti do frekvenční oblasti pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT), která poskytne spektrum signálu. Získané spektrum je rozděleno do tzv. kritických pásem, která odpovídají frekvenčním pásmům lidského sluchu. Pro každé kritické pásmo je vypočítávána spektrální hustota výkonu, která se normalizuje na hustotu odpovídající specifické hlasitosti v sonech na bark.

Specifická hlasitost je získávána aplikací vztahů uvedených v normě ČSN ISO 532-1 [12]. Tyto vztahy definují závislost vnímané hlasitosti na frekvenci a intenzitě zvuku. Pro každý bark je určen příspěvek ke specifické hlasitosti a následně jsou všechny příspěvky sčítány, čímž je určena celková hlasitost. Konečná hodnota hlasitosti je obvykle vyjádřena v jednotkách son.

### 2.2 Implementace výpočtu ostrosti

Výpočet ostrosti [5] je v prostředí Matlab realizován pomocí analýzy frekvenčního spektra a stanovení váhového příspěvku vyšších frekvencí. Stejně jako u hlasitosti je nutné nejprve importovat zvukový signál a provést jeho převod na monofonní formát. Poté je pomocí FFT provedena frekvenční analýza signálu, přičemž signál je rozdělen do kritických pásem.

Na rozdíl od výpočtu hlasitosti je u ostrosti zohledněn větší význam frekvencí nad 1500 Hz. Proto se používá váhovací funkce, která zvýrazňuje příspěvky vyšších frekvencí. Každému pásmu je přiřazena váha, která je určena na základě vztahů popsanych v DIN 45692 a ČSN ISO 532-1 [12]. Zvážené příspěvky jednotlivých frekvenčních pásem jsou následně sčítány a výsledkem je hodnota ostrosti v jednotkách acum.

### 2.3 Implementace výpočtu síly kolísání

Síla kolísání [2] je používána pro vyjádření vnímaných amplitudových změn ve zvukovém signálu. Tyto změny jsou charakteristické pro signály, které mají proměnlivou hlasitost v čase, například vibrato. Výpočet síly kolísání začíná načtením a přípravou

signálu, který je převeden do monofonní podoby. Následuje klíčová část analýzy, a to detekce amplitudových modulací. Pro tento účel je aplikována filtrace dolní propustí, která extrahuje pomalé změny amplitudy signálu. Typická frekvence kolísání vnímaná lidským uchem je kolem 4 Hz, takže filtrace je nastavena tak, aby extrahovala složky signálu v tomto rozsahu.

Dále je vypočítáno spektrum amplitudových změn. Tento krok je proveden Fourierovou transformací, která odhalí periodické kolísání v signálu. Výsledné složky jsou váženy podle příslušného modelu vnímání kolísání. Síla kolísání je obvykle vyjádřena jako normalizovaná hodnota na škále od 0 do 1.

## 2.4 Implementace výpočtu drsnosti

Drsnost [4] je vnímána jako "chvění" nebo "hrubost" zvuku, které vzniká v důsledku rychlých amplitudových změn, obvykle kolem 70 Hz. Postup výpočtu v Matlab je velmi podobný výpočtu kolísání, ale v tomto případě je zohledněna vyšší frekvence změn.

Po importu a přípravě zvukového signálu je provedena Fourierova analýza, která rozloží signál do frekvenčních složek. Na rozdíl od kolísání se zde nefiltrují pouze nízkofrekvenční složky, ale jsou analyzovány všechny frekvence, které mohou přispět k vnímání drsnosti. Hlavní přínos mají frekvenční rozdíly mezi sousedními harmonickými složkami, protože právě jejich interakce způsobuje vnímání drsnosti.

Hodnota drsnosti je určena jako součet amplitudových příspěvků v pásmech, které se navzájem ovlivňují. Tato hodnota je obvykle bezrozměrná a odpovídá úrovni drsnosti vnímané člověkem.

## 3. IMPLEMENTACE VÝPOČTU PSYCHOAKUSTICKÝCH METRIK

### 3.1 Realizace funkce pro výpočet hlasitosti

Vstupem pro výpočet hlasitosti je proměnná *mvjrTOL* neboli hladina akustického tlaku v třetinooktávových pásmech uváděná v decibelech. Tyto hodnoty je možné získat hned několika postupy. Výsledné uživatelské rozhraní popsané v kapitole 3.7 uvažuje se dvěma možnostmi. Buďto jsou hladiny akustického tlaku v třetinooktávových pásmech již známy a může být těchto 28 hodnot, vztahujících se k počtu frekvenčních pásem, zapsáno do připraveného pole, nebo je možné tyto hodnoty získat ze zvukového souboru. Pro práci se zvukovým souborem, respektive pro získání hodnot hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech, byla vytvořena vlastní funkce *mvjrFilters* popsána v kapitole 3.1.1. Pro výpočet hlasitosti je v prostředí Matlab vytvořena funkce s názvem *mvjrLoudness* popsána v kapitole 3.1.2.

#### 3.1.1 Funkce *mvjrFilters*

Tato kapitola diplomové práce vychází z postupů popsanych v České technické normě ČSN ISO 532-1 [12], odkazujících na práci se zvukovým souborem. Jinými slovy, pokud je načtený zvukový soubor, je nutné ho zpracovat a provést úkony vedoucí k získání hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech. Pro tyto účely byla vytvořena vlastní funkce *mvjrFilters*, která obsahuje definované konstanty a matematické operace spojené se zvukovým souborem.

Celková implementace vyžaduje signály se vzorkovacím kmitočtem  $f_s = 48$  kHz. Testovací signály, k nalezení v příloze A této diplomové práce využívané pro výpočet hlasitosti a dalších psychoakustických metrik zde uváděných, mají právě takový vzorkovací kmitočet. Dále je nutné znát skutečnost, že v případě šestnáctibitového celočíselného formátu musí být uveden vhodný *kalibrační soubor*, k nalezení v příloze A, a k němu odpovídající *kalibrační hodnota* uvedena v názvu kalibračního souboru. Také je třeba specifikovat typ zvukového pole (volné – Free nebo difúzní – Diffuse) a metodu (stacionární zvuk – Stationary nebo časově proměnný zvuk – Time varying).

Hladiny akustického tlaku v jednotlivých třetinooktávových pásmech jsou stanoveny prostřednictvím třetinooktávových filtrů. Tyto filtry mají střední frekvence  $f_T$  pokrývající pásmo od 25 Hz do 12,5 kHz. Za účelem snížení nejistoty při výpočtu hlasitosti jsou v normě ČSN ISO 532-1 [12] uvedeny odpovídající koeficienty filtrů (viz tabulka A.2). Použité třetinooktávové pásmové filtry jsou realizovány jako Čebyševovy filtry 6. řádu [7], přičemž jejich struktura sestává ze tří sekcí 2. řádu. Filtry jsou navrženy tak, aby zajišťovaly útlum 20 dB na středních frekvencích sousedních pásem, s výjimkou pásma 12,5 kHz, kde je bráno v úvahu pouze přilehlé nižší pásmo.

Ve vlastní funkci *mvjrFilters* byl tedy nejprve připojen k testovanému zvukovému signálu kalibrační soubor a kalibrační hodnota. Pomocí efektivní hodnoty kalibračního souboru  $S_{ef}$  a kalibrační hodnoty *calibrationNumber* je vypočítán konverzní koeficient  $b$  v Pascalech pro přepočítání digitalizovaného signálu na akustický tlak v pascálech pomocí rovnice [8]

$$b = \frac{p_0 \cdot 10^{\frac{\text{calibrationNumber}}{20}}}{S_{ef}}, \quad (3.1)$$

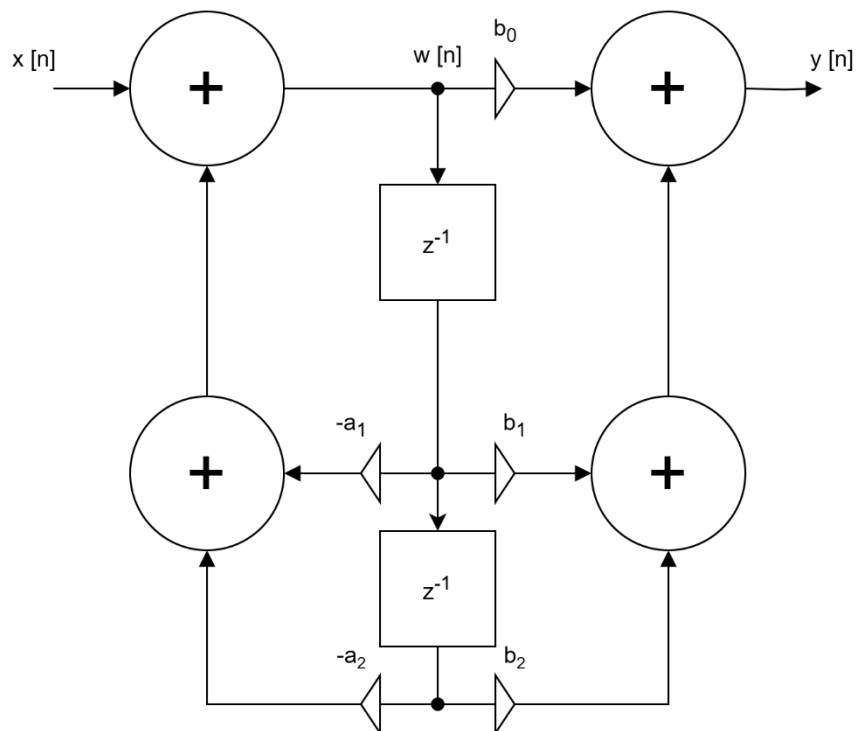
kde  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa je referenční hodnota. Následně byl daný zvukový soubor vynásoben konverzním koeficientem  $b$  a zkrácený o délku 0,2 sekund viz výpis kódu 3.1.

Výpis kódu 3.1: Úprava zvukového souboru pomocí kalibračního signálu

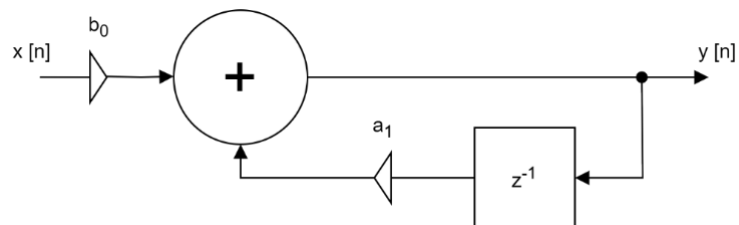
```
Sef = rms(calibrationAudio);
b = ((2*10^(-5))*(10^(calibrationNumber/20)))/Sef;
audio = audio .* b;
```

Filtrování signálu bylo zahájeno definováním referenční tabulky, složené z referenčních koeficientů třetinooktávových filtrů z tabulky A.1 technické normy [12], označené jako *br* a *ar* ve vlastním kódu. Výčet tabulek A.2 dané technické normy je zapsán do proměnných *ad* a *filterGain*. Hodnoty z tabulky *filterGain* určují zisk pro jednotlivá třetinooktávová pásma.

Nově vzniklá proměnná ve funkci *mvjrFilters* filtrovaného zvukového souboru s názvem *filteredAudio* byla vypočtena s použitím tří sekcí filtrů druhého řádu viz obrázek 3.1 dle doporučení ČSN ISO 532-1 [12]. Tedy vstupem do prvního filtru (Matlab funkce s názvem *filter* [1]) je daný zvukový soubor a výstupem z prvního filtru se stává jedenkrát filtrovaný zvukový soubor. Vstupem do druhého filtru je jedenkrát filtrovaný zvukový soubor a výstupem se stává celkem dvakrát filtrovaný soubor. Obdobně platí pro třetí filtr. Závěrečný výstup byl násobený činitelem zisku *filterGain*. Výstupní signál řady filtrů *filteredAudio* byl následně umocněn na druhou. Pro časově proměnné zvuky byl signál vyhlazen dolní propustí třetího řádu. Dolnoproústné filtry jsou sestaveny pomocí tří stejných dolnoproústných filtrů prvního řádu viz obrázek 3.2, a to zapojené v sérii. Tyto postupy vycházejí z popisu příslušné technické normy [12].



Obrázek 3.1: Struktura filtru druhého řádu [12]



Obrázek 3.2: Struktura dolnoproústného filtru prvního řádu [12]

Výstup z dolnoproústného filtru je počítán s pomocí rekurzivní rovnice [12]

$$y[n] = b_0 x[n] + a_1 y[n - 1], \quad (3.2)$$

$$b_0 = 1 - \exp\left(-\frac{1}{f_s \tau}\right), \quad (3.3)$$

$$a_1 = \exp\left(-\frac{1}{f_s \tau}\right), \quad (3.4)$$

kde kmitočtově závislá časová konstanta  $\tau$  v sekundách je počítána pro střední frekvence  $f_T \leq 1$  kHz dle [12]

$$\tau = \frac{2}{3} \frac{1}{f_T} \quad (3.5)$$

a pro  $f_T > 1$  kHz [12]

$$\tau = \frac{2}{3} \frac{1}{1 \text{ kHz}} = \frac{2}{3} \text{ ms} . \quad (3.6)$$

Tento výpočet ve vlastní funkci definovaný jako *A1* a *B0*, týkající se metody pro časově proměnné zvuky, utváří tzv. vyhlazený zvukový soubor *smoothedAudio*, kdy je tentokrát za vstup považován signál *filteredAudio* a pomocí Matlab funkce *filter* [1] je zopakovaný postup popsany výše v textu.

U tzv. vyhlazeného zvukového souboru *smoothedAudio* platí, že při zvolení metody pro stacionární zvuky je třeba přeskočit první 0,2 sekundy signálu, definováno jako *numSkip* ve funkci *mvjrFilters* a určené technickou normou [12]. Výpočet *smoothedAudio* pro metodu časově proměnných zvuků je zobrazen ve výpisu kódu 3.2.

Výpis kódu 3.2: Výpočet tzv. vyhlazeného zvukového souboru

```
for i = 1:28
    if centerFrequency(i) <= 1000
        Tau = 2/(3*centerFrequency(i));
    else
        Tau = 2/(3*1000.);
    end

    % druhé filtrování časově proměnného signálu
    A1 = exp(-1 ./ (fs * Tau));
    B0 = 1 - A1;
    smoothedAudio(:,i) = filter(B0,A1,...
        filter(B0,A1,...
            filter(B0,A1,filteredAudio(:,i))));
end
```

Funkce *decimate* [13], zakomponovaná do následujících řešení, slouží k redukování vzorkovací frekvence signálu tak, aby při snížení vzorkovací frekvence nedocházelo k aliasingu, což je jev, který nastává při nedostatečném vzorkování spojitého signálu.

Hledaná hladina akustického tlaku v třetinooktávových pásmech definovaná jako *mvjrTOL* je vypočítána za pomoci doposud získaných a určených veličin. Do rovnice vstupuje průměrná hodnota daného signálu, ke které je přičteno velmi malé číslo *TINY\_VALUE* o velikosti  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> pro zajištění tzv. numerické stability, přesněji zabraňuje výpočtu  $\log_{10}(0)$ , a referenční hodnota *I\_REF* o velikosti  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>, kde [11]

$$mvjrTOL = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{průměrná hodnota signálu} + \text{TINY\_VALUE}}{I\_REF} \right). \quad (3.7)$$

Výstupem funkce *mvjrFilters* jsou hodnoty hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech, jejichž výsledný výpočet je zobrazený ve výpisu kódu 3.3.

Výpis kódu 3.3: Výpočet hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech

```
for i = 1:28
    smoothedAudioDecimated = decimate(smoothedAudio(:,i),...
        DecFactorLevel/6,12);
    smoothedAudioDecimated = decimate(smoothedAudioDecimated,...
        DecFactorLevel/4,12);
    mvjrTOL(:,i) = real(10*log10((smoothedAudioDecimated+...
        TINY_VALUE)/I_REF));
end
```

### 3.1.2 Funkce *mvjrLoudness*

Na začátku funkce *mvjrLoudness* je deklarováno, kolik má tato funkce vstupů a výstupů, společně s jejich názvy. Vstupem této funkce jsou konkrétně *inputType* (typ vstupních dat), *audio* (zvukový soubor), *fs* (vzorkovací frekvence), *mvjrTOL* (hladina akustického tlaku v třetinooktávových pásmech), *method* (volba metody) a *field* (volba zvukového pole). Za výstupy funkce byly zvoleny konkrétně *loudnessValue1* (dále popsáno v kapitole 3.5), *loudnessValue2* (dále popsáno v kapitole 3.5), *spec\_n* (součet specifické hlasitosti) a *totalLoudness* (dále popsáno v kapitole 3.5).

V následující části funkce jsou definovány časové a další konstanty, které se využívají při výpočtu stacionárních, případně časově proměnných zvuků (*NL\_ITER* – faktor pro vnitřní iterace, *SR\_LEVEL* – vzorkovací frekvence k převzorkování třetinooktávových hodnot, *SR\_LOUDNESS* – vzorkovací frekvence k převzorkování celkové hlasitosti, *TINY\_VALUE* – hodnota pro nastavení úrovně intenzity, *I\_REF* – hodnota pro výpočet SPL (Sound Pressure Level)) [22]. V začátku celé funkce jsou také přiřazovány hodnoty (*SampleRateLevel* – úroveň vzorkovací frekvence, *SampleRateLoudness* – vzorkovací frekvence hlasitosti, *DecFactorLevel* – decimální faktor pro úroveň signálu, *DecFactorLoudness* – decimální faktor pro výpočet celkové hlasitosti, *NumSamplesLevel* – počet časových okamžiků signálu a *NumSamplesLoudness* – počet časových okamžiků hlasitosti po decimaci) [22] dle výběru metody. Pro potřeby vytvoření funkce bylo metodě pro stacionární zvuky (Stationary) přiřazeno číslo 0. Oproti tomu metodě pro časově proměnné zvuky (Time varying) bylo přiřazeno číslo 1.

Následující matematické operace vycházejí převážně z doporučení České technické normy (ČSN ISO 532-1) [12]. V návaznosti na matematické operace jsou také v dané technické normě uváděny tabulky A.3, A.4, A.5, A.6 a A.7, jejichž hodnoty funkce *mvjrLoudness* přejímá a jsou definovány v kódu této funkce.

Je třeba si uvědomit, že sluchový systém je méně citlivý na kmitočtech nižších než 300 Hz. Proto je zavedeno vážení hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech pro střední kmitočty pod 300 Hz, konkrétněji pro kmitočty mezi 25 Hz a 250 Hz, v rámci osmi úrovněových rozsahů mezi  $\leq 45$  dB a  $\leq 120$  dB definovaných tabulkou  $L_t$ . Hodnoty s váženými hladinami akustického tlaku  $\Delta L$  v decibelech byly převzaty do tabulky  $\delta L$ . Tato skutečnost je zohledněna provedením vhodným snížením příslušných hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech. Příklad výpočtu vycházející z ČSN ISO 532-1 [12] uváděn s konkrétními hodnotami pro střední kmitočet 40 Hz třetinooktávového pásma s hladinou akustického tlaku  $L_T = 78$  dB v třetinooktávovém pásmu odpovídá

pro úrovněový rozsah 1:

$$L_T + \Delta L = (78 - 16) \text{ dB} = 62 \text{ dB} > 45 \text{ dB} , \quad (3.8)$$

pro úrovněový rozsah 2:

$$L_T + \Delta L = (78 - 15) \text{ dB} = 63 \text{ dB} > 55 \text{ dB} , \quad (3.9)$$

pro úrovněový rozsah 3:

$$L_T + \Delta L = (78 - 14) \text{ dB} = 64 \text{ dB} < 65 \text{ dB} . \quad (3.10)$$

Vážená hladina akustického tlaku pro tento příklad tedy činí  $L_{T,W} = 64$  dB. Tento výpočet je zavedený ve funkci *mvjrLoudness* viz výpis kódu 3.4.

Výpis kódu 3.4: Výpočet vážené hladiny akustického tlaku

```
for i = 1:11
    k=1;
    if (mvjrTOL(j,i) > (Lt(k)-deltaL(k,i))) && (k < 8)
        k=k+1;
    end
    Ltw(j,i) = mvjrTOL(j,i) + deltaL(k,i);
    Intens(j,i) = 10^(Ltw(j,i)/10);
end
```

Dalším krokem je provedena aproximace kritických pásem neboli numerické přiblížení toho, jak lidské ucho rozděljuje zvukové spektrum na oblasti (kritická pásma), v nichž dochází k výraznému vnímání interakce mezi zvuky. V tomto případě se provádí pro šest třetinooktávových pásem mezi 20 Hz a 90 Hz, dále pro tři třetinooktávová pásma mezi 90 Hz a 180 Hz a závěrem pro dvě třetinooktávová pásma 180 Hz a 280 Hz. Ve funkci *mvjrLoudness* byla kritická pásma označena jako *CBI*. Hladina akustického tlaku

v daném kritickém pásmu musí být aproximována součtem výkonů v daných třetinooktávových pásmech dle vztahu [8]

$$L_{\text{krit}} = 10 \cdot \log_{10} \sum_i 10^{L_i/10}, \quad (3.11)$$

kde v tomto případě  $L_i$  značí hladinu akustického tlaku v decibelech v jednotlivých třetinooktávových pásmech. Ve vytvořené funkci *mvjrLoudness* je daná problematika řešena, viz výpis kódu 3.5.

Výpis kódu 3.5: Aproximace součtem výkonů v třetinooktávových pásmech

```
CBI(j,1) = sum(Intens(j,1:6)); % 6 pásem
CBI(j,2) = sum(Intens(j,7:9)); % 3 pásma
CBI(j,3) = sum(Intens(j,10:11)); % 2 pásma

FNGi = 10*log10(CBI);

for i = 1:3
    if CBI(j,i)>0
        LCB(j,i) = FNGi(j,i);
    else
        LCB(j,i) = 0;
    end
end
```

V návaznosti na přenosové charakteristiky ucha je zavedena tabulka označená jako A.4 v ČSN ISO 532-1 [12], ve funkci *mvjrLoudness* definována jako  $A_0$ , vycházející z označení této normy, kdy s hodnotami korekcí hladin  $a_0$ , v souladu právě s přenosovými funkcemi ucha v decibelech pro střední kmitočty, jsou provedeny doporučené matematické operace. Obecně platí pravidlo, že dané korekce hladin tabulky  $A_0$  musí být odečteny od aproximovaných hladin akustického tlaku v kritických pásmech značené v kódu jako  $LCB$ . Pro potřeby tohoto výpočtu byla zavedena proměnná *updatedValue*. Další matematickou operací je přičtení rozdílu hladin obsažených v tabulce technické normy A.5, ve vlastní funkci definováno označením *deltaLdf*, k výsledku *updatedValue* předchozího výpočetního kroku. Tento matematický postup se však provádí pouze v případě difúzního zvukového pole. Pokud výsledná hladina *updatedValue* překračuje hladinu akustického tlaku v kritickém pásmu u prahu v tichu, definována v kódu funkce *mvjrLoudness* jako  $L_{tq}$ , vycházející z tabulky A.6 ČSN ISO 532-1 [12], musí být odečteny dané korekce zapříčiněné aproximací šířky kritického pásma z tabulky v kódu pojmenované *deltaLcb*, k nalezení v příslušné technické normě pod označením tabulky A.7, a dále je zaveden výpočet hodnot jádrové hlasitosti v jednotkách son s označením *coreLoudness*, neboli dle přiložené literatury s označením  $N'_C$ . Pro výpočet jádrové hlasitosti technická norma [12] uvádí výpočetní vztah

$$N'_c = 0,0635 \cdot 10^{0,025L_{TQ}} \left( \left( 1 - s + s \cdot 10^{\frac{(L_{CB'} - L_{TQ})}{10}} \right)^{0,25} - 1 \right), \quad (3.12)$$

kde prahový faktor  $s = 0,25$ ,  $L_{CB'}$  značí aproximované hladiny akustického tlaku v kritických pásmech v decibelech a  $L_{TQ}$  je hladina akustického tlaku v kritickém pásmu u prahu v tichu v decibelech. Výpočet jádrové hlasitosti *coreLoudness* společně s popsányými matematickými operacemi ve vlastní funkci je k nahlédnutí ve výpisu kódu 3.6.

Výpis kódu 3.6: Výpočet jádrové hlasitosti a přidružené matematické operace

```
for j = 1:NumSamplesLevel
    for i = 1:20
        updatedValue(j,i) = mvjrTOL(j,i+8);
        if i <= 3
            updatedValue(j,i) = LCB(j,i);
        end
        updatedValue(j,i) = updatedValue(j,i) - A0(i);
        if field == 1
            updatedValue(j,i) = updatedValue(j,i) + deltaLdf(i);
        end
        if updatedValue(j,i) > Ltq(i)
            S = 0.25;
            updatedValue(j,i) = updatedValue(j,i) - deltaLcb(i);

            % rovnice (A.2), (ČSN ISO 532-1, str. 25)
            coreLoudness(j,i) = (0.0635 * 10.^(0.025 * Ltq(i))) * ...
                ((1. - S + S*10^(0.1*(updatedValue(j,i)-Ltq(i))))^...
                0.25 - 1);

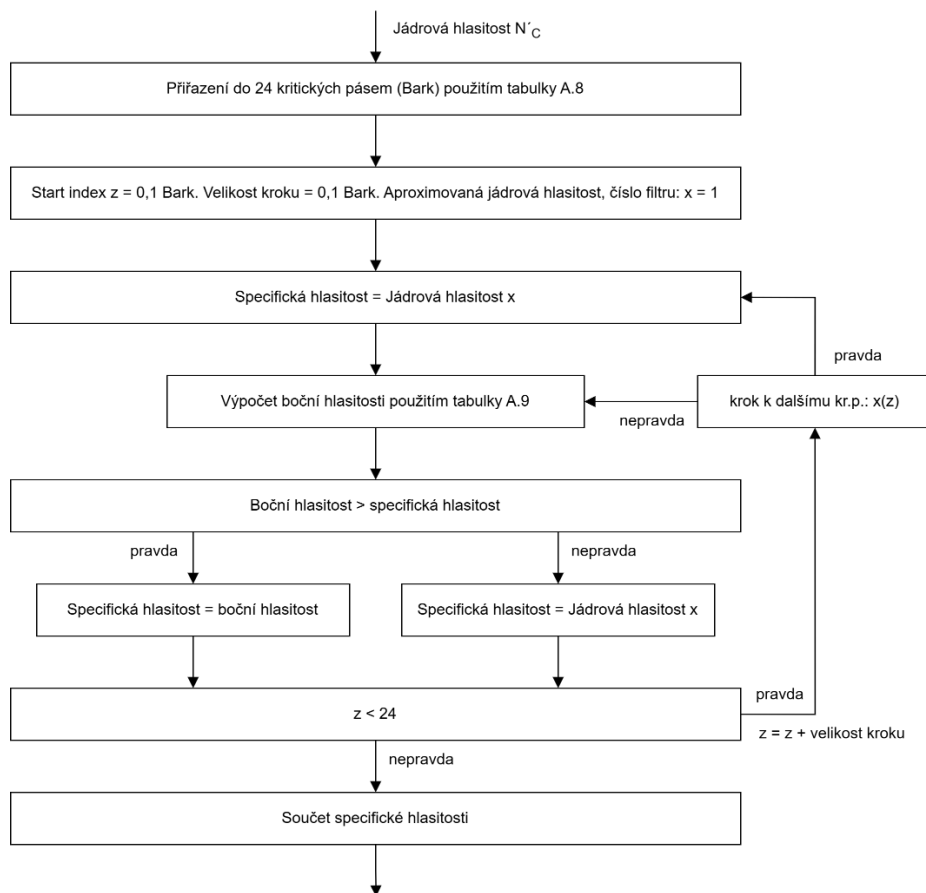
            if coreLoudness(j,i) <= 0
                coreLoudness(j,i) = 0;
            end
        end
    end
end
```

Korekce jádrové hlasitosti v nejnižším kritickém pásmu zajišťuje, že výsledná hlasitost odpovídá skutečnému vjemu lidského ucha [12] [14]. Následující implementace bloku NL pro časově proměnné signály simuluje nelineární časový pokles sluchového systému, jehož implementací se blíže zaobírá uváděná literatura [12] [14].

Jedna ze zásadních částí celého uváděného výpočtu ve funkci *mvjrLoudness* jsou matematické operace spojené s jádrovou hlasitostí, specifickou hlasitostí a boční hlasitostí. Pro potřeby aritmetického zpracování byla ve vlastní funkci definována tabulka s označením *ZUP* neboli horní hranice aproximovaných kritických pásem v jednotkách bark, tabulka s označením *RNS*, jakožto rozsah specifické hlasitosti pro určení strmosti horních sklonů specifické hlasitosti, a tabulka s označením *USL*, která se používá pro návrh pravého sklonu hlasitosti. Tyto hodnoty jsou opět přejímány z dané technické

normy [12] s označením tabulek A.8 – Přiřazení středních kmitočtů třetinooktávových filtrů k barkům a A.9 – Strmost horních sklonů pro specifickou hlasitost v závislosti na rozsahu hodnot specifické hlasitosti a čísla kritického pásma.

ČSN ISO 532-1 [12] uvádí blokové schéma metody výpočtu hlasitosti pro stacionární a časově proměnné zvuky, které je částečně zobrazeno na obrázku 3.3. Pro snadnější orientaci byla převzata pouze ta část blokového schématu, která se týká definovaných tabulek technickou normou (A.8 a A.9), pro vlastní výpočet v upraveném označení *ZUP*, *RNS* a *USL*.



Obrázek 3.3: Část blokového schématu metody výpočtu celkové hlasitosti [12]

Úprava pomocí matematického postupu vychází z fakticky vymezených počátečních podmínek, viz část blokového schématu na obrázku 3.3, a definované v příslušné technické normě. Počáteční hlasitost  $N = 0$  sonů, počáteční kritické pásmo  $z_1 = 0$  bark, úroveň počáteční hlasitosti  $n_1 = 0$  sonů, počet řádků v tabulce A.9 [12]  $j = 8$ , index stoupající k číslu 240 je stanoven jako  $i_z = 1$  a velikost kroku  $z = 0,1$ .

Pro obecné uvědomění – bylo vypočítáno 20 hodnot jádrové hlasitosti, které jsou, po přiřazení do 24 kritických pásem v jednotkách bark s využitím definovaných počátečních

podmínek, přepisovány do hodnot specifické hlasitosti. K údajům o specifických hlasitostech jsou dopočítávány výsledky daných bočních hlasitostí. Tyto boční hlasitosti porovnávají s hodnotami specifické hlasitosti sledují podmínku, která uvádí, jestli je definovaná boční hlasitost větší než konkrétní specifická hlasitost. Nastane-li pravdivost podmínky, specifická hlasitost je přepsána výsledky boční hlasitosti. V opačné situaci je specifická hlasitost přepsána hodnotami jádrové hlasitosti.

Přiřazením jádrové hlasitosti do 24 kritických pásem v jednotkách bark použitím tabulky A.8, vycházející z technické normy [12], po definovaných krocích 0,1 bark bylo získáno celkem 240 hodnot. Je nutné sledovat vždy následující číselné údaje jádrových hlasitostí. Pokud dojde ke zvýšení této hodnoty, nebo pokud výsledek nabývá stejných hodnot, nedochází k výpočtu boční hlasitosti a je provedena podmínka zápisu jádrové hlasitosti do nové specifické hlasitosti. Za předpokladu, že dojde v následujícím kroku k poklesu hodnoty, je proveden výpočet boční hlasitosti. K těmto matematickým operacím náleží výše zmíněná tabulka A.9 rozdělená ve funkci *mvjrLoudness* do definované *RNS* a *USL*.

Výpočet specifické hlasitosti z jádrové hlasitosti se dělí na dvě oblasti – část tzv. „rovných a stoupajících částí“ a část tzv. „klesajících částí“.

Ve vlastní funkci *mvjrLoudness* pokračují matematické operace a definice tzv. „rovných a stoupajících částí“, tedy pokud se následující velikost jádrové hlasitosti nezmění nebo se zvýší oproti současné. V tomto případě je nahlédnuto na rozsah aktuálního kritického pásma a do celkové hlasitosti  $N$  je přičtena  $n$ -krát hodnota specifické hlasitosti, kde  $n$  je počet kroků délky 0,1 v šířce kritického pásma. Průběžným zápisem do  $v$  kódu definované *ns* je výsledek připravený pro práci s výslednými hodnotami popsány dále v textu této diplomové práce.

Pro výpočet boční hlasitosti neboli tzv. „klesajících částí“, tedy pokud je následující velikost jádrové hlasitosti nižší, je nejprve volen sloupec dané tabulky A.9. Pokud je kritické pásmo definováno *ig* ve vlastím kódu větší než 7, tak je číselný údaj roven kritickému pásmu 7. Následuje nahlédnutí, který řádek v tabulce A.9 se týká aktuálního čísla specifické hlasitosti. Pokud je hodnota specifické hlasitosti vyšší než hodnota v tabulce, posune se o jeden řádek dále. Jakmile daná hodnota souhlasí s hledanou, je nalezen vhodný řádek rozsahu specifických hlasitostí. V případě, že specifická hlasitost nabývá stejného číselného údaje, jako uváděná v definované *RNS*, posune se na další řádek. Další podmínkou je situace, kdy by byla překročena hranice osmnácti řádků. To je řešeno vrácením hodnoty na řádek s indexem  $j = 18$ . Vypis kódu 3.7 a vypis kódu 3.8 obsahuje právě dané postupy.

### Výpis kódu 3.7: Výběr vhodných sloupců a řádků příslušící tabuly (část 1)

```
% určuje, který sloupec
ig = i-1;
if ig > 7
    ig=7;
end
control=1;
while (z1 < ZUP(i)) || (control==1)

    % volí se řádek
    if n1 < coreLoudness(l,i)
        j=1;
        while RNS(j) > coreLoudness(l,i)
            j=j+1;
        end
    end
end
```

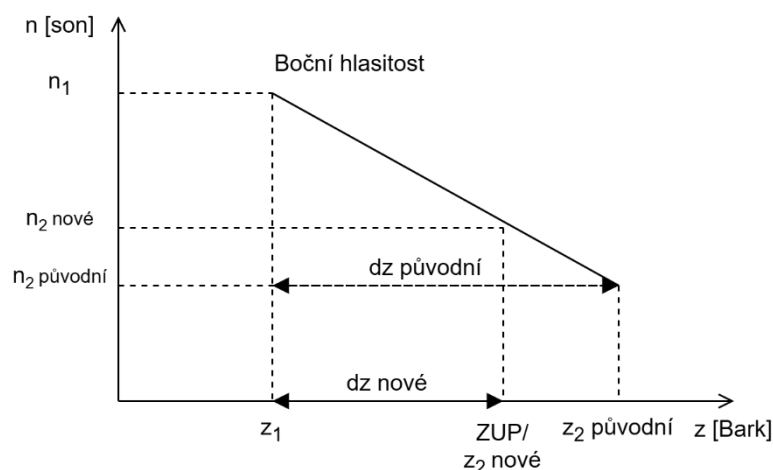
### Výpis kódu 3.8: Výběr vhodných sloupců a řádků příslušící tabuly (část 2)

```
if n2 == RNS(j)
    j=j+1;
end
if j > 18
    j = 18;
end
```

Výpočet délky úseku na barkové ose definovaný jako  $dz$  je graficky znázorněný na obrázku 3.4. Taková vzdálenost je určena vztahem [15]

$$dz = \frac{n_1 - n_2}{k}, \quad (3.13)$$

kde za hodnoty strmosti  $k$  jsou udávány číselné hodnoty z tabulky definované *USL* uvážené ve vlastní funkci. Pokračuje nastavení hodnoty  $z_2$  ze známého bodu  $z_1$ , což je konečný bod hlasitosti  $n_1$ , přesněji jedno z kritických pásem. Hledané  $z_2$  je určeno součtem výsledků bodu  $z_1$  a vzdálenosti  $dz$ . Pokud nové číslo  $z_2$ , tzv. pravá hranice, překročí hranici kritického pásma, je vráceno na hodnotu stávajícího kritického pásma. Zpětně je dopočítána nová vzdálenost  $dz$  mezi krajními polohami  $z_1$  a  $z_2$  a je vypočítána nová hodnota hlasitosti  $n_2$ . Do celkové hlasitosti  $N$  je připočítána střední hodnota z úseku daným krajními polohami. Pro následující krok opakování o  $z = 0,1$  je zapotřebí přepsat koncové aktuální výsledky  $n_2$  a  $z_2$  na nové počáteční podmínky  $n_1$  a  $z_1$ . Získané údaje celkové hlasitosti  $N$  jsou ošetřeny podmínkou, za předpokladu, že tato hlasitost je záporná, bude nastavena na hodnotu  $N = 0$  sonů. Výpočet boční hlasitosti viz výpis kódu 3.9.



Obrázek 3.4: Výpočet hodnot hlasitosti a k nim příslušící vzdálenosti

### Výpis kódu 3.9: Výpočet boční hlasitosti

```

if n1 > coreLoudness(l,i)
    n2 = RNS(j);
    if n2 < coreLoudness(l,i)
        n2 = coreLoudness(l,i);
    end
    dz = (n1-n2)/USL(19-j,ig);
    dz = round(dz*10)*0.1;
    if dz == 0
        dz = 0.1;
    end
    z2 = z1 + dz;
    if z2 > ZUP(i)
        z2 = ZUP(i);
        dz = z2-z1;
        n2 = n1 - dz*USL(19-j,ig);
    end
    N = N + dz*(n1+n2)/2; % součet výstupu
    for k = z:0.1:z2
        ns(l,iz) = n1 - (k-z1)*USL(19-j,ig); % ns je výstup
        if k < (z2-0.05)
            iz = iz + 1;
        end
    end
    z = k;
    z = round(z*10)*0.1;
end

```

Následuje přepočítání celkové hlasitosti  $N$  v sonech na hodnotu  $LN$  v jednotkách fon. Je poskytnuto několik výpočetních vztahů, které jsou dány příslušnou podmínkou k nalezení v ČSN ISO 532-1 [12]. Když je celková hlasitost  $N \geq 1$  son, přepočítání je provedeno pomocí vztahu

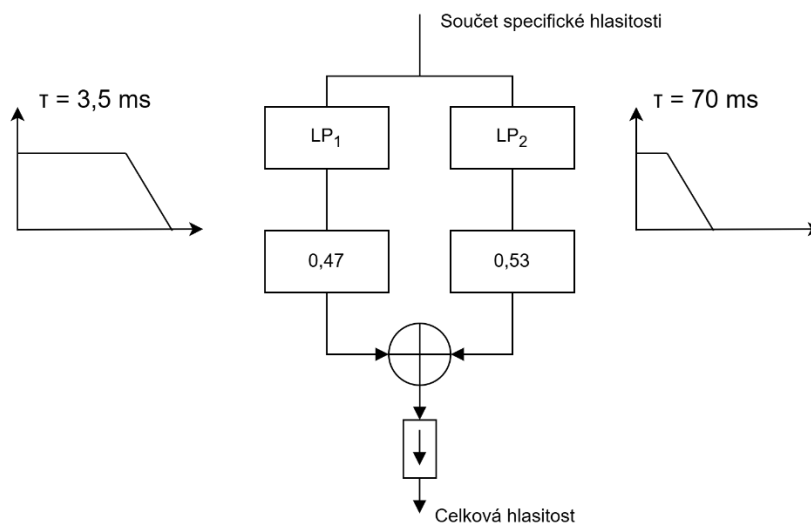
$$LN = \left[ 40 + 33,22 \cdot \log\left(\frac{N}{\text{son}}\right) \right]. \quad (3.14)$$

V opačném případě, kdy celková hlasitost  $N < 1$  son, je rovnice stanovena jako

$$LN = 40 \left( \frac{N}{\text{son}} + 0,0005 \right)^{0,35}. \quad (3.15)$$

Výstupům *loudnessValue1*, *loudnessValue2* a *spec\_n* jsou v případě stacionárních signálů přiřazeny vypočítané hodnoty  $N$  (celková hlasitost v sonech),  $LN$  (celková hlasitost ve fonech) a  $Spec\_N$  (specifická hlasitost pro 1 konkrétní bark). V tomto okamžiku je výpočet hlasitosti pro metodu stacionárních zvuků proveden a ukončen.

Metoda pro časově proměnné zvuky však bere v úvahu časové vážení celkové hlasitosti. Pro toto časové vážení se využívají dva dolnoprostopustné filtry prvního řádu s časovými konstantami 3,5 ms a 70 ms. Tyto filtry jsou aplikovány na součet specifické hlasitosti za účelem modelování vnímání hlasitosti v závislosti na délce trvání akustického signálu. Tento přístup zohledňuje psychoakustický jev, kdy krátké impulzy (např. o délce 10 ms) jsou subjektivně vnímány s nižší hlasitostí než delší signály (např. 100 ms), konkrétně přibližně poloviční.



Obrázek 3.5: Časové vážení celkové hlasitosti [12]

Hodnoty specifické hlasitosti, původně vypočítané s časovým krokem 0,5 ms, jsou před filtrováním lineárně interpolovány a převedeny na vzorkovací frekvenci 48 kHz, čímž je dosaženo lepší shody s charakteristikou dolnoprostopustných filtrů. Výsledná

celková hlasitost je určena jako vážený součet výstupů obou filtrů, přičemž váhové koeficienty činí 0,47 a 0,53 vycházející z ČSN ISO 532-1 [12]. Po filtrování jsou výsledné signály dále převzorkovány na 500 Hz, čímž se získá časové rozlišení 2 ms. Tedy  $\tau$  zde interpretuje časovou konstantu filtru v sekundách,  $A1$  v kódu značí koeficient rekurzivní části filtru,  $B0$  v kódu je v tomto případě koeficient příspěvku aktuálního vstupu,  $Y1$  znamená počáteční hodnotu výstupu filtru, hodnoty  $X0$  a  $Xd$  reprezentují aktuální vstup a změnu vstupu mezi dvěma vzorky, závěrem  $Loudness_{t1}$  uvádí výstupní hodnotu filtrované hlasitosti v daném čase. Obrázek 3.5 společně s výpisem kódu 3.10 přibližuje danou problematiku.

Výpis kódu 3.10: Časové vážení celkové hlasitosti

```
% dolní propust 1. řádu (A)
Tau = 3.5e-3;
A1 = exp(-1 / (SampleRateLevel * DecFactorLevel * Tau));
B0 = 1 - A1;
Y1 = 0;
for i = 1:NumSamplesLevel
    X0 = N_mat(i);
    Y1 = B0 * X0 + A1 * Y1;
    Loudness_t1(i) = Y1;
    if i < NumSamplesLevel - 1
        Xd = (N_mat(i) - X0) / DecFactorLevel;
        for j = 1:DecFactorLevel
            X0 = X0 + Xd;
            Y1 = B0 * X0 + A1 * Y1;
        end
    end
end

% dolní propust 1. řádu (B)
Tau = 70e-3;
A1 = exp(-1 / (SampleRateLevel * DecFactorLevel * Tau));
B0 = 1 - A1;
Y1 = 0;
for i = 1:NumSamplesLevel
    X0 = N_mat(i);
    Y1 = B0 * X0 + A1 * Y1;
    Loudness_t2(i) = Y1;
    if i < NumSamplesLevel - 1
        Xd = (N_mat(i) - X0) / DecFactorLevel;
        for j = 1:DecFactorLevel
            X0 = X0 + Xd;
            Y1 = B0 * X0 + A1 * Y1;
        end
    end
end

% kombinace filtrů
for i = 1:NumSamplesLevel
    Loudness(i) = (0.47 * Loudness_t1(i)) +...
        (0.53 * Loudness_t2(i));
end
```

V tomto okamžiku je výpočet pro metodu časově proměnných zvuků proveden a ukončen. Výstupům *loudnessValue1*, *loudnessValue2*, *spec\_n* a *totalLoudness* jsou v případě časově proměnných signálů přiřazeny vypočítané hodnoty  $N_{\max}$ ,  $N_5$ ,  $ns_{dec}$  a *Total\_loudness*. Výsledkům výpočtu celkové hlasitosti se blíže věnuje kapitola 3.5.

## 3.2 Realizace funkce pro výpočet ostrosti

Psychoakustickou metriku s názvem ostrost se podařilo vyčlenit G. Bismarckovi pomocí sématického diferenciálu a následující faktorové analýze slovních charakteristik barvy zvuku ustálených akustických signálů [17]. Výpočet ostrosti zvuku je odvozený ze Zwickerova modelu výpočtu hlasitosti a je závislý zejména na obálce amplitudového spektra. K dosažení vysokých hodnot ostrosti je nutné, aby byly ve spektru zastoupeny hlavně vysoké kmitočty. Přidáním nízkých kmitočtů do spektra zvuku lze zmenšit ostrost zvuku [17]. Pro potřeby získání hodnot ostrosti v jednotkách acum je využívána dílčí hlasitost v sonech na bark vycházející z výpočtu hlasitosti dle kapitoly 3.1.2. Její hodnota se zvýší díky zvýšení úrovně z 30 na 90 dB dvojnásobně. Výpočetní metoda viz vzorec (1.2) je převzata do vlastní vytvořené funkce *mvjrSharpness* dále popsána v kapitole 3.2.1.

### 3.2.1 Funkce mvjrSharpness

Pro implementaci výpočtu psychoakustické metriky ostrosti byla vytvořena v interaktivním programovém prostředí Matlab funkce *mvjrSharpnes*. Výpočet hodnot byl proveden pomocí literatury [17] a také z osvojených znalostí pocházejících z pramenů oficiální dokumentace tohoto programovacího jazyka [5]. Vstupními hodnotami pro kalkulaci je specifická hlasitost v sonech na bark, váhová funkce  $g(z)$ , která je níže blíže specifikovaná, a pro správné uvádění výsledků je třeba zvolit metodu výpočtu buď pro stacionární nebo časově proměnné zvuky.

Nejprve je generován vektor  $z$  pro prezentování barkové stupnice (0 až 24 bark). Signál má tolik prvků, jako délka specifické hlasitosti získané z funkce *mvjrLoudness* popsané v kapitole 3.1.2. Pro celou délku dané specifické hlasitosti lišící se metodou pro stacionární zvuky a časově proměnné zvuky, která se může měnit na základě délky vstupního zvukového signálu, je optimálně tvořena váhová funkce  $g(z)$ , kterou se zabývá například Widmannův model, dále von Bismarkův model a Auresův model [5]. Všechny uváděné výpočetní modely mají původ v technické normě DIN 45692 (2009). Při využití modelu Widmanna byly zavedeny výpočty pro dvě podmínky [5]

pro  $z \leq 15,8$  bark:

$$g(z) = 1, \tag{3.16}$$

pro  $z > 15,8$  bark:

$$g(z) = 0,15e^{0,42(z-15,8)} + 0,85 . \quad (3.17)$$

Váhová funkce  $g(z)$  pro výpočet ostrosti je také názorně zobrazená na obrázku 1.3.

Následuje finální výpočet ostrosti dle rovnice (1.2), kde konstanta  $k = 0,11$  je volena za podmínky  $0,105 \leq k \leq 0,115$  určená technickou normou DIN 45692 (2009) [5]. V čitateli uváděné rovnice je specifická hlasitost násobena váhovou funkcí  $g(z)$  a barkovou stupnicí. Pokud se hovoří o výpočtu pro stacionární zvuky, výsledkem je pouze jedno číslo. Pro pochopení a přiblížení vyčíslení této psychoakustické metriky je přiložen výpis kódu 3.11. Výsledkům výpočtu ostrosti se věnuje kapitola 3.5.

Výpis kódu 3.11: Určení váhové funkce a výpočet ostrosti

```
z = linspace(0.1,24,length(spec_n));
for i = 1:length(spec_n)
    if i <=0.6583*length(spec_n) % váhová funkce (DIN 45692)
        g(i) = 1;
    else
        g(i) = 0.15*(exp(1))^(0.42*(z(i)-15.8)) + 0.85;
    end
    if method == 1
        sharpness(i) = 0.11*(sum(spec_n(i,:)*g(i)*z(i))*0.1)/...
            (sum(spec_n(i,:))*0.1); % výpočet ostrosti
    end
end

if method == 0
    sharpness = 0.11*(sum(spec_n(1,:).*g.*z))/(sum(spec_n(1,:)));
end
```

### 3.3 Realizace funkce pro výpočet síly kolísání

Pomalé kolísání zvukového signálu, které je lidský sluch ještě schopen časově rozlišit, se v praxi často vyskytuje při provozu různých strojů a technických zařízení. Míru vnímání tohoto kolísání vyjadřuje základní psychoakustická veličina odpovídající sluchovému vjemu – síla kolísání. Tento vjem vzniká do hodnot modulační frekvence cca 20 Hz, kde existuje plynulý přechod mezi vjemem právě popisované síly kolísání a pocitem drsnosti popsaným v kapitole 1.6 a 3.4. Při vynesení křivky závislosti síly kolísání na modulačním kmitočtu charakteristika vykazuje podobnosti s pásmovou propustí, kde se maximum modulačního kmitočtu nachází okolo 4 Hz, kde sluchový orgán vnímá kolísání zvuku nejvíce. Malé kolísání amplitudy časové obálky signálu cca do 3 dB tak není identifikovatelné [17]. Se zvýšením hladiny akustického tlaku o 40 dB se výsledná hodnota u modulovaných zvuků zvyšuje zhruba 2,5krát [14]. Tuto metriku je možné podobně jako u hlasitosti či ostrosti počítat přes kritická pásma lidského sluchu. Pro potřeby získání hodnot síly kolísání ve vacilech je využívána maximální a minimální dílčí hlasitost v přípustném barkovém pásmu v sonech na bark. Vlastní vytvořená funkce

*mvjrFluctuation* viz kapitola 3.3.1 je opřena o stanovení této psychoakustické metriky ze vzorce (1.3).

### 3.3.1 Funkce *mvjrFluctuation*

Pro implementaci výpočtu psychoakustické metriky síly kolísání byla vytvořena v interaktivním programovém prostředí Matlab funkce *mvjrFluctuation*. Výpočet hodnot byl proveden pomocí literatury [12] [14] [17] [26] a také z osvojených znalostí pocházejících z pramenů oficiální dokumentace tohoto programovacího jazyka [2].

Zavedené vstupní hodnoty  $N'_{\max}$  a  $N'_{\min}$ , které definují maximální a minimální dílčí hlasitost v přípustném barkovém pásmu v sonech na bark, jsou závislé na velikosti specifické hlasitosti získané dle popisu v kapitole 3.1.2 a také na typu metody pro stacionární zvuky nebo metody pro časově proměnné zvuky. Hodnoty  $N'_{\max}$  a  $N'_{\min}$  jsou tedy vektory několika hodnot, u kterých se může měnit jejich délka.

Následujícím vstupním parametrem je perioda kolísání  $T$  v sekundách odpovídající modulačnímu kmitočtu  $f_{\text{mod}}$ . Tato veličina je počítána jako převrácená hodnota modulačního kmitočtu dle vzorce uvedeného v kapitole 1.5.2. Pro testovací signály v příloze A této diplomové práce byl připraven textový soubor s uváděnými hodnotami  $f_{\text{mod}}$ , které jsou vyžadovány k celkovému výpočtu síly kolísání dle uváděného vzorce v téže kapitole s ohledem na podmínku [17], kde je třeba pro hodnoty  $\log(N'_{\max}/N'_{\min}) \geq 0,7$  dosadit v čitateli výsledného vzorce číslo 0,7. Pro pochopení a přiblížení vyčíslení této psychoakustické metriky je přiložen výpis kódu 3.12 a výpis kódu 3.13. Výsledkům výpočtu síly kolísání se věnuje kapitola 3.5.

Výpis kódu 3.12: Výpočet maximální a minimální dílčí hlasitosti

```
if method == 0
    for i=1:length(spec_n)
        if 0.05*spec_n(i) > 0.1
            Nmin(i) = 0.95*spec_n(i);
            Nmax(i) = 1.05*spec_n(i);
        else
            if spec_n(i) < 0.1
                Nmin(i) = 0;
            else
                Nmin(i) = spec_n(i) - 0.1;
            end
            Nmax(i) = spec_n(i) + 0.1;
        end
    end
end
```

### Výpis kódu 3.13: Výpočet periody kolísání a síly kolísání

```
T=1/f_mod; % perioda kolísání odpovídající modulačnímu kmitočtu

for i = 1:length(Nmin)
    numerator(i) = log(Nmax(i)/Nmin(i));
end

for i = 1:length(numerator)
    if numerator(i) >= 0.7
        numerator(i) = 0.7;
    end
end

% výpočet síly kolísání
for i = 1:length(spec_n)
    fluctuation(i) = (0.032*numerator(i))/((T/0.25)+(0.25/T));
end
```

## 3.4 Realizace funkce pro výpočet drsnosti

Oproti předcházející popisované síle kolísání dle kapitol 1.5 a 3.3 je vymezen vjem rychlé časové změny zvukového signálu s názvem drsnost. Tato psychoakustická metrika vzniká v důsledku modulací s modulačními kmitočty zhruba v rozsahu od 15 Hz do 300 Hz, přičemž není podmínkou, aby byla modulační funkce pravidelná. Jev drsnosti je v praxi často vnímán jako zvuky vrčení nebo bzučení. Významný systematický výzkum vedl ke vzniku modelu pro její kvantifikaci, který vypracovali například A. Vogel, W. Aures a H. Fastl [17]. Závislost drsnosti na frekvenci modulace připomíná charakteristiku pásmové propusti, přičemž maximum citlivosti lidského sluchu tentokrát leží kolem 70 Hz. Při zvýšení hladiny zvuku o 40 dB se drsnost přibližně ztrojnásobí [17]. Důležitým faktorem při vnímání této veličiny je také hloubka časového maskování. Konečný výpočet je proveden jako součet dílčích příspěvků na jednotlivých kritických pásmech podle barkovské škály. Ve vlastní vytvořené funkci *mvjrRoughness*, která dle popisu kapitoly 3.4.1 využívá k implementaci maximální a minimální dílčí hlasitost v přípustném barkovém pásmu v sonech na bark a modulační kmitočet, je zakomponován definovaný matematický vztah (1.4) této psychoakustické metriky v jednotkách asper.

### 3.4.1 Funkce *mvjrRoughness*

Pro implementaci výpočtu psychoakustické metriky drsnosti byla vytvořena v interaktivním programovém prostředí Matlab funkce *mvjrRoughness*. Výpočet hodnot byl proveden pomocí literatury [12] [14] [17] [26] a také z osvojených znalostí pocházejících z pramenů oficiální dokumentace tohoto programovacího jazyka [4].

Vstupní hodnoty  $N'_{\max}$  a  $N'_{\min}$ , které definují maximální a minimální dílčí hlasitost v přípustném barkovém pásmu v sonech na bark a které jsou blíže specifikovány v kapitole 3.3.1, jsou opět vektory několika hodnot v závislosti na specifické hlasitosti.

Vzorec pro výpočet drsnosti uváděný v kapitole 1.6.2 obsahuje hodnotu hloubky časového maskování  $\Delta L$ , která je získána pomocí vztahu [17] [26]

$$\Delta L = \log \frac{N'_{\max}}{N'_{\min}}. \quad (3.18)$$

Parametrem  $f_{\text{mod}}$  se rozumí modulační kmitočet, kde pro testovací signály v příloze A této diplomové práce byl připraven textový soubor s uváděnými hodnotami  $f_{\text{mod}}$ , které jsou vyžadující k celkovému výpočtu drsnosti dle výsledného vzorce. Pro pochopení a přiblížení vyčíslení této psychoakustické metriky je přiložen výpis kódu 3.14. Výsledkům výpočtu drsnosti se věnuje kapitola 3.5.

Výpis kódu 3.14: Výpočet hloubky časového maskování a drsnosti

```
% výpočet hloubky časového maskování
for i = 1:length(Nmin)
    deltaL(i) = log(Nmax(i)/Nmin(i));
end

for i = 1:length(deltaL)
    if deltaL(i) >= 0.7
        deltaL(i) = 0.7;
    end
end

for i = 1:length(deltaL)
    roughness(i) = 0.3*f_mod*deltaL(i); % výpočet drsnosti
end
```

## 3.5 Výsledky implementací výpočtu

Vytvořením funkcí (*mvjrFilters* – kapitola 3.1.1, *mvjrLoudness* – kapitola 3.1.2, *mvjrSharpness* – kapitola 3.2.1, *mvjrFluctuation* – kapitola 3.3.1, *mvjrRoughness* – kapitola 3.4.1) pro stanovení jednotlivých metrik bylo možné dosáhnout výsledků uvedených implementací. K samotné interpretaci výstupů nejlépe poslouží dále vytvořené uživatelské rozhraní blíže specifikováno v kapitole 3.7, díky kterému je možné jednotlivé výsledky sledovaných psychoakustických metrik jednoduše získat. Tato kapitola diplomové práce je rozdělena na části, ve kterých se pojednává o výsledcích na základě vstupních dat. Toto rozděluje popis pro vstup 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech a pro vstup zvukového souboru stacionárního charakteru anebo pro vstup časově proměnného zvukového souboru.

Za předpokladu vepsání známých hodnot hladin akustického tlaku do 28 připravených polí jde o klasifikaci stacionárního zvuku. Příklad takových hladin je vložen do textového dokumentu připojeného do přílohy A této diplomové práce. Vypisovanými závěry z provedení takového výpočtu jsou hlasitost v jednotkách son, hlasitost v jednotkách fon, ostrost, jakožto jedno číslo v jednotkách acum a graf specifické hlasitosti.

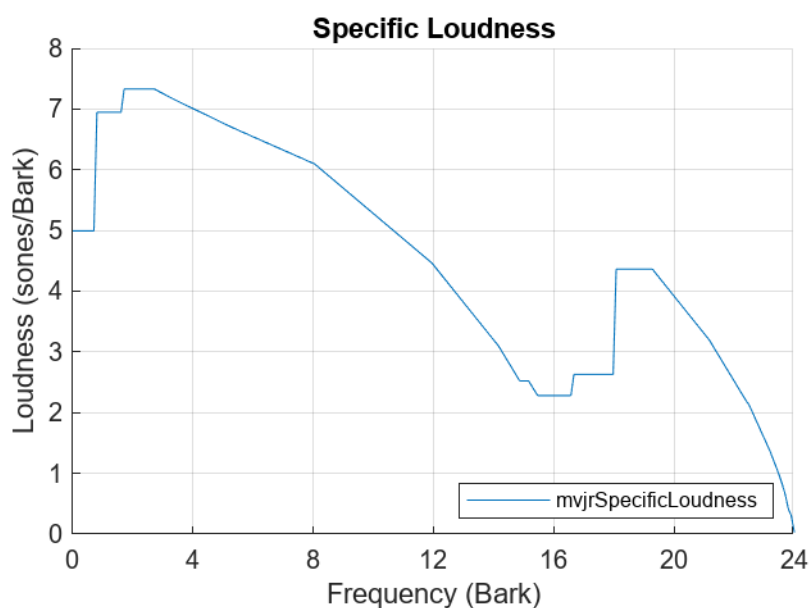
Jestliže je vstupem do uživatelského rozhraní stacionární zvukový soubor, vypisovanými závěry jsou tentokrát hlasitost v jednotkách son, hlasitost v jednotkách fon, ostrost, jakožto jedno číslo v jednotkách acum a graf specifické hlasitosti.

Časově proměnné zvukové soubory jsou vzhledem k uvádění zjištěných dat speciálním případem. Určení hlasitosti se v tomto případě udává pomocí procentuální hlasitosti značené  $N_5$  a maximální hlasitosti  $N_{\max}$  v sonech. Hodnota  $N_5$  silně závisí na čase měření a pomáhá lépe popsat, jak často a jak výrazně je zvuk hlasitý, na rozdíl od prostého průměru.  $N_{\max}$  uvádí maximální hlasitost, kterou zvuk dosáhne během měřeného časového úseku. Tyto hodnoty tedy dávají lepší představu o extrémech a významných úsecích zvuku. Lze přesněji charakterizovat dynamiku a variabilitu hlasitosti a lépe tak popsat jejich skutečný psychoakustický dopad. Mimo jiné jsou zobrazovány grafy časově proměnné hlasitosti, ostrosti, síly kolísání a drsnosti. Příklady takových zvukových stacionárních a časově proměnných signálů jsou vloženy do přílohy A této diplomové práce. Vždy je třeba použít vhodný zvuk při zvolení odpovídající výpočetní metody.

Výsledky pro případ vstupu 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech vychází z testovacího souboru s názvem *SPL input 1* dodaného v příloze A této diplomové práce.

Tabulka 3.1: Hlasitost a ostrost pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1, mvjrLoudness/mvjrSharpness

Hlasitost (son)	Hlasitost (fon)	Ostrost (acum)
110,007	107,815	1,481

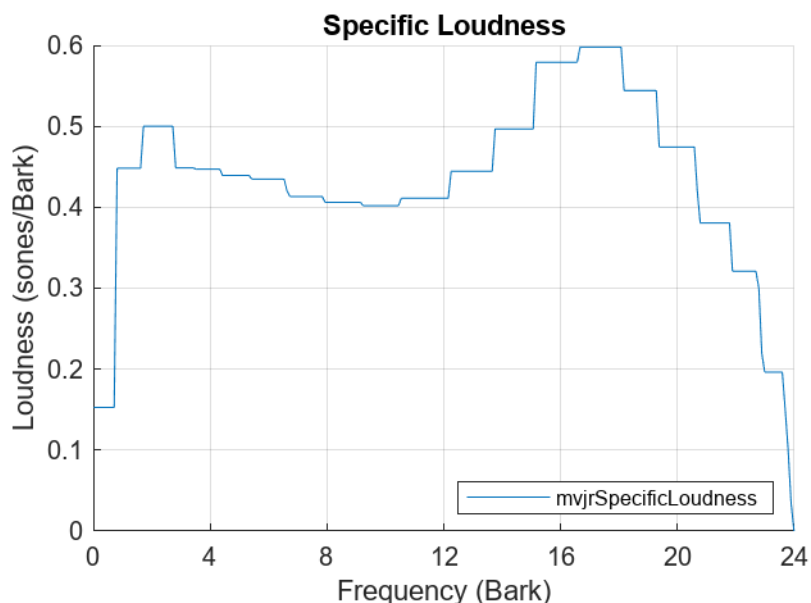


Obrázek 3.6: Specifická hlasitost pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1, mvjrLoudness

Výsledky pro případ vstupu stacionárního zvukové signálu vychází ze souboru s názvem *Test signal 1 (pinknoise 60 dB)* dodaným do přílohy A této diplomové práce.

Tabulka 3.2: Hlasitost a ostrost stacionárního zvukové signálu, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), volné pole, mvjrLoudness/mvjrSharpness

Hlasitost (son)	Hlasitost (fon)	Ostrost (acum)
10,360	73,730	1,962

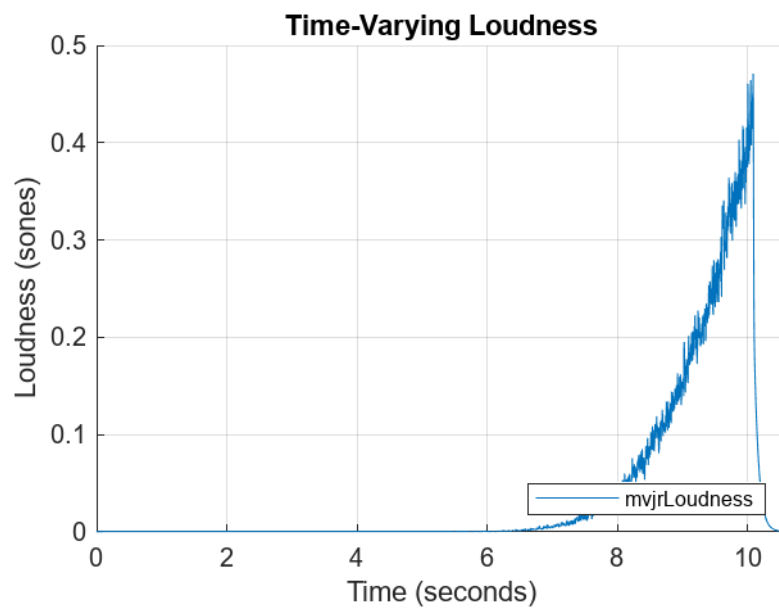


Obrázek 3.7: Specifická hlasitost stacionárního zvukové signálu, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), mvjrLoudness

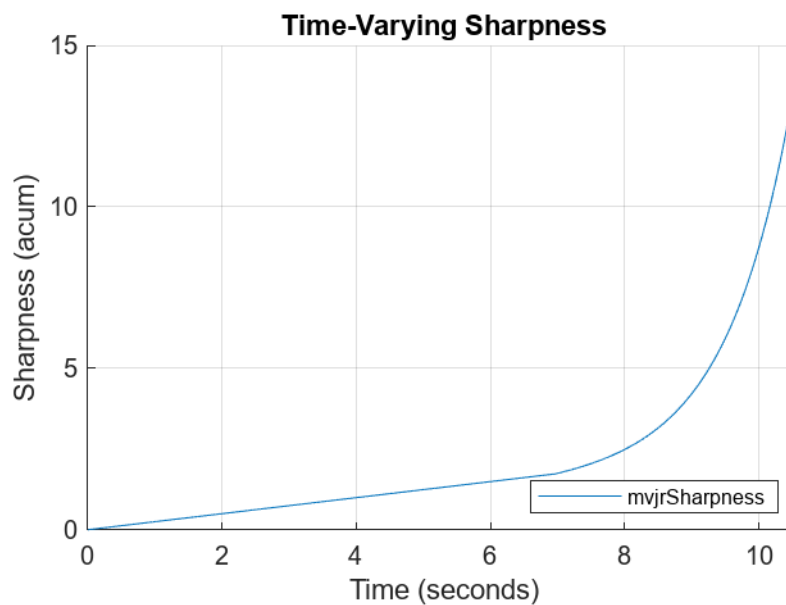
Výsledky pro případ vstupu časově proměnného zvukové signálu vychází ze souboru s názvem *Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB)* dodaným do přílohy A této diplomové práce.

Tabulka 3.3: Hlasitost  $N_{\max}$  a  $N_5$  časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness

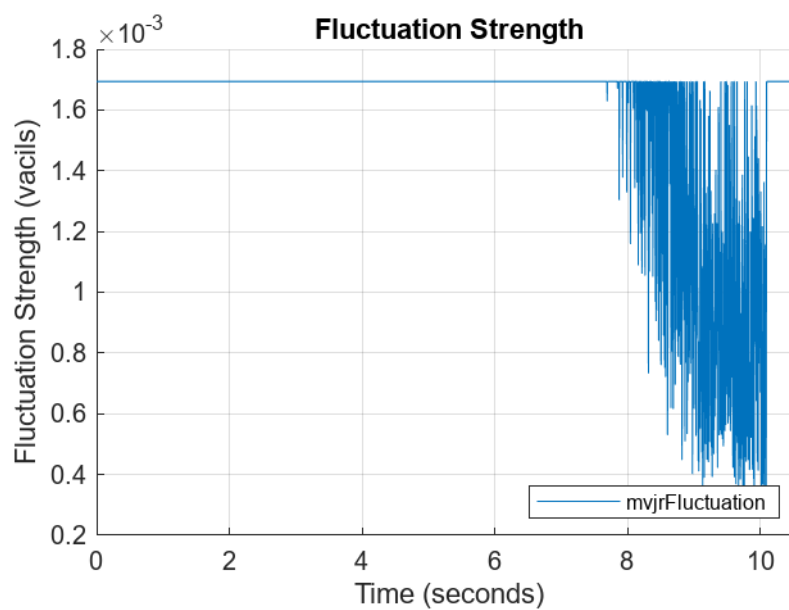
Hlasitost $N_{\max}$ (son)	Hlasitost $N_5$ (son)
0,471	0,270



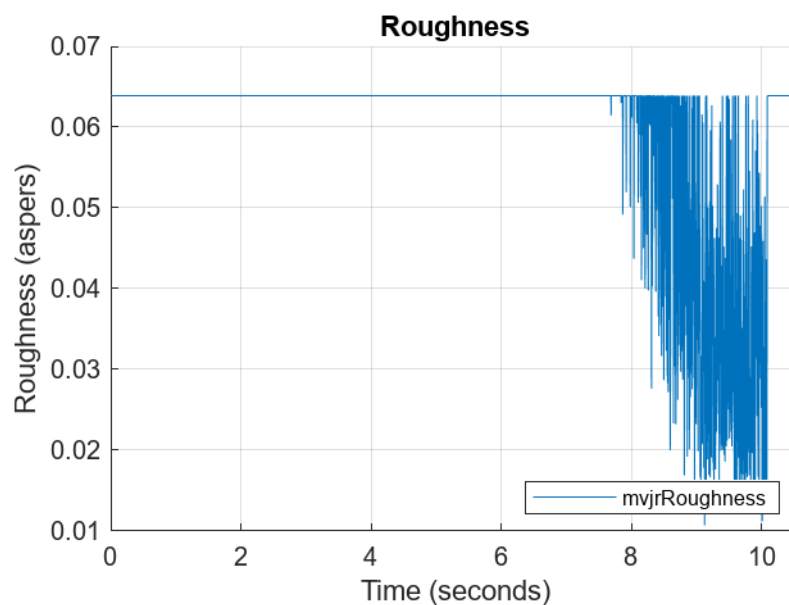
Obrázek 3.8: Hlasitost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness



Obrázek 3.9: Ostrost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness



Obrázek 3.10: Síla kolísání časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness

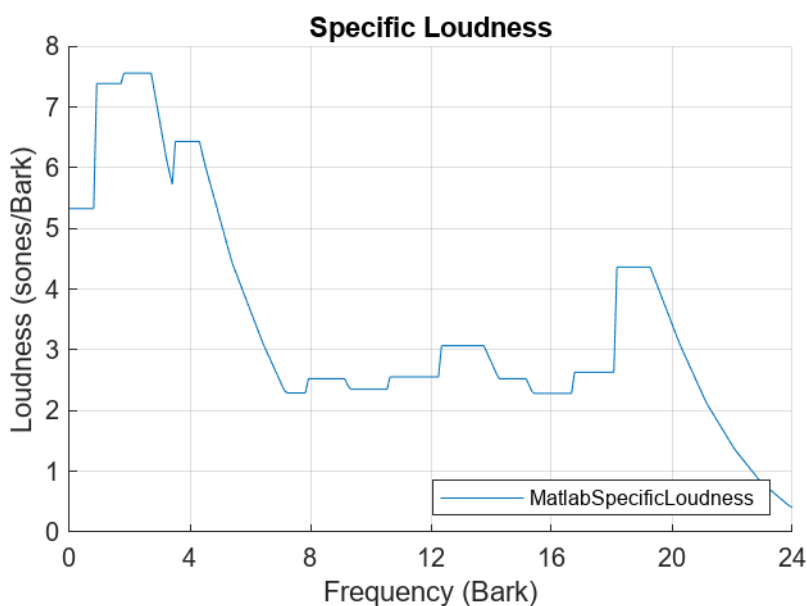


Obrázek 3.11: Drsnost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrLoudness

Pro porovnání výsledků s Audio Toolbox Matlab je k prvnímu případu vstupu 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech z testovacího souboru s názvem *SPL input 1* přiložena tabulka 3.4 a obrázek 3.12.

Tabulka 3.4: Hlasitost a ostrost pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1, mvjrMatlabCheck

Hlasitost (son)	Hlasitost (fon)	Ostrost (acum)
83,295	103,802	1,409

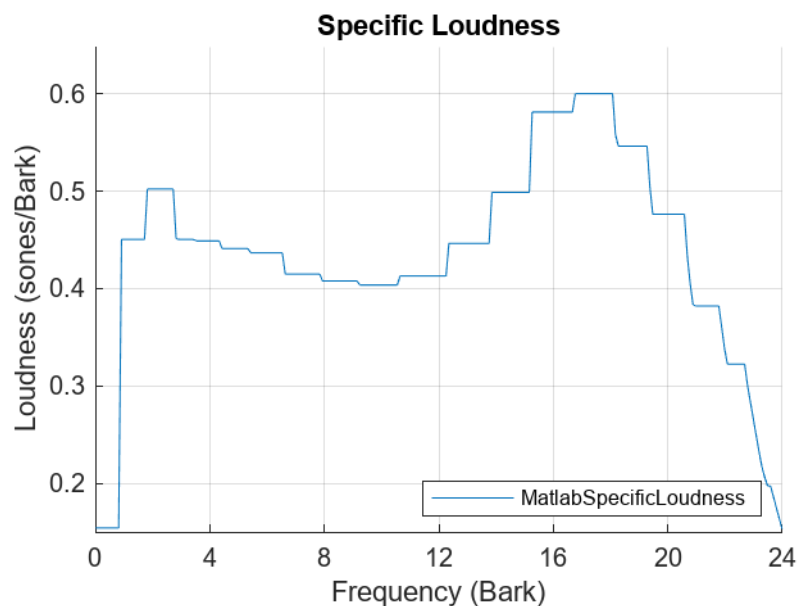


Obrázek 3.12: Specifická hlasitost pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1, mvjrMatlabCheck

Pro porovnání výsledků s Audio Toolbox Matlab je k stacionárnímu zvukovému signálu z testovacího souboru s názvem *Test signal 1 (pinknoise 60 dB)* přiložena tabulka 3.5 a obrázek 3.13.

Tabulka 3.5: Hlasitost a ostrost stacionárního zvukové signálu, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck

Hlasitost (son)	Hlasitost (fon)	Ostrost (acum)
10,498	73,920	2,018

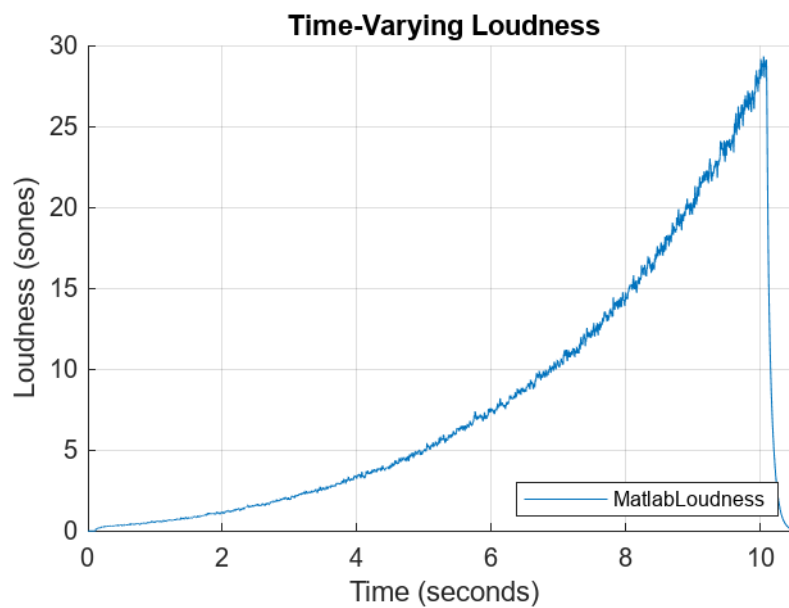


Obrázek 3.13: Specifická hlasitost stacionárního zvukové signálu, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), mvjrMatlabCheck

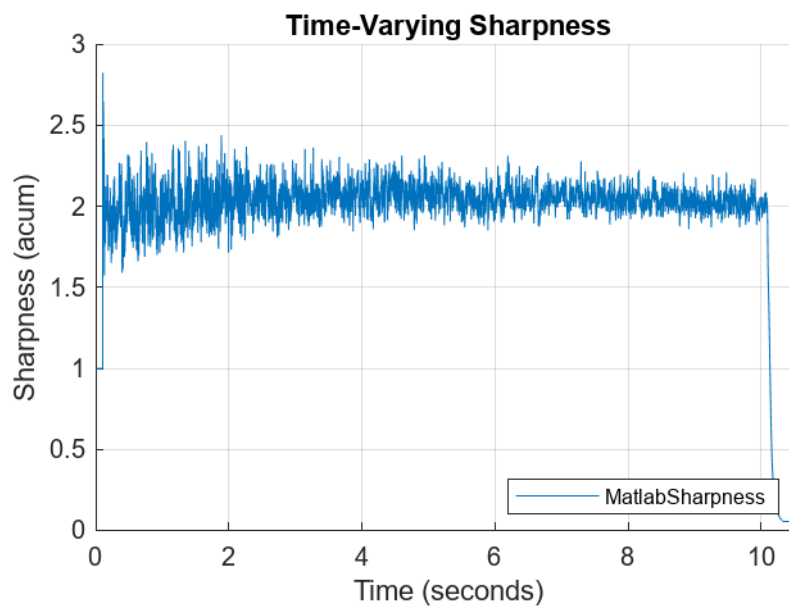
Pro porovnání výsledků s Audio Toolbox Matlab je k časově proměnnému zvukovému signálu z testovacího souboru s názvem *Test signal 5 (pink noise 0 dB – 50 dB)* přiložena tabulka 3.6 a obrázky 3.14, 3.15, 3.16 a 3.17.

Tabulka 3.6: Hlasitost  $N_{\max}$  a  $N_5$  časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck

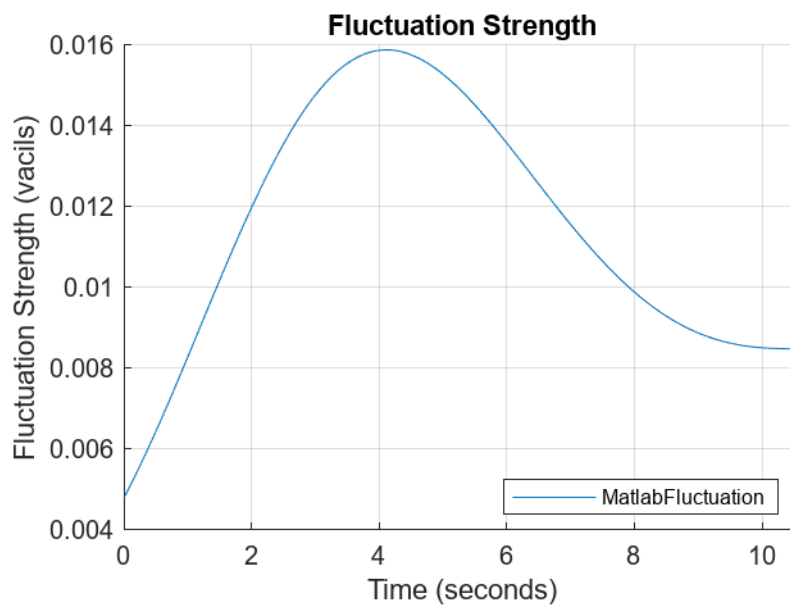
Hlasitost $N_{\max}$ (son)	Hlasitost $N_5$ (son)
29,314	24,090



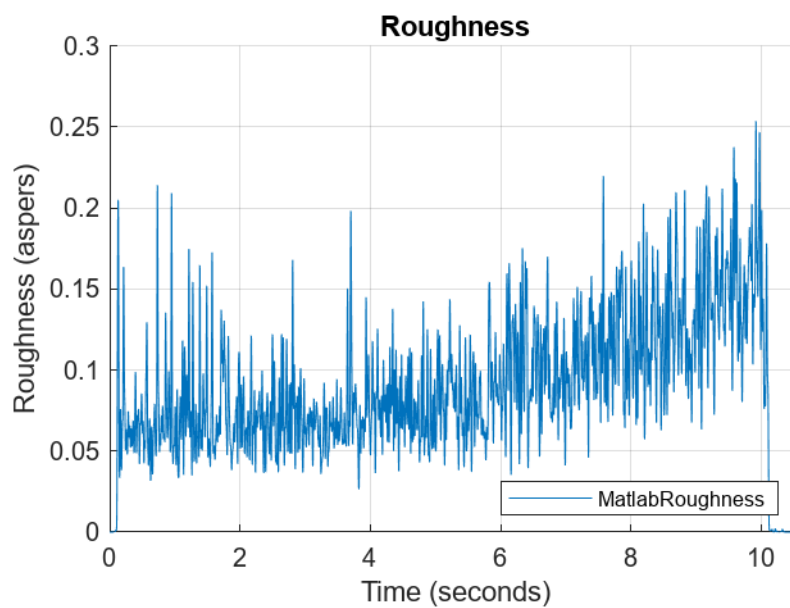
Obrázek 3.14: Hlasitost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck



Obrázek 3.15: Ostrost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck



Obrázek 3.16: Síla kolísání časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck



Obrázek 3.17: Drsnost časově proměnného zvukové signálu, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole, mvjrMatlabCheck

Tabulka 3.7 Porovnání výsledků z uváděných funkcí pro 28 ručně zadávaných hladin akustického tlaku, SPL input 1

	<b>Hlasitost (son)</b>	<b>Hlasitost (fon)</b>	<b>Ostrost (acum)</b>
<b>mvjrLoudness/ mvjrSharpness</b>	110,007	107,815	1,481
<b>mvjrMatlabCheck</b>	83,295	103,802	1,409

Tabulka 3.8 Porovnání výsledků z uváděných funkcí pro stacionární zvukový signál, Test signal 1 (pinknoise 60 dB), volné pole

	<b>Hlasitost (son)</b>	<b>Hlasitost (fon)</b>	<b>Ostrost (acum)</b>
<b>mvjrLoudness/ mvjrSharpness</b>	10,360	73,730	1,962
<b>mvjrMatlabCheck</b>	10,498	73,920	2,018

Tabulka 3.9 Porovnání výsledků z uváděných funkcí pro časově proměnný zvukový signál, Test signal 5 (pink noise 0 dB - 50 dB), volné pole

	<b>Hlasitost <math>N_{max}</math> (son)</b>	<b>Hlasitost <math>N_5</math> (son)</b>
<b>mvjrLoudness</b>	0,471	0,270
<b>mvjrMatlabCheck</b>	29,314	24,090

## 3.6 Ověření výstupů s Audio Toolbox Matlab

Pro ověření uváděných metrik byla vytvořena databáze zvuků, připojená do přílohy A této diplomové práce, a výsledky byly porovnány s výstupem funkcí Audio Toolbox Matlab. Pro tento postup slouží vlastní funkce *mvjrMaltabCheck* viz kapitola 3.6.1. Poskytnuté uživatelské rozhraní operuje primárně s vytvořenými funkcemi pro výpočet jednotlivých psychoakustických metrik. Při správném nastavení je však možné výsledky přímo porovnávat s daty z funkcí *acousticLoudness* [3], *acousticSharpness* [5], *acousticFluctuation* [2] a *acousticRoughness* [4]. V interaktivním vývojovém prostředí v programu Matlab (App Designer) v záložce zobrazení kódu (Code View) uživatelského rozhraní, dále popsaného v kapitole 3.7, jsou připraveny definované bloky kódu, které lze příslušným odkomentováním zapojit do operací celého systému. Jestliže tak bude provedeno, dojde k zobrazení příslušných číselných i grafických hodnot v závislosti na vstupních datech či signálu. Díky vytvoření separátního okna vypisování grafů lze velmi snadno zhodnotit vlastní výsledky implementací oproti implementacím programového prostředí Matlab.

### 3.6.1 Funkce *mvjrMatlabCheck*

Zde je využíváno výpočtu *acousticLoudness*, *acousticSharpness*, *acousticFluctuation* a *acousticRoughness*, což jsou zadefinované funkce programovým prostředím Matlab. Vstupy do této funkce jsou totožné se vstupy do vlastních funkcí *mvjrLoudness* (kapitola 3.1.2), *mvjrSharpness* (kapitola 3.2.1), *mvjrFluctuation* (kapitola 3.3.1) a *mvjrRoughness* (kapitola 3.4.1). Dále bylo třeba rozlišit, jestli se dané vstupní hodnoty získávají ručním zadáváním 28 hodnot hladin akustického tlaku nebo vložení zvukového souboru. V případě, že se jedná o zvukový soubor, se přihlíží, jestli jde o stacionární nebo časově proměnný signál. Výstupem z definovaných výpočtů jsou hodnoty *loudnessValue1* a *loudnessValue2*, které za předpokladu stacionárních zvuků udávají hlasitosti v jednotkách son a hlasitost v jednotkách fon. U časově proměnných zvuků zde tyto hodnoty určují hlasitost  $N_5$  a  $N_{\max}$  v sonech blíže specifikované v kapitole 3.5. Zároveň výstup *matlabSpecLoudness* je využíván pro zobrazení grafu specifické hlasitosti v závislosti na barkové stupnici, *matlabSharpness* udává, s ohledem na stacionární nebo časově proměnný signál, jedno výsledné číslo nebo průběh hodnot v grafu, *matlabFluctuation* a *matlabRoughness* jsou aplikovány pouze za předpokladu časově proměnného signálu opět pro průběh hodnot v grafu. Pro pochopení a přiblížení takové implementace je přiložen výpis kódu 3.15.

### Výpis kódu 3.15: Výpočet metrik daných funkcí Audio Toolbox Matlab

```
elseif inputType == 1
    if method == 0
        % výpočet hlasitosti a specifické hlasitosti pro
        % stacionární signály
        [loudnessValue1,matlabSpecLoudness] = acousticLoudness...
            (audio,fs,'SoundField',field);
        % přepočítání sonů na fony
        loudnessValue2 = 40 + 10*log2(loudnessValue1);
        varyingLoudness = 0;
    elseif method == 1
        % výpočet hlasitosti pro časově proměnné signály
        [varyingLoudness,matlabSpecLoudness,perc] = ...
            acousticLoudness(audio,fs,'TimeVarying',method,...
                'SoundField',field);
        loudnessValue1 = perc(1); % Nmax
        loudnessValue2 = perc(2); % N5
    end
    % výpočet ostrosti pro časově proměnné signály
    matlabSharpness = acousticSharpness(audio,fs,'TimeVarying',...
        method,'SoundField',field);
    % výpočet síly kolísání pro časově proměnné signály
    matlabFluctuation = acousticFluctuation(audio,fs,...
        'SoundField',field);
    % výpočet drsnosti pro časově proměnné signály
    matlabRoughness = acousticRoughness(audio,fs,...
        'SoundField',field);
end
```

## 3.7 Uživatelské rozhraní

V rámci této diplomové práce bylo vytvořeno uživatelské rozhraní v prostředí Matlab, které by mělo vést k jednoduchému výpočtu psychoakustických metrik hlasitost (Loudness), ostrost (Sharpness), síla kolísání (Fluctuation Strength) a drsnost (Roughness).

Vlastní uživatelské rozhraní se snaží pro přehlednost alespoň částečně udržovat grafický styl vycházející z grafického uživatelského rozhraní (GUI) příloženého v České technické normě (ČSN ISO 532-1) [12], které se však používá pouze pro výpočet hlasitosti stacionárních a časově proměnných zvuků. V tomto případě je uživatelské rozhraní rozšířeno o výpočet ostatních psychoakustických metrik. Následující text popisuje podrobněji obsah a funkčnost celého rozhraní.

Při spuštění vlastního uživatelského rozhraní se začíná volbou vstupních dat. Vstupní data je možné vložit dvojím způsobem. První možností je ruční zápis hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech (Third octave levels) v dB. Druhá varianta vložení vstupních dat umožňuje výběr audio souborů. Pokud je vybrán jako vstup ruční zápis hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech, není umožněn výběr zvukového souboru, ale je třeba doplnit 28 hodnot vycházejících například z předchozího měření viz obrázek 3.18. Takové měření lze uskutečnit pomocí systému pro snímání zvuku,

nejčastěji obsahující mikrofon, předzesilovač a zesilovač. Průběh časového signálu je třeba vzorkovat A/D převodníkem.

Input

Sound pressure levels  
 Audio file

Sound field

Free  
 Diffuse

Input third octave sound pressure levels in dB:

25 Hz	-60	125 Hz	89	630 Hz	71	3150 Hz	65
31.5 Hz	-60	160 Hz	75	800 Hz	70	4000 Hz	67
40 Hz	78	200 Hz	87	1000 Hz	72	5000 Hz	77
50 Hz	79	250 Hz	85	1250 Hz	71	6300 Hz	68
63 Hz	89	315 Hz	79	1600 Hz	72	8000 Hz	55
80 Hz	72	400 Hz	86	2000 Hz	74	10000 Hz	45
100 Hz	80	500 Hz	80	2500 Hz	69	12500 Hz	30

Obrázek 3.18: Ruční zápis hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech

Mezi další vkládané parametry nabízené vlastním uživatelským rozhraním patří volba zvukového pole (Sound field), kde je možné vybrat mezi zvukovým polem volným (Free) nebo difúzním (Diffuse), dále je nutné určit metodu (Method), jestli se jedná o stacionární (Stationary) nebo časově proměnný (Time varying) zvuk, v případě vstupu zvukového souboru. Přichází vlastní volba zvukového souboru v sekci vstupní zvukový soubor (Input Audio file), kterému je přiřazeno tlačítko vyberte soubor (Choose file). Interaktivní programové prostředí Matlab umožňuje výběr a podporuje širokou škálu audio formátů pro načítání a zpracování zvukových dat. Z oficiální dokumentace Matlab [24] je možné dohledat podporované formáty AIFC (.aifc), AIFF (.aiff, .aif) AU (.au), FLAC (.flac), OGG (.ogg), OPUS (.opus) a WAVE (.wav). Výběr takového souboru vychází z podporovaných uvedených formátů. Navazujícími vstupními hodnotami jsou také kalibrační soubor v sekci vstupní kalibrace (Input Calibration) a úroveň kalibrace (Calibration level). V závislosti na kalibračním souboru je nutné upravovat správnou hodnotu úrovně kalibrace. Pro ověření vstupního zvukového souboru bylo přidáno také tlačítko přehrát soubor (Play file). Tímto jsou splněny všechny vstupní požadavky k nahlédnutí v obrázku 3.19 pro následující výpočet daných psychoakustických metrik.

Reset

Input

Sound pressure levels

Audio file

Sound field

Free

Difuse

Method

Stationary

Time Varying

Input Audio file:

Choose file

Test signal 1 (pinknoise 60 dB).wav

Play file

Input Calibration:

Choose file

Calibration signal sine 1kHz 60dB.wav

Calibration level

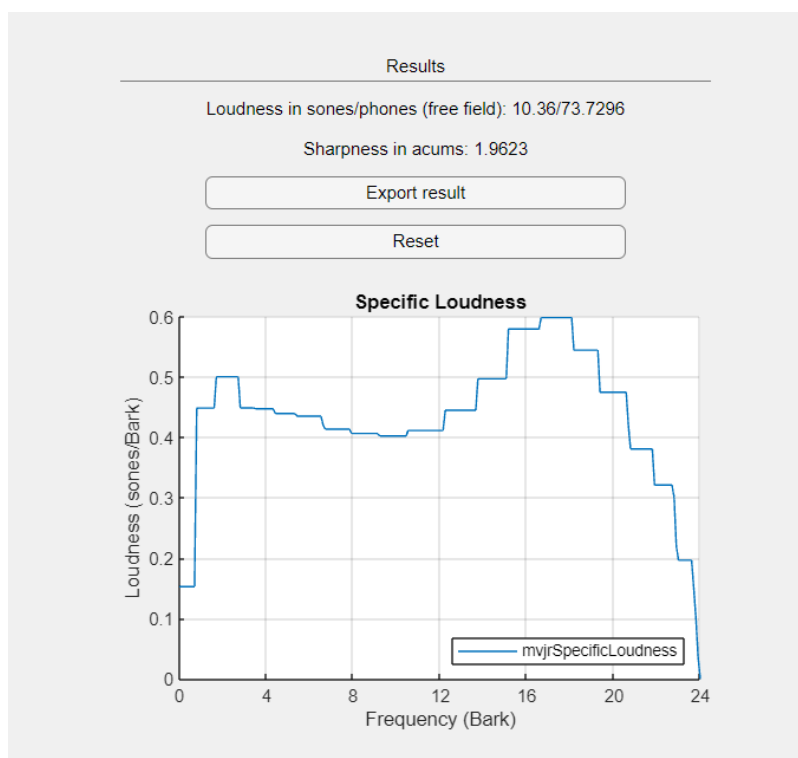
60

Results

Get results

Obrázek 3.19: Volba vstupních parametrů

Následující tlačítko získání výsledků (Get results) vypíše výsledky výpočtů všech psychoakustických metrik (viz obrázek 3.20) a k nim příslušící grafy, ke kterým se blíže vyjadřuje kapitola 3.5. Výsledky je možné exportovat neboli uložit do složky s názvem Results. Součástí exportu výsledků je vytvoření textového souboru TXT (.txt) a uložení grafů. Tyto soubory jsou ukládány do vnořené složky s názvem dle aktuálního data a času. Po otevření textového souboru s totožným názvem je k nahlédnutí název vstupního zvukového souboru a přehled všech vypočítaných výsledků daných psychoakustických metrik. Grafy jsou ukládány ve formátu PNG (.png) s názvy příslušících psychoakustických metrik.



Obrázek 3.20: Výpis výsledků psychoakustických metrik

Na začátku zobrazení kódu v sekci s názvem `properties` (`Access = private`) jsou zavedeny proměnné pro užívání v aplikaci. V následující funkci `startupFcn` je definováno, co se má odehrát při otevření uživatelského rozhraní. V tomto případě se má dané okno maximalizovat. Pokračuje výčet `Callbacks` pro jednotlivé grafické položky.

Po zmáčknutí tlačítka pro resetování celé aplikace (`Reset`) se nejprve skryje celé aktuální okno, následně je znovu otevřeno a je zavřena původní aktivní aplikace.

Vlastní uživatelské rozhraní obsahuje dvě zaškrťovací pole `Sound pressure level` a `Audio file`. V případě, že je zaškrtnuté pole `Sound pressure level`, zviditelní se (pomocí atributu `Visible`) možnost volby zvukového pole, tabulka pro zápis 28 hodnot hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech, která je vložena v tzv. panelu, a tlačítko pro získání výsledků. Dále je znemožněno znovu zvolení pole (pomocí atributu `Enable`) `Audio file` a `Sound pressure level`. Když je zaškrtnuté pole `Audio file`, zviditelní se možnost volby zvukového pole, určení metody, možnost zvolení zvukového souboru, výběr kalibračního souboru a zápis kalibrační hodnoty. Dále je znemožněno znovu zvolení pole `Audio file` a `Sound pressure level`. Výše zmíněný postup je k nahlédnutí ve výpisu kódu 3.16 a výpisu kódu 3.17.

### Výpis kódu 3.16: Definování funkčnosti zaškrťovacího pole Sound pressure level

```
function SoundpressurelevelsCheckBoxValueChanged(app, event)
    value = app.SoundpressurelevelsCheckBox.Value;
    if value == 1
        app.inputType = 0;
        app.SoundpressurelevelsCheckBox.Enable = 0;
        app.AudiofileCheckBox.Value = 0;
        app.AudiofileCheckBox.Enable = 0;
        app.ISPL_panel.Visible = 1;
        app.InputAudiofilePanel.Visible = 0;
        app.InputCalibrationFilePanel.Visible = 0;
        app.SoundfieldPanel.Visible = 1;
        app.Results.Visible = 1;
        app.ISPL_panel.Parent = app.mvjrrAppGridLayout;
        app.ISPL_panel.Layout.Row = 4;
        app.ISPL_panel.Layout.Column = 2;
        app.InputAudiofilePanel.Parent = app.UIFigure;
        app.InputAudiofilePanel.Position = [-100,-100,99,99];
        app.InputAudiofilePanel.Visible = 0;
        app.Results.Layout.Row = 5;
        app.Results.Layout.Column = 2;
    end
end
```

### Výpis kódu 3.17: Definování funkčnosti zaškrťovacího pole Audio file

```
function AudiofileCheckBoxValueChanged(app, event)
    value = app.AudiofileCheckBox.Value;
    if value == 1
        app.inputType = 1;
        app.AudiofileCheckBox.Enable = 0;
        app.SoundpressurelevelsCheckBox.Value = 0;
        app.SoundpressurelevelsCheckBox.Enable = 0;
        app.SoundfieldPanel.Visible = 1;
        app.MethodPanel.Visible = 1;
        app.InputAudiofilePanel.Visible = 1;
        app.InputCalibrationFilePanel.Visible = 1;
        app.ISPL_panel.Visible = 0;
    end
end
```

Pokud je zvoleno ze dvou možností volné (Free) nebo difúzní (Diffuse) zvukové pole, může být zvolena právě jedna hodnota a zároveň je daná hodnota zapsána do tzv. celoaplikační proměnné dle výpisu kódu 3.18.

Výpis kódu 3.18: Definování funkčnosti zaškrtačacích polí Free a Diffuse

```
function FreeCheckBoxValueChanged(app, event)
    value = app.FreeCheckBox.Value;
    if value == 1
        app.DifuseCheckBox.Value = 0;
        app.field = 'free';
        app.fieldNum = 0;
    else
        app.DifuseCheckBox.Value = 1;
        app.field = 'diffuse';
        app.fieldNum = 1;
    end
end
```

Dále je definována funkčnost volby metody mezi stacionárními (Stationary) a časově proměnnými (Time varying) zvuky, a to podobným způsobem, jako volba zvukového pole. Do tzv. celoaplikační proměnné se tentokrát zapisuje hodnota metody dle výpisu kódu 3.19.

Výpis kódu 3.19: Definování funkčnosti zaškrtačacích polí Stationary a Time varying

```
function StationaryCheckBoxValueChanged(app, event)
    value = app.StationaryCheckBox.Value;
    if value == 1
        app.TimeVaryingCheckBox.Value = 0;
        app.method = 'stationary';
        app.methodNum = 0;
        app.ModulationfrequencyPanel.Visible = 0;
        app.Results.Layout.Row = 7;
        app.Results.Layout.Column = 2;
    else
        app.TimeVaryingCheckBox.Value = 1;
        app.method = 'varying';
        app.methodNum = 1;
        app.ModulationfrequencyPanel.Visible = 1;
        app.Results.Layout.Row = 8;
        app.Results.Layout.Column = 2;
    end
end
```

Za předpokladu, že je zvolen zvukový soubor tlačítkem Choose file, je načten funkcí audioread [24] soubor s názvem daného souboru a jeho umístěním. Dále je zviditelněno tlačítko přehrát soubor. Pro přehrání zvukového souboru je využita funkce sound [9]. Obdobné se týká načtení kalibračního souboru, tentokrát bez možnosti přehrání. Volba zvukového souboru tlačítkem Choose file je přiblížena ve výpisu kódu 3.20.

### Výpis kódu 3.20: Definování funkčnosti tlačítka Choose file

```
function ChooseAudioFileButtonPushed(app, event)
    [file,location] = uigetfile...
        ('*.aifc;*.aiff;*.aif;*.au;*.flac;*.ogg;*.opus;*.wav');
    [app.audio,app.fs] = audioread(strcat(location,file));
    app.FileName.Visible = 1;
    app.FileName.Text = file;
    app.PlayFileButton.Visible = 1;
    drawnow;
    figure(app.UIFigure)

    if ~isempty(app.audio) && ~isempty(app.calibrationAudio)
        app.Results.Visible = 1;
    end
end
```

V momentě kliknutí na tlačítko pro získání výsledků (Get results) je zakázáno jakékoliv další manipulování se vstupními parametry uživatelského rozhraní pomocí funkce Enable [6]. Za jediný přístupný segmentem lze považovat tlačítko pro export výsledků (Export result). Kromě toho funkce GetresultsButtonPushed v uživatelském rozhraní rozhodne, jestli je třeba použít funkci *mvjrFilters* (v závislosti na typu vstupních dat). Díky tomu jsou získány hodnoty hladin akustického tlaku v třetinooktávových pásmech (Third octave levels) v dB. Jestliže je oproti tomu zvolené pole pro ruční zadávání čísel (Sound pressure levels), hladiny akustického tlaku pro daná třetinooktávová pásma jsou přebírána tímto způsobem. Při pokračování dané funkce GetresultsButtonPushed jsou volány vlastní funkce *mvjrLoudness* (kapitola 3.1.2), *mvjrSharpness* (kapitola 3.2.1), *mvjrFluctuation* (kapitola 3.3.1) a *mvjrRoughness* (kapitola 3.4.1) se svými vstupními a výstupními argumenty. Ku příkladu výstupní hodnota *spec\_n* je následně využívána pro výpočet dalších psychoakustických metrik. Tento popis vychází z výpisu kódu 3.21.

### Výpis kódu 3.21: Definování funkčnosti tlačítka Get results

```
function GetresultsButtonPushed(app, event)
    app.DifuseCheckBox.Enable = 0;
    app.FreeCheckBox.Enable = 0;
    app.ChooseAudioFileButton.Enable = 0;
    app.ChooseCalibrationFileButton.Enable = 0;
    app.CalibrationLevelEditField.Enable = 0;
    app.GetresultsButton.Enable = 0;
    app.StationaryCheckBox.Enable = 0;
    app.TimeVaryingCheckBox.Enable = 0;
    app.f_modEditField.Enable = 0;
    app.ExportResultButton.Visible = 1;

    if app.AudiofileCheckBox.Value == 1
        ThirdOctaveLevel = mvjrFilters...
            (app.audio,app.fs,app.calibrationAudio,...
            app.calibrationNumber,app.methodNum);
    end
end
```

```

else
    app.methodNum = 0;
    ThirdOctaveLevel(1,1) = app.HzEditField_25Hz.Value;
    ThirdOctaveLevel(1,2) = app.HzEditField_31_5Hz.Value;
    ThirdOctaveLevel(1,3) = app.HzEditField_40Hz.Value;
    ThirdOctaveLevel(1,4) = app.HzEditField_50Hz.Value;
    ThirdOctaveLevel(1,5) = app.HzEditField_63Hz.Value;
    %zkráceno pro názorné zobrazení
end

[app.loudnessValue1,app.loudnessValue2,spec_n,...
 totalLoudness] = mvjrLoudness(app.inputType,app.audio,...
 app.fs,ThirdOctaveLevel,app.methodNum,app.fieldNum);

app.sharpness = mvjrSharpness(spec_n,app.methodNum);

app.fluctuation = mvjrFluctuation(app.methodNum,spec_n,...
 app.f_modEditField.Value);

app.roughness = mvjrRoughness(app.methodNum,spec_n,...
 app.f_modEditField.Value);

```

Pod voláním daných funkcí se nachází vytvoření textu kvůli zobrazení výsledků. Matlab funkce `num2str` [10] převádí číselné hodnoty na textové. Připravené texty jsou směřovány do definovaných `app.LoudnessInSonesLabel.Text` apod. a vhodně skládány do vypisované tabulky v grafickém provedení uživatelského rozhraní dle výpisu kódu 3.22.

Výpis kódu 3.22: Vytvoření textu pro zobrazení výsledků

```

loudtextValue1 = num2str(app.loudnessValue1);
loudtextValue2 = num2str(app.loudnessValue2);
if app.methodNum == 0
    text1 = 'Loudness in sones/phones (';
elseif app.methodNum == 1
    text1 = 'Loudness Nmax/N5 (';
end
text2 = app.field;
text3 = ' field): ';
slashtext = '/';
app.LoudnessInSonesLabel.Text = [text1 text2 text3...
 loudtextValue1 slashtext loudtextValue2];
app.LoudnessInSonesLabel.Visible = 1;

```

Poslední Callback vlastního uživatelského rozhraní nastavuje exportování výsledků z tlačítka `Export results`. Jakmile jsou načteny a zapsány všechny uváděné texty (výsledky výpočtů všech psychoakustických metrik), znemožní se opakované zmáčknutí tohoto tlačítka a pojmenovaný soubor se uloží do příslušné složky počítače viz výpis kódu 3.23.

### Výpis kódu 3.23: Definování funkčnosti tlačítka Export results

```
function ExportResultButtonPushed(app, event)
    app.ExportResultButton.Enable = 0;
    cel{1,1} = app.FileName.Text;
    cel{3,1} = app.LoudnessInSonesLabel.Text;
    if app.methodNum == 0
        cel{4,1} = app.SharpnessLabel.Text;
    end
    filename = string(datetime...
        ('now', 'Format', 'yyyy_MM_dd_HH_mm_ss'));

    mkdir('Results', filename);
    newPath = append('Results\', filename);
    cd(newPath)
    writecell(cel, filename, 'Delimiter', '\t');
    exportgraphics(app.axLoud, 'Loudness.png')
    if app.methodNum == 1
        exportgraphics(app.axSharp, 'Sharpness.png')
    end
    if (app.inputType == 1) && (app.methodNum == 1)
        exportgraphics(app.axFluct, 'Fluctuation.png')
        exportgraphics(app.axRough, 'Roughness.png')
    end
end
```

## 4. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zaměřila na problematiku objektivního hodnocení kvality zvuku prostřednictvím psychoakustických metrik, které propojují měřitelné fyzikální parametry zvuku se subjektivním vnímáním lidského sluchového aparátu. Byly představeny klíčové psychoakustické metriky hlasitost (Loudness), ostrost (Sharpness), síla kolísání (Fluctuation Strength) a drsnost (Roughness) a byl popsán jejich význam v oblasti hodnocení kvality zvuku.

V praktické části byla provedena implementace těchto metrik ve výpočetním prostředí Matlab. Byly vytvořeny funkce `mvjrFilters`, `mvjrLoudness`, `mvjrSharpness`, `mvjrFluctuation` a `mvjrRoughness`, které umožňují výpočet jednotlivých metrik na základě vstupních zvukových souborů. Pro snadné použití byla navržena aplikace s uživatelským rozhraním, která usnadňuje výpočet psychoakustických metrik. Funkce `mvjrMatlabCheck` byla využita pro porovnání výsledků s referenčními funkcemi z Audio Toolbox Matlab.

Na základě testovacích dat byly získány výsledky výpočtů metrik, vložené do kapitoly 3.5, které byly dále porovnány s referenčními hodnotami. Jednotlivé výpočty vycházejí z přiložené literatury.

Rozdíl výsledných hodnot je patrný ihned, a to u výpočtu hlasitosti. Velikost odchylky mezi hodnotami závisí na vstupních datech, takže se pro každý vstupní soubor odchylka mění. Pravděpodobnou příčinou těchto rozdílů je nepřesný výpočet specifické hlasitosti, který je ovlivněn hodnotami boční a jádrové hlasitosti. Z uváděných grafů je zřejmé, že chyba souvisí s volbou strmosti sklonů při výpočtu boční hlasitosti a s přechodem na nižší hodnoty jádrové hlasitosti v analyzovaných vstupních souborech. V důsledku nepřesného výpočtu specifické hlasitosti jsou i další výsledky, které na tento výpočet navazují, v rozporu.

Psychoakustické metriky, jako jsou ostrost, síla kolísání a drsnost přebírají pro své hodnocení hodnoty vycházející z výpočtu hlasitosti. Z uvedených závěrů výpočtu ostrosti lze konstatovat, že rozdíl mezi porovnávanými hodnotami není u stacionárních zvuků příliš velký. Pro časově proměnné signály se však výsledné grafy významně liší. Totéž platí i pro výsledky ostatních metrik. Pravděpodobnou příčinou těchto rozdílů jsou nepřesnosti ve vstupních datech, které vycházejí z předchozího výpočtu hlasitosti.

K výpočtu všech zde uváděných psychoakustických metrik existuje několik různých přístupů. Tato diplomová práce se zaměřuje pouze na jeden z těchto přístupů, vycházející z uvedené literatury. Pro další rozvoj této práce se nabízí ověření výpočtu specifické hlasitosti. Dále lze zvážit ověření výpočtů pomocí dalších veřejně dostupných metod a modelů. Nejvhodnější postup výpočtů by bylo vhodné standardizovat do České technické normy, která v současnosti zahrnuje pouze metody výpočtu hlasitosti.

## LITERATURA

- [1] *1-D digital filter*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/filter.html>. [cit. 2025-05-25].
- [2] *AcousticFluctuation*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/acousticfluctuation.html>. [cit. 2025-05-25].
- [3] *AcousticLoudness*. Online. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/audio/ref/acousticloudness.html#mw\\_2c911ba5-c8d7-40d0-bf87-886e2eed14f5](https://www.mathworks.com/help/audio/ref/acousticloudness.html#mw_2c911ba5-c8d7-40d0-bf87-886e2eed14f5). [cit. 2024-12-07].
- [4] *AcousticRoughness*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/acousticroughness.html>. [cit. 2025 05-25].
- [5] *AcousticSharpness*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/acousticsharpness.html>. [cit. 2025 05-25].
- [6] *Add enable port to subsystem or model*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/enable.html>. [cit. 2025-05-25].
- [7] *Chebyshev Type I*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2021a/dsp/ref/cheby1.html>. [cit. 2025-05-25].
- [8] *Conversion of sound units*. Online. Dostupné z: <https://sengpielaudio.com/calculator-soundlevel.htm>. [cit. 2025-05-25].
- [9] *Convert matrix of signal data to sound*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/sound.html>. [cit. 2025-05-25].
- [10] *Convert numbers to character array*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/num2str.html>. [cit. 2025-05-25].
- [11] ČSN ISO 1996-2:2017 – *Akustika – Popis, měření a hodnocení hluku prostředí. Část 2, Určování hladin akustického tlaku*
- [12] ČSN ISO 532-1 *Akustika – Metody výpočtu hlasitosti. Část 1, Zwickerova metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [13] *Decimation*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/decimate.html>. [cit. 2025-05-25].
- [14] FASTL, H. a ZWICKER, Eberhard. *Psychoacoustics: facts and models*. 3rd ed. Berlin: Springer, c2007. ISBN 978-3-540-23159-2.
- [15] *Lineární funkce*. Online. Dostupné z: <https://www.edufix.cz/clanky/stredni-skola/matematika/linearni-funkce>. [cit. 2025-05-25].
- [16] *Matlab App Designer*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>. [cit. 2025 05 25].

- [17] MELKA, Alois. *Základy experimentální psychoakustiky*. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. ISBN 80-7331-043-0.
- [18] MOORE, Brian C. J. *An introduction to the psychology of hearing*. 5th ed. Amsterdam: Academic Press, c2003. ISBN 0-12-505628-1.
- [19] *Nahráváme a mixujeme: umíte pracovat s drsností tónu?* Online. Dostupné z: <https://magazin.disk.cz/cs/nahravame-a-mixujeme-umite-pracovat-s-drsnosti-tonu>. [cit. 2025-05-25].
- [20] OSSES VECCHI, Alejandro. *Modelling the sensation of fluctuation strength*. 2017.
- [21] PŘEHNAL, Vojtěch. *Maximizace digitálního zvukového signálu*. Diplomová práce. Masarykova univerzita, 2010.
- [22] *PsychoacousticParametersMeasurer*. Online. Dostupné z: [https://github.com/AndreaCastiella/PsychoacousticParametersMeasurer/blob/main/loudness\\_ISO532.py](https://github.com/AndreaCastiella/PsychoacousticParametersMeasurer/blob/main/loudness_ISO532.py). [cit. 2025-05-25].
- [23] *Psychoakustika*. Online. Dostupné z: [https://fonetika.ff.cuni.cz/wp-content/uploads/sites/104/2016/06/3\\_psychoakustika.pdf](https://fonetika.ff.cuni.cz/wp-content/uploads/sites/104/2016/06/3_psychoakustika.pdf). [cit. 2025-05-25].
- [24] *Read audio file*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/audioread.html>. [cit. 2025-05-25].
- [25] *Son (akustika)*. Online. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Son\\_\(akustika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Son_(akustika)). [cit. 2024-12-07].
- [26] SONTACCHI, Alois. *Entwicklung eines Modulkonzeptes für die psychoakustische Geräuschanalyse unter MatLab*. Diplomová práce. Technischen Universität Graz, 1998.
- [27] *SplMeter*. Online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/audio/ref/splmeter-system-object.html>. [cit. 2024-12-07].
- [28] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. ISBN 978-80-7331-297-8.

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

## Symboly:

$A_1$	koeficient dolní propusti 1. řádu
$acum$	jednotka pro ostrost
$B_0$	koeficient dolní propusti 1. řádu
$bark$	jednotka kritického pásma
$dB$	decibel
$FFT$	Fourierova transformace
$f$	frekvence
$f_{mod}$	modulační frekvence
$f_s$	vzorkovací frekvence
$fon$	jednotka hladiny hlasitosti
$g$	váhová funkce pro výpočet ostrosti
$Hz$	hertz
$N_5$	hladina hlasitosti u časově proměnných signálů
$N_{max}$	hladina hlasitosti u časově proměnných signálů
$N_{min}$	minimální dílčí hlasitost
$N_{max}$	maximální dílčí hlasitost
$RNS$	tabulka hodnot
$S_{ef}$	efektivní hodnota kalibračního signálu
$SPL$	Sound Pressure Level
$spec_n$	specifická hlasitost
$USL$	tabulka hodnot
$ZUP$	tabulka hodnot
$z$	barková stupnice
$\tau$	časová konstanta dolní propusti

## **Příloha A - Seznam elektronických příloh**

- 1) Testovací signály – složka souborů
- 2) Hodnoty modulačního kmitočtu ( $f_{\text{mod}}$ ) pro testovací signály (.txt)
- 3) mvjrApp (.mlapp)
- 4) mvjrFilters (.m)
- 5) mvjrFluctuation (.m)
- 6) mvjrLoudness (.m)
- 7) mvjrMatlabCheck (.m)
- 8) mvjrRoughness (.m)
- 9) mvjrSharpness (.m)
- 10) README (.txt)