



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

HODNOCENÍ MASKOVÁNÍ HARMONICKÝCH SLOŽEK V MIXTUŘE

THE EVALUATION OF MASKING OF HARMONIC COMPONENTS IN A MIXTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jindřich Kovanda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

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

Student: Jindřich Kovanda

ID: 209408

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Hodnocení maskování harmonických složek v mixtuře

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci práce proveďte výzkum nejméně padesáti respondentů, ve kterém bude provedena analýza, jak se v různých konfiguracích maskují v lidském sluchu harmonické složky. Detailně se věnujte prvnímu pásmu od 1. po 8. harmonickou, vezte ale i v potaz druhé pásmo od 9. po 16. harmonickou. Sestavte poslechový dotazník, ve kterém budou proti sobě postaveny dvě stopy: vybrané konfigurace (shluky) harmonických složek v první stopě proti zkoumané harmonické složce ve stopě druhé. Respondent pak táhlem nastaví intenzitu zkoumané harmonické složky, kdy ji v rámci mixtury dokáže sluchem rozpoznat, tedy kdy není maskována ostatními. Test bude proveden pro různé dynamické hladiny. Mixturu harmonických složek stanovte podle poznatků o jakosti harmonického spektra, tedy složek sudých a lichých, o pásmech ve spektru ad. V potaz vezměte i poznatky o prahu citlivosti lidského ucha. Výsledkem práce bude tabulka, grafy, případně i zákonitosti, jak je čitelnost harmonické složky závislá na vlastní intenzitě a složení spektra z harmonických složek.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MELKA, Alois, Základy experimentální psychoakustiky. Praha: Akademie múzických umění v Praze, 2005. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 80-7331-043-0
- [2] SYROVÝ, Václav, Hudební akustika. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 práce zpracovává návrh a tvorbu poslechového testu, ve kterém jeho respondenti nastavovali určitou harmonickou složku do mixtury tónu složeného z až 16 harmonických složek. Respondenti nastavovali intenzitu harmonické složky do hraniční polohy tak, aby harmonická složka nebyla maskována ostatními harmonickými složkami a vystoupila z mixtury. Takto nastavovali respondenti harmonické složky od 1. do 16. vždy v různých typech spektra, výšky tónu a jeho intenzity. Na základě odpovědí byly nalezeny vztahy určující, jak se mění vnímání maskování harmonických složek s jejich pořadím ve spektru.

ABSTRACT

This thesis deals with design and creation of listening test in which its respondents were setting certain harmonic of the tone to mixture of up to 16 harmonics. The respondents were setting intensity of the harmonic to the border position, in which the harmonic was not masked by the other harmonics in the tone and in which the harmonic stood up from the mixture. The respondents were setting the harmonics from the first to sixteenth, in various types of the spectrum, pitch and intensity of the tone. Based on the results relations were found which determine how the perception of masking of harmonics vary with their order in the spectrum.

KLÍČOVÁ SLOVA

frekvence, intenzita, maskování, mixtura, poslechový test, vyšší harmonická složka,

KEYWORDS

frequency, intensity, masking, mixture, listening test, harmonic

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOVANDA, Jindřich. *Hodnocení maskování harmonických složek v mixtuře*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138965>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Hodnocení maskování harmonických složek v mixtuře“. Vzor jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	8
1. ÚVOD.....	9
2. TEORETICKÝ ÚVOD.....	10
2.1 MASKOVÁNÍ	10
2.2 FREKVENČNÍ VLASTNOSTI HUDEBNÍHO SIGNÁLU	10
2.3 VÝCHOZÍ TEORIE BARVY ZVUKU	11
2.4 FORMANTOVÉ OBLASTI.....	12
2.4.1 Frekvenčně pohyblivý formant.....	12
2.4.2 Frekvenčně pevný formant.....	12
2.5 VÁHOVÉ FILTRY	12
2.6 ADITIVNÍ SYNTÉZA	13
2.6.1 Harmonická syntéza.....	13
3. OČEKÁVÁNÍ A PŘEDPOKLADY	14
4. TVORBA POSLECHOVÉHO TESTU.....	15
4.1 PROGRAMOVÁNÍ POSLECHOVÉHO TESTU.....	15
4.2 SESTAVENÍ OTÁZEK	18
4.2.1 1. otázka.....	19
4.2.2 2. otázka.....	20
4.2.3 6. otázka.....	21
4.2.4 7. otázka.....	22
4.2.5 8. otázka.....	23
4.2.6 16. otázka.....	24
4.2.7 17. otázka.....	25
4.2.8 29. otázka.....	26
4.2.9 34. otázka.....	27
4.2.10 37. otázka.....	28
5. TESTOVÁNÍ.....	29
5.1 RESPONDENTI	29
5.2 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ.....	29
5.3 POUŽITÉ VYBAVENÍ.....	30
5.4 PŘEPOČET DECIBELŮ.....	30
6. ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT.....	32
6.1 PRINCIP ZPRACOVÁNÍ DAT	32
6.2 VÝPOČET STATISTICKÝCH VELIČIN	32
6.2.1 Interval spolehlivosti	32
6.2.2 Váhová funkce.....	33
6.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	34
6.4 SHRNUTÍ	41
7. ZÁVĚR	42
LITERATURA	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1: Sinusové oscilátory sečtené v programu Reaktor 6.....	16
Obr. 4.2 Táhla nastavující intenzitu jednotlivých harmonických složek	17
Obr. 4.3: Spektrum zodpovězené 1. otázky	19
Obr. 4.4: spektrum zodpovězené 2. otázky	20
Obr. 4.5: Spektrum zodpovězené 6. otázky	21
Obr. 4.6: Spektrum zodpovězené 7. otázky	22
Obr. 4.7: Spektrum zodpovězené 8. otázky	23
Obr. 4.8: Spektrum zodpovězené 16. otázky	24
Obr. 4.9: Spektrum zodpovězené 17. otázky	25
Obr. 4.10: Spektrum zodpovězené 29. otázky	26
Obr. 4.11: Spektrum zodpovězené 34. otázky	27
Obr. 4.12: Spektrum zodpovězené 37. otázky	28
Obr. 5.1: Graf počtu respondentů v kategoriích	29
Obr. 5.2: Kmitočtová odezva testovacího vybavení	30
Obr. 6.1: Graf výsledků v lichém spektru.....	34
Obr. 6.2: Graf výsledků v sudém spektru	34
Obr. 6.3: Graf výsledků v plném spektru	35
Obr. 6.4: Graf výsledků v každém spektru	36
Obr. 6.5: Graf výsledků v lichém spektru.....	37
Obr. 6.6: Graf výsledků v lichém spektru.....	37
Obr. 6.7: Graf výsledků v sudém spektru	38
Obr. 6.8: Graf výsledků v sudém spektru	39
Obr. 6.9: Graf výsledků v plném spektru	40
Obr. 6.10: Graf poměru nastavované složky a fundamentu.....	40
Obr. 6.11: Graf porovnání složek s různou frekvencí a intenzitou	41

SEZNAM TABULEK

Tab. 4. 1: Jednotlivé otázky poslechového testu a příslušné frekvence, na kterých byly jednotlivé harmonické složky nastavovány.	18
---	----

1. ÚVOD

Práce se zabývá vnímáním vyšších harmonických složek ve zvuku lidským sluchem, konkrétně jejich maskováním. Zkoumání se vymezuje na prvních 16 harmonických složek, detailněji pak popisuje prvních 8. Za tímto účelem byl zhotoven a proveden poslechový test, kde respondenti nastavovali určité harmonické složky v tónu složeném ostatních 16 harmonických složek do úrovně, kde nejsou tónem maskovány a jsou slyšet jako samostatně znějící tón. Konfigurace jednotlivých otázek poslechového testu se liší jak frekvencemi, tak intenzitami a složením spektra. V testu jsou rozlišeny tři typy spektra a to sudé, liché a plné, podle toho, které harmonické složky spektrum tvoří. Získané výsledky následně podrobeny korekci podle prahu citlivosti lidského ucha a následně v grafech položeny do vztahů, které ukazují, jak je která harmonická složka vnímaná, potažmo jak se která harmonická složka maskuje v různých spektrech tónu.

Cílová skupina této práce jsou lidé, kteří se zabývají vnímáním zvuku, jeho tvorbou a použitím. Výzkum této práce by měl této skupině objasnit pravidla a vztahy vnímání jednotlivých harmonických složek v různých tónech, zejména jejich maskování.

2. TEORETICKÝ ÚVOD

2.1 Maskování

Jev, kdy znění určitého tónu vyvolá posuv sluchového prahu k vyšším hodnotám. Vjem dalších zvuků o nižší intenzitě proto může být zeslaben nebo úplně potlačen. Maskování souvisí s činností nervových buněk, které se při podráždění ocitnou ve stavu, kdy nejsou schopny přijmout další signál. Maskující tón aktivuje určitou část bazilární membrány. Pokud další tón zasáhne stejnou oblast dojde k jeho maskování. Tento účinek je většinou největší kolem frekvence maskujícího tónu. Pro nízké hladiny maskujícího tónu, 40-50 dB, je účinek maskování souměrný na obě strany frekvenční osy od frekvence maskujícího tónu. Při vyšších hladinách se účinek maskování rozšíří na vysoké tóny, vlivem aurálních tónů a také vlivem častější aktivace nervových buněk pro vyšší frekvence v důsledku směru postupující vlny podél Cortiho orgánu od vysokých frekvencí k nízkým.

Aurální tóny jsou lidským mozkem domnělé tóny, vznikající jako společné vyšší harmonické složky více tónů

Cortiho orgán se nachází v přepážce hlemýžďe vnitřního ucha. Obsahuje sluchové receptory, v nichž je převáděna mechanická energie zvukové vlny na elektrický signál vedený na vlákna sluchového nervu. Bazilární membrána Cortiho orgánu přenáší pomocí rozkmitání zvukovou vlnou informaci na sluchové receptory.

Maskovací křivka udává o kolik se posune sluchový práh čistých tónů oproti normě v přítomnosti maskujícího tónu o určité hladině akustického tlaku. Největší maskování ale nenastává v těsné blízkosti frekvencí, protože identifikaci maskovaného tónu zjednodušují vznikající rázy s maskujícím tónem. [2]

2.2 Frekvenční vlastnosti hudebního signálu

Zvuk lze analyzovat pomocí Fourierových řad na amplitudově frekvenční spektrum. Periodické signály se vyznačují spektrem s diskrétními oddělenými složkami, které vzájemně zaujímají harmonické vztahy.

Základní psychoakustický zákon říká, že lidské ucho vnímá pravidelné kmitání částic vzduchu jako jednoduchý tón a každé jiné periodické kmitání těchto částic rozkládá v řadu jednotlivých kmitů a vnímá k nim odpovídající řadu jednoduchých tónů. U periodických kmitů tedy ucho pracuje jako frekvenční analyzátor a vyhodnocuje frekvence a amplitudy dílčích kmitů, které buď slyší odděleně jako více jednotlivých tónů nebo jednotlivé kmity mají vliv na celkový vjem ucha, barvu tónu. Při tomto vjemu ucho neregistruje fáze dílčích kmitů. [2]

2.3 Výchozí teorie barvy zvuku

Na základě zkoumání nejrůznějších tónů definoval H. von Helmholtz základní vztahy mezi typem spektra tónu a vjemem jeho barvy:

Jednoduché tóny sinusového charakteru jsou vnímány velmi měkce, bez jakékoliv drsnosti.

V hluboké poloze temně a tupě.

Komplexní tóny tvořené řadou přibližně do 6. harmonické složky jsou plné a oproti jednoduchým tónům jsou zvukově bohatší a okázalejší. Absence vyšších harmonických složek způsobuje jejich měkkost.

Komplexní tóny tvořené řadou pouze lichých harmonických složek znějí dutě a při větším počtu harmonických složek nasálně.

Tóny v jejichž spektru převažuje první harmonická složka, takzvaný fundament, jsou v barvě plné, v opačném případě, kdy dominují vyšší harmonické složky, je jejich zvuk prázdný a úzký.

Tóny s intenzivními harmonickými složkami v pořadí nad 6. a 7. mají barvu ostrou, drsnou. Stupeň ostrosti bývá charakteristický pro různé složení vyšších harmonických složek v závislosti například na materiálu hudebního nástroje, kdy jednotlivé materiály zřetelně odlišuje.

Představitel psychoakustiky C. Stumpf přiřadil jednoduchému sinusovému tónu atribut světlosti, tedy hluboký sinusový tón je tmavý a vysoký tón je světlý. Komplexní mu tónu přiřadil párové pojmy tmavý – světlý, tupý – ostrý a dutý – plný.

E. Schumannna základě dlouholetých analýz zvuku sestavil zákony barvy zvuku:

Zákon formantových oblastí – Barva zvuku není závislá na výšce fundamentu, ale na pevné frekvenční poloze formantových oblastí. Při stoupající výšce tónu setrvává intenzitní maximum na příslušném harmonickém tónu, dokud se nachází ve formantové oblasti.

Zákon formantových intervalů – Pro barvu zvuku je také rozhodující interval mezi jednotlivých formantovými oblastmi. Tyto vzdálenosti bývají charakteristické pro různé hudební nástroje.

Zákon akustického posuvu – Při stoupající dynamice tónu se posouvá intenzivní maximum v dané formantové oblasti na harmonické složky s vyšším pořadovým číslem. Obecně jsou složky v horní části formantové oblasti silnější než v nižší.

Zákon akustického skoku – U tónu se dvěma formantovými oblastmi přeskakuje při velkém zesílení intenzitní maximum nalézající se při slabé dynamice v nižší formantové oblasti na harmonický tón nalézající se ve vyšší oblasti.

Tyto zákony vymezují takzvaný formant, harmonickou oblast s konkrétními dominantními harmonickými složkami, také vysvětlují závislost barvy tónu na jeho výšce a dynamice. [2]

2.4 Formantové oblasti

Formant je složka ve spektru tónu, která je zesílená na základě fyzických rozměrů a dispozic zdroje zvuku. Formanty vznikají rezonancí určitých frekvencí tónu v rezonátoru. Formantové oblasti jsou oblasti kolem nejvíce zvýrazněné frekvence, které jsou stejným principem také zvýrazněny. Formantové oblasti specificky ovlivňují barvu tónu.

2.4.1 Frekvenčně pohyblivý formant

Formant, jehož oblast se pohybuje stejnoměrně s výškou tónu. Může ho způsobovat například proměnný objem a tvar artikulačního ústrojí lidského hlasu. U lidského hlasu se formanty nemění pouze frekvenčně, ale také na základě artikulace.

2.4.2 Frekvenčně pevný formant

U hudebních nástrojů je barva tónu dána v celém rozsahu relativními poměry vyšších harmonických složek v jeho neměnném spektru. S měnící se výškou tónu zůstávají formantové oblasti frekvenčně neměnné, tudíž přechází na harmonické složky jiných pořadových čísel. [2]

2.5 Váhové filtry

Citlivost lidského sluchu je různá při různých kmitočtech. K přepočítání hladiny zvuku na úroveň, jak ji vnímá lidský sluch se používají váhové filtry. Funkce váhových filtrů jsou odvozeny od toho, jaký akustický tlak působí stejný vjem při různých kmitočtech jako referenční tón na 1 kHz. Pro různé hlasitosti udávané ve fonech, je slyšení různé, a tedy i křivky stejné hlasitosti se liší. Kmitočtové charakteristiky váhových filtrů jsou inverzní ke křivkám stejné hlasitosti, a udávají, jaká hodnota se přičítá k určité frekvenci pro vykompenzování rozdílného vnímání různých frekvencí. Takovéto křivky se nazývají korekční.

Filtr A má kmitočtovou charakteristiku inverzní ke křivce hlasitosti 40 Ph. Jeho kmitočtová charakteristika se realizuje dvěma póly na nízkém kmitočtu, dvěma póly na vysokém kmitočtu a dvěma vázanými horními propustmi prvního řádu. Váhová funkce A se vypočítá z rovnice:

$$A(f) = 20 \cdot \log \frac{12200^2 \cdot f^2}{(f^2 + 20,6^2) \sqrt{(f^2 + 107,7^2)} \sqrt{(f^2 + 737,9^2)} (f^2 + 12200^2)} - A_{1000} \quad (2.1)$$

Kde hodnoty 12200, 20,6 107,7 a 737,9 Hz jsou frekvence pólů filtru, F je frekvence a A_{1000} je normující konstanta v dB, kdy je zisk 0 dB na kmitočtu 1000 Hz. [3]

2.6 Aditivní syntéza

Aditivní syntéza je druh syntézy, kdy je zvuk tvořen jednotlivými periodickými signály, které jsou následně sečteny. Vychází z teorie Fourierovy řady, která říká, že jakýkoli periodický signál se dá rozložit na řadu sinusových signálů o různých frekvencích a amplitudách. Aditivní syntéza může teoreticky sčítat jakékoli periodické signály

2.6.1 Harmonická syntéza

Harmonická syntéza je případ syntézy aditivní, která sčítá pouze harmonické signály. Harmonická syntéza tedy obrací postup Fourierovy řady a pomocí sčítání harmonických signálů o různé frekvenci, intenzitě a fázi a vytváří zvuk. Teoreticky se dá tedy pomocí Harmonické syntézy reprodukovat libovolný zvuk.

Často je harmonická syntéza používána k tvoření harmonického spektra, kde mají jednotlivé sčítané složky frekvenci v celočíselných násobcích fundamentu. Tak jednotlivé složky reprezentují vyšší harmonické složky v tónech. [4]

3. OČEKÁVÁNÍ A PŘEDPOKLADY

Od výsledků poslechového testu je očekáváno, že budou potvrzovat následující předpoklady: Čím blíže je maskovaná složka té maskovací, tím je více maskovaná a bude potřeba ji nastavit na vyšší úroveň. Čím menší je rozdíl frekvencí maskující a maskované složky tím hůře je pak maskovaná složka rozpoznatelná. Proto nejvíce maskují sousední harmonické složky v tónu a čím vyšší pořadí má harmonická složka, tím blíže je k ní její sousední harmonická složka. Rozdíl jejich frekvencí je menší.

Čím bude harmonické spektrum hustší, tím bude nastavovaná složka hůře rozpoznatelná. Z podobného důvodu jako u prvního předpokladu bude maskovaný tón při hustším spektru hůře rozpoznatelný. Čím více zvukových vjemů na sluchový orgán dopadá, tím je zahlcenější, a tím hůře budou maskované složky rozpoznatelné.

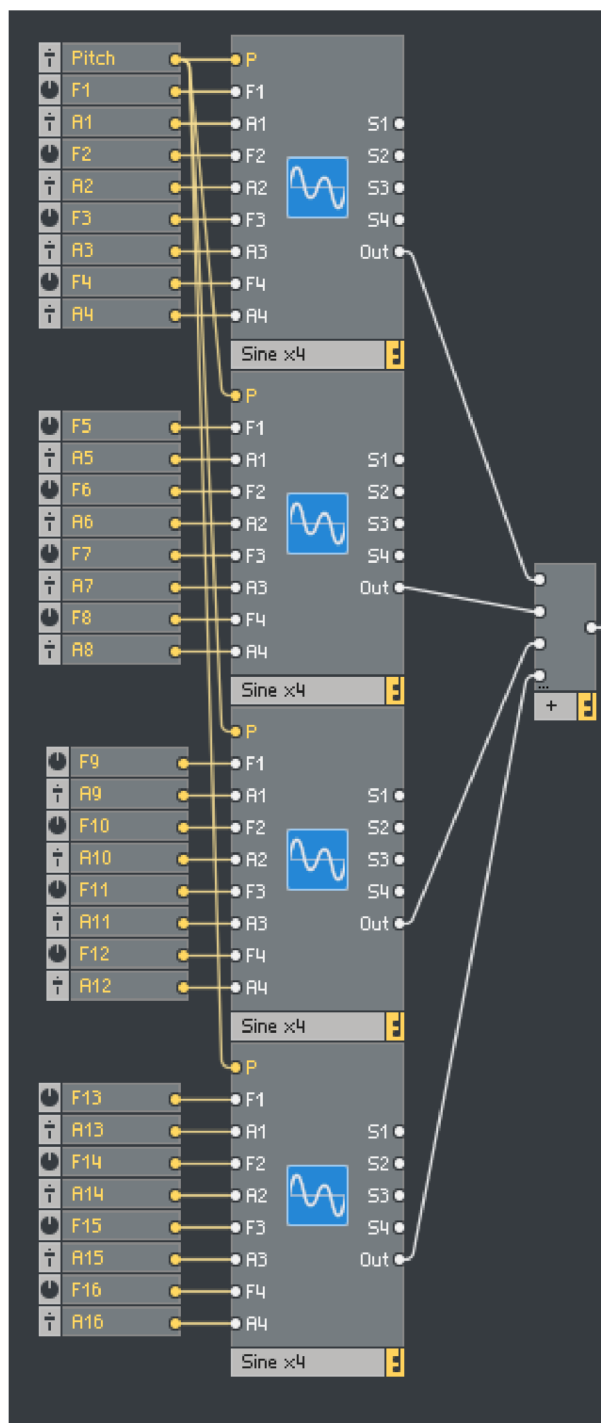
V sudém spektru budou sudé složky hůře rozpoznatelné než ty liché. Ve spektru, kdy jednotlivé harmonické složky, jejichž frekvence je vždy násobek té předchozí, bude složka, která toto pravidlo nespĺňuje vyčnívat.

4. TVORBA POSLECHOVÉHO TESTU

4.1 Programování poslechového testu

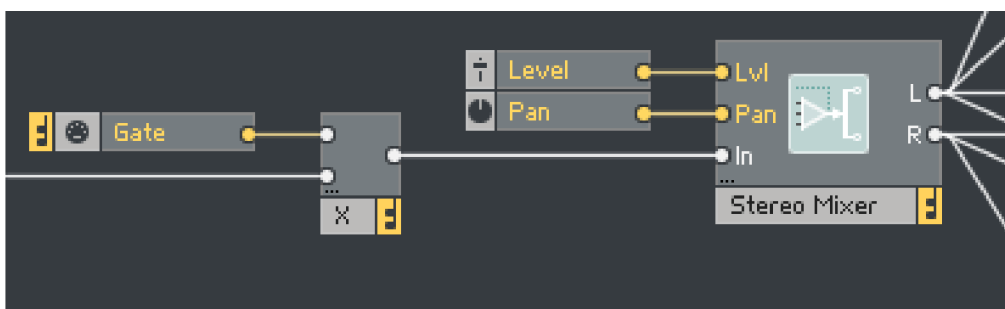
Poslechový test byl vytvořen a realizován a programu Reaktor 6. na principu harmonické syntézy. Pomocí 4 sinusových oscilátorů, generující každý 4 samostatně nastavitelné signály sinus a jejich sečtením byl vytvořen zvuk, na základě principů aditivní syntézy. U oscilátorů byla nastavena hodnota pitch, udávaná v čísle MIDI noty, která udává výšku tónu, potom násobek frekvence náležící k tónu nastaveného hodnotou pitch.

Násobky byly zvoleny 1 až 16, aby reprezentovaly jednotlivé harmonické složky výsledného zvuku. Tato hodnota byla nastavena parametrem f , tedy f_1 až f_{16} . Ke každé této složce náleží také parametr A , představující intenzitu. Jeho hodnota se pohybuje od 0 do 1. Pomocí ovladačů této hodnoty byly jednotlivé tóny tvořeny.



Obr. 4.1: Sinusové oscilátory sečtené v programu Reaktor 6

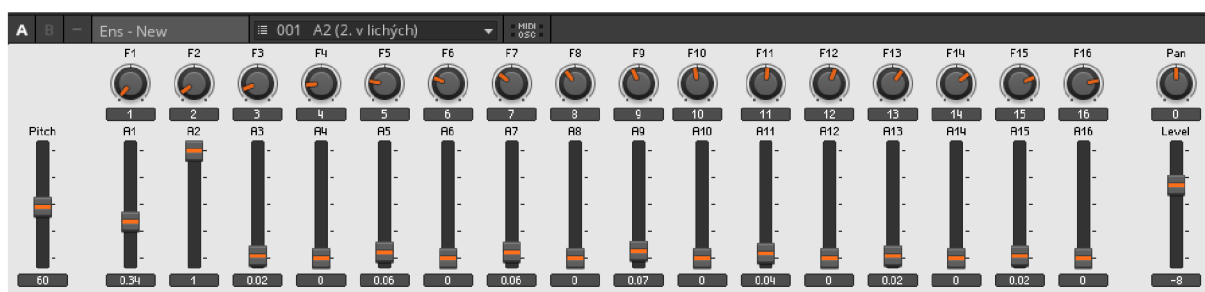
Výstupy zmíněných 4 oscilátorů byly sečteny, přivedeny na MIDI vstup „gate“, který umožňuje zahrát zvuk stisknutím klávesy, dále přiveden do stereo mixeru, kde je nastavitelná hodnota pan a level. Parametr pan, určující rozložení zvuku v pravém a levém kanálu zůstal na neutrální hodnotě 0. Ovladačem parametru level byla nastavena úroveň intenzity zvuku, konkrétně na hodnoty -8 dB a -10 dB v určitých případech.



Obr. 4.2: „gate“ a stereo mixer v programu Reaktor 6

Jednotlivé otázky poslechového testu byly tvořeny tak, že byla nastavena výška fundamentu pomocí parametru „pitch“, dále pak pomocí parametrů A byly nastaveny harmonické složky tónu kromě požadované harmonické složky, kterou měl dle zadání nastavit respondent. Tato hodnota byla ve výchozí podobě nastavena na úroveň 1.

Jednotlivé otázky se od sebe odlišují požadovanou harmonickou složkou, výškou fundamentu, nastavením intenzit jednotlivých harmonických složek a celkovou hlasitostí nastavenou parametrem level. Hodnoty těchto parametrů byly uloženy pomocí takzvaných „snapshotů“, záložek v levé části programu Reaktor 6.



Obr. 4.2 Táhla nastavující intenzitu jednotlivých harmonických složek

4.2 Sestavení otázek

Jednotlivé otázky byly sestavovány tak, že nejprve respondenti nastavovali postupně 2. až 16. harmonickou složku s tím, že spektrum tónu bylo vždy složeno buď pouze ze sudých harmonických složek nebo pouze z lichých harmonických složek nebo ze všech 15 zbývajících harmonických složek. Taková konfigurace byla potom označena jako klastr.

Po nastavení 16. harmonické složky se otázky vrací k nastavování 2. až 8. harmonické složky. Jednotlivá harmonická složka se vždy vrací dvakrát, a to ve zbývajících dvou konfiguracích. Pokud byla tedy dříve doplněna do lichého spektra je nyní doplněna do sudého a následně do klastru.

Po těchto otázkách se dotazník vrací k 5 předchozím konfiguracím pouze se změnou celkové výšky a hlasitosti. Hlasitost u opakovaných otázek byla snížena o 2 dB.

Tab. 4. 1: Jednotlivé otázky poslechového testu a příslušné frekvence, na kterých byly jednotlivé harmonické složky nastavovány.

Otázky	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	
frekvence HS (Hz)	523,2511	415,3047	1663,096	824,0689	494,4413	2907,133	1108,731	6286,108	873,0706	960,3776	2963,3	
12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.
3210,241	10359,84	1852,062	2637,02	523,2511	932,3275	349,6228	330	932,3275	1318,51	1100	489,9943	1663,096
25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	32.	33.	34.	35.	36.	37.
4439,933	2589,961	4434,922	4434,922	988,8827	554,9916	4111,307	987,7666	4153,047	174,6141	277,1826	277,1826	466,1638

V závěrečných 4 otázkách je všech 3 konfigurací doplněn fundament. Poslední konfigurace, fundament v klastru, je zopakována se změněnou výškou a intenzitou.

Testování probíhalo pod mým dohledem po vysvětlení problematiky dotazníku. Respondentům byl při testování poskytnut i návod a princip testování napsaný v samotném prostření Reaktor.

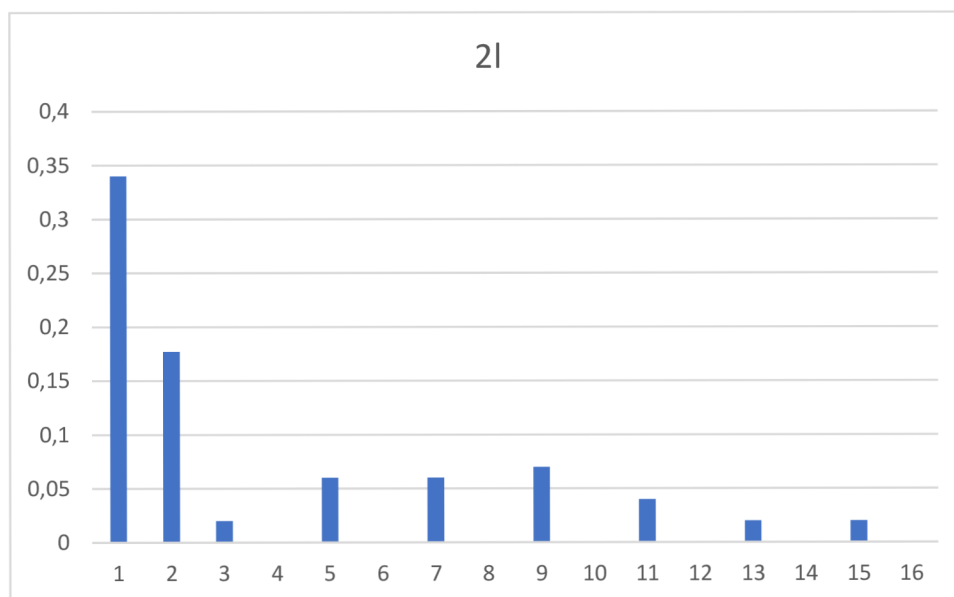
Otázky byly označeny vždy číslem, vyjadřující pořadí nastavované harmonické složky a písmenem, označující typ spektra, „s“ suché, „l“ liché nebo „k“ klastr.

Samotná spektra byla tvořena tak, aby jiná vyšší harmonická složka nevyčnívala z mixtury, a tak nemátla respondenty v rozpoznávání ní té vyšší harmonické složky, kterou skutečně měli nastavit. Intenzita vyšších harmonických složek ve spektru byla také nastavena tak, aby se ve spektru objevovali formantové oblasti, a zvuk se tak přiblížil reálným zvukům.

4.2.1 1. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 2. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



Obr. 4.3: Spektrum zodpovězené 1. otázky

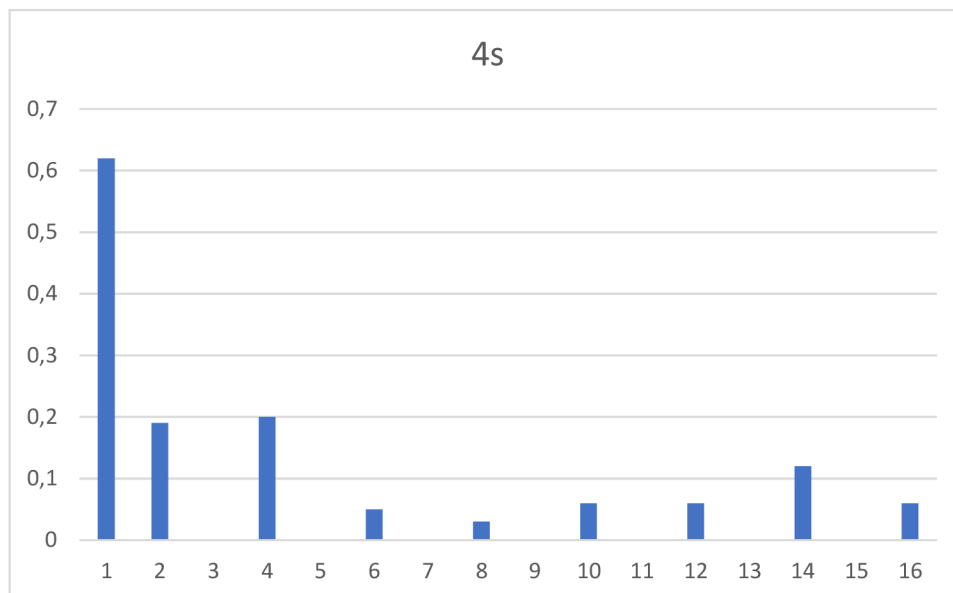
Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 2.

Další 4 otázky byly obdobně zhotoveny a zodpovězeny pro 3. až 6. harmonickou složku v sudém nebo lichém spektru.

4.2.2 2. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 4. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



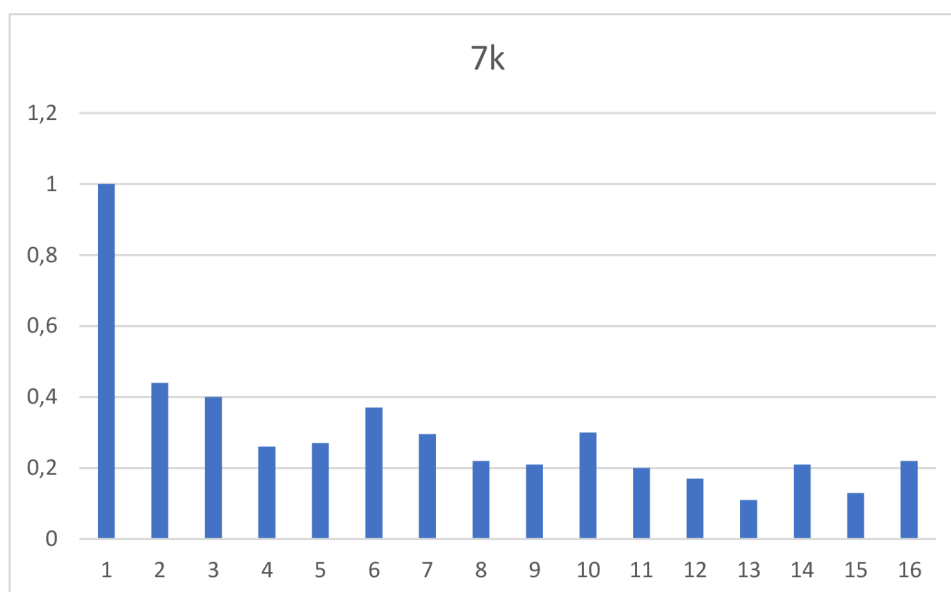
Obr. 4.4: spektrum zodpovězené 2. otázky

Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 4.

4.2.3 6. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 7. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



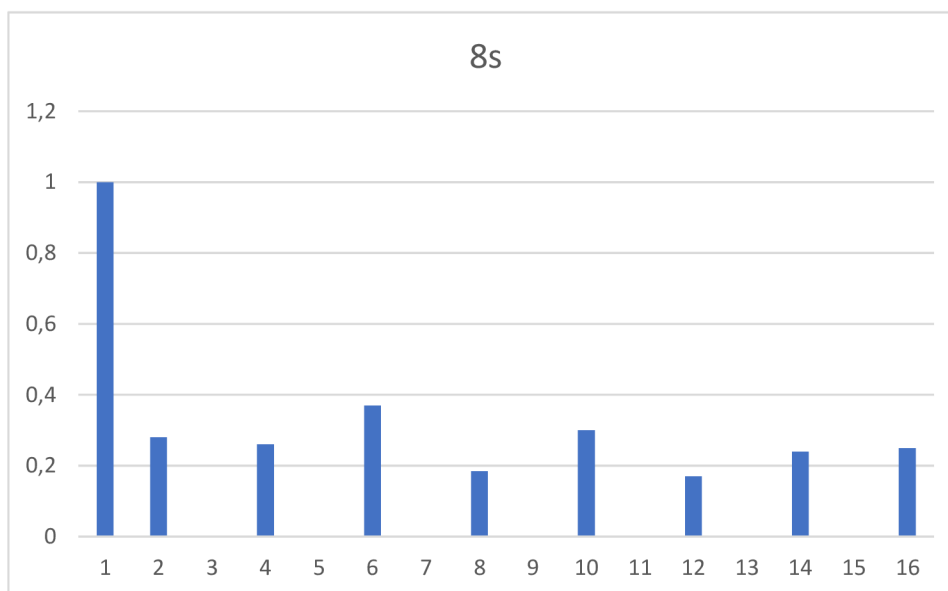
Obr. 4.5: Spektrum zodpovězené 6. otázky

Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 7.

4.2.4 7. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 8. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



Obr. 4.6: Spektrum zodpovězené 7. otázky

Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 8.

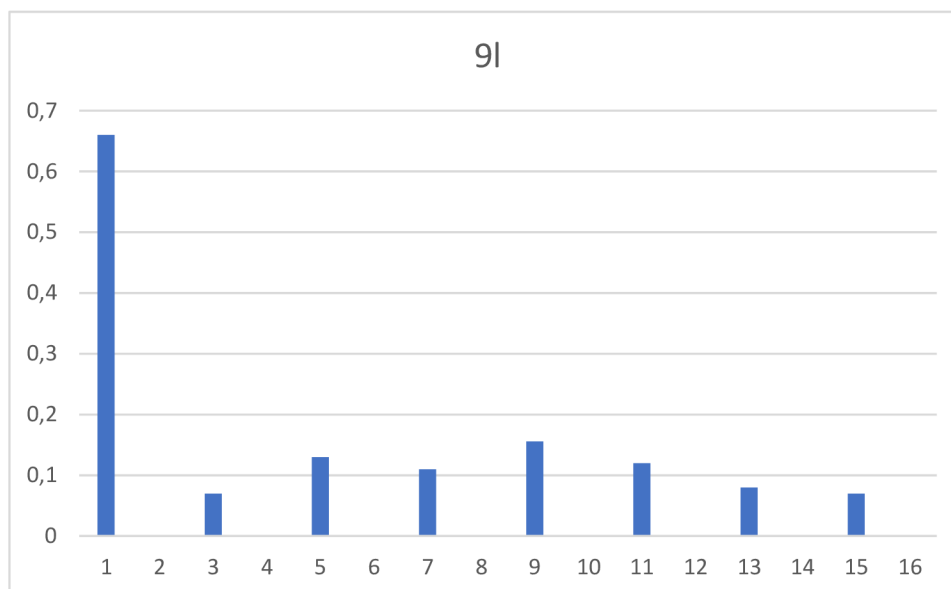
7. otázka se zabývá 8. harmonickou složkou v sudém spektru

Následujících 9 otázek se obdobným způsobem věnuje 9. až 16. harmonické složce.

4.2.5 8. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 9. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



Obr. 4.7: Spektrum zodpovězené 8. otázky

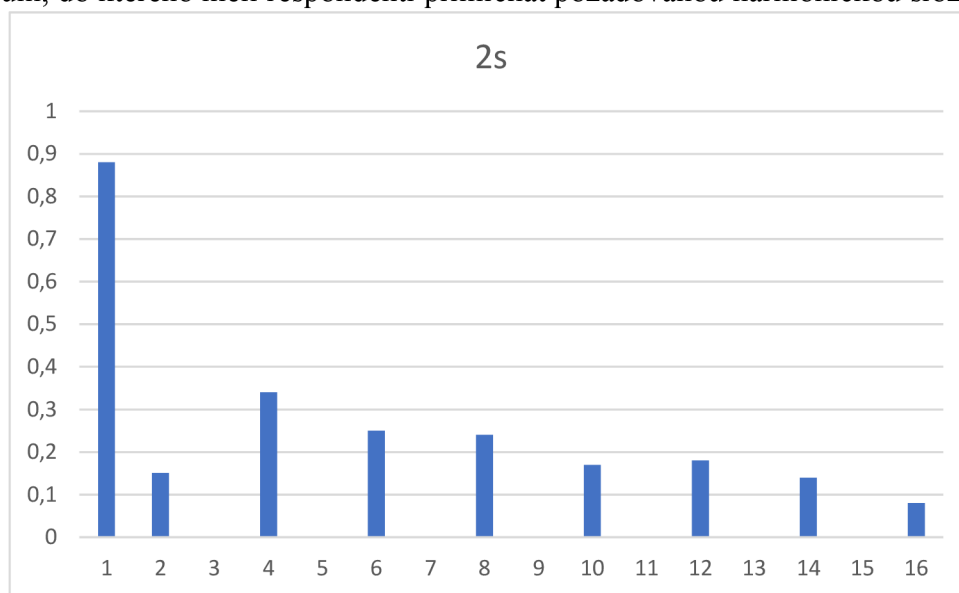
Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 9.

16. až 28. otázka se zabývá opět 2. až 8. harmonickou složkou, ve spektru vždy jiném, než v kterém byla daná harmonická složka v předchozích otázkách. Otázka zabývající se 7. harmonickou složkou je pouze v lichém spektru.

4.2.6 16. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 2. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



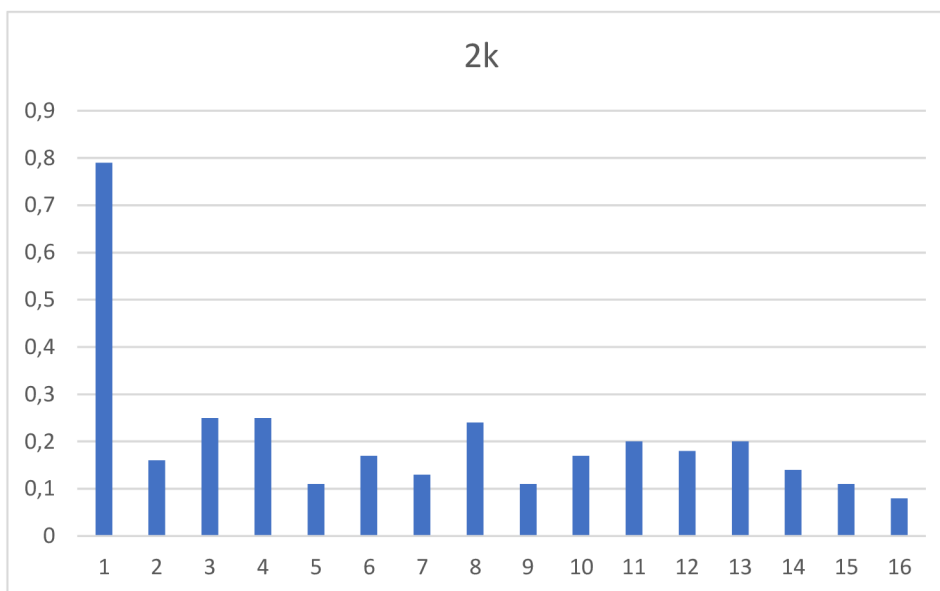
Obr. 4.8: Spektrum zodpovězené 16. otázky

Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 2.

4.2.7 17. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 2. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



Obr. 4.9: Spektrum zodpovězené 17. otázky

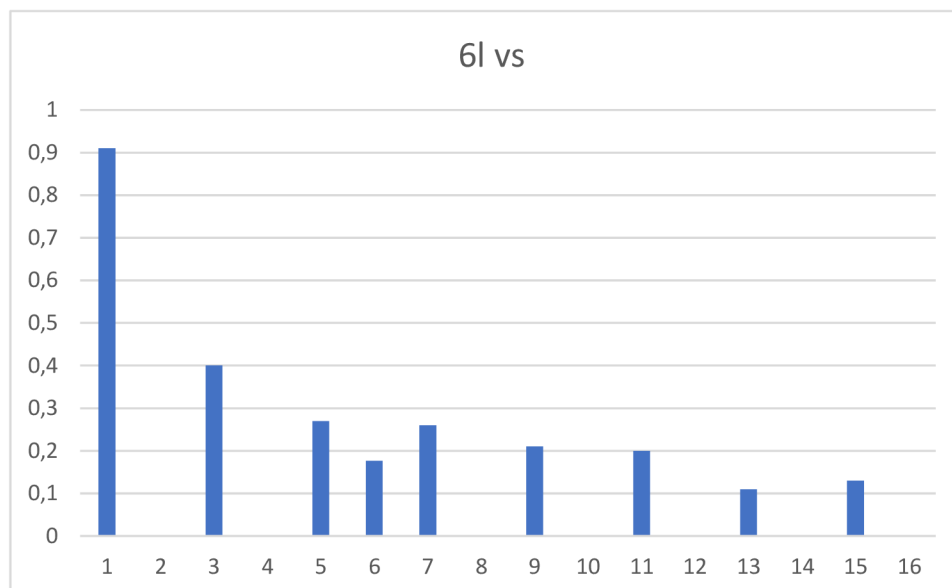
Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 2.

Následujících 5 otázek se vrací k několika předchozím otázkám, pouze zde byla snížena intenzita a změněna frekvence tónu.

4.2.8 29. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 6. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



Obr. 4.10: Spektrum zodpovězené 29. otázky

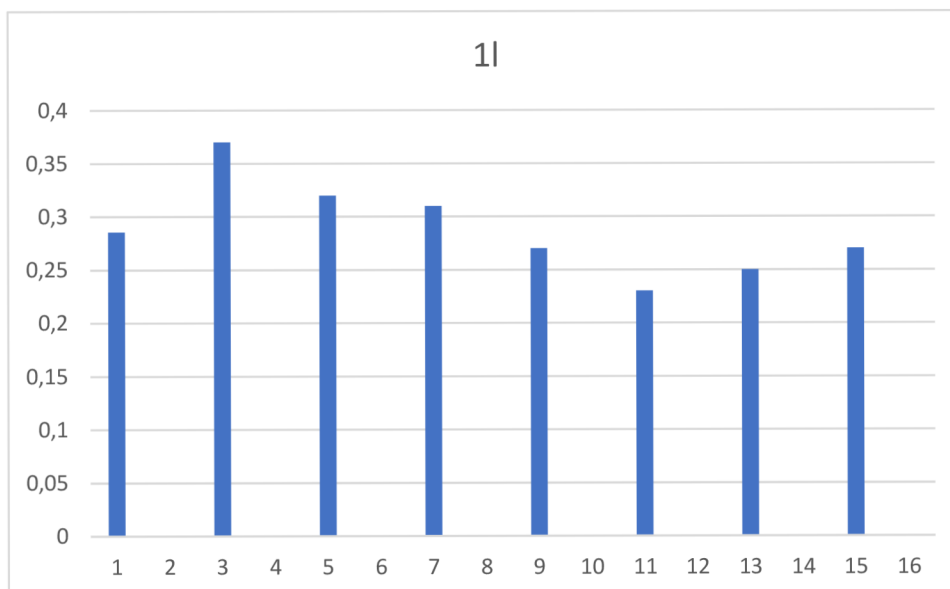
Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 6.

Poslední 4 otázky se zabývají fundamentem a to tak, že první 3 otázky jsou každá v jiném typu spektra a 4. je opakující se otázka v plném spektru, pouze se sníženou intenzitou a zvýšenou frekvencí.

4.2.9 34. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 1. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



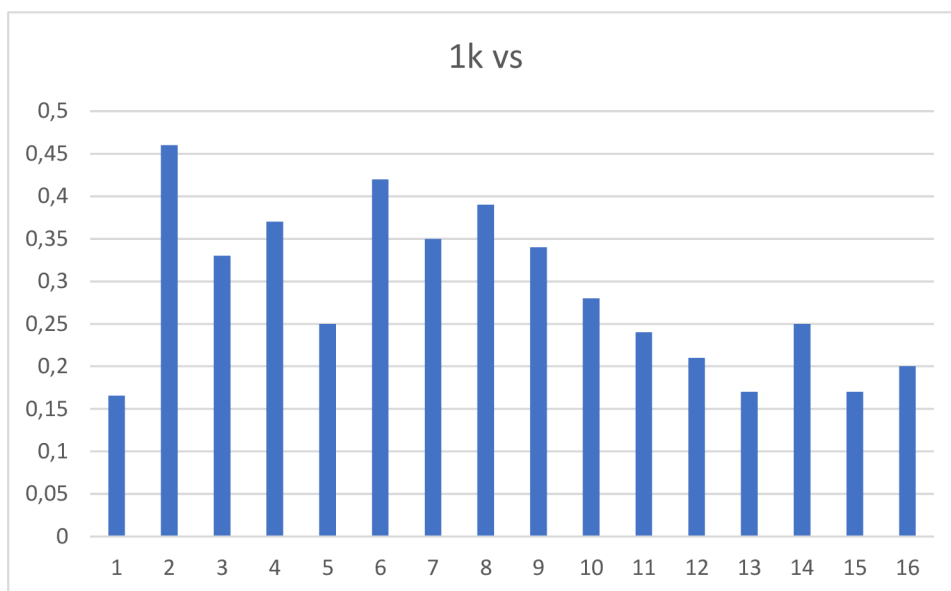
Obr. 4.11: Spektrum zodpovězené 34. otázky

Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 1.

4.2.10 37. otázka

Doplňte předem nastaveného spektra 1. harmonickou složku tak, aby byla slyšet jako samostatný tón a vystupovala z mixtury.

Spektrum, do kterého měli respondenti přimíchat požadovanou harmonickou složku:



Obr. 4.12: Spektrum zodpovězené 37. otázky

Graf vyjadřuje, jak byla která složka nastavena v programu Reaktor v dB FS. V grafu je doplněna průměrná hodnota nastavené harmonické složky, v tomto případě 1.

5. TESTOVÁNÍ

Testování probíhalo tím způsobem, že respondent měl za úkol v řadě 16 táhel reprezentující harmonické složky tónu, který slyšel nastavit hlasitost vždy jedné požadované harmonické složky na úroveň, kdy je slyšet konkrétně jako samostatný tón, tudíž není maskována původním složeným tónem.

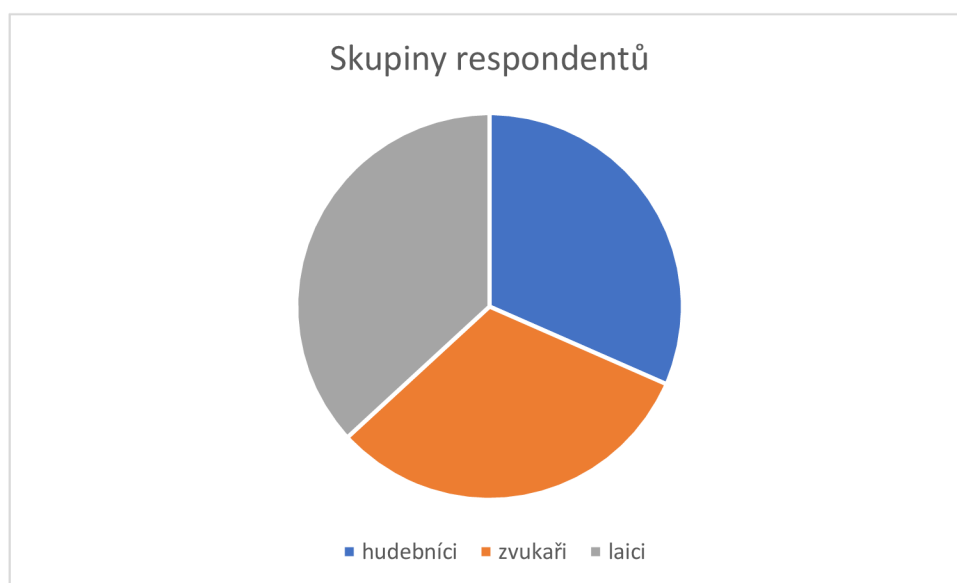
5.1 Respondenti

Respondenti byli pro poslechový test vybráni ze 3 skupin, hudebníci, zvukaři a laici. Do skupiny hudebníků spadali ti respondenti, kteří buď aktivně hudebně působí, mají hudební vzdělání nebo vyučují hudbu například na základní umělecké škole.

Do skupiny zvukařů byly zahrnuti respondenti, kteří jsou buď studenti programu audio inženýrství nebo se věnují tomuto odvětví.

Třetí skupinu, laiky, tvořili respondenti, kteří nesplňují předešlá kritéria, ale bylo vyhodnoceno, že porozumí problematice poslechového testu a validně jej tedy vyplní.

Z celkového počtu 57 respondentů bylo 18 hudebníků, 18 zvukařů a 21 laiků.



Obr. 5.1: Graf počtu respondentů v kategoriích

5.2 Průběh testování

Testování probíhalo pod mým dohledem. Nejprve byl respondent seznámen s danou problematikou a instruován je o průběhu testu, nastavení jednotlivých složek a jejich ukládání. Respondentům byl při testování poskytnut i návod a princip testování napsaný v samotném prostředí Reaktor:

Poslechový test spočívá v tom, že u každé otázky zahrajete tón stisknutím klávesy "v". Do něj se pokusíte nastavit úroveň zkoumané harmonické složky, kdy ji v rámci mixtury

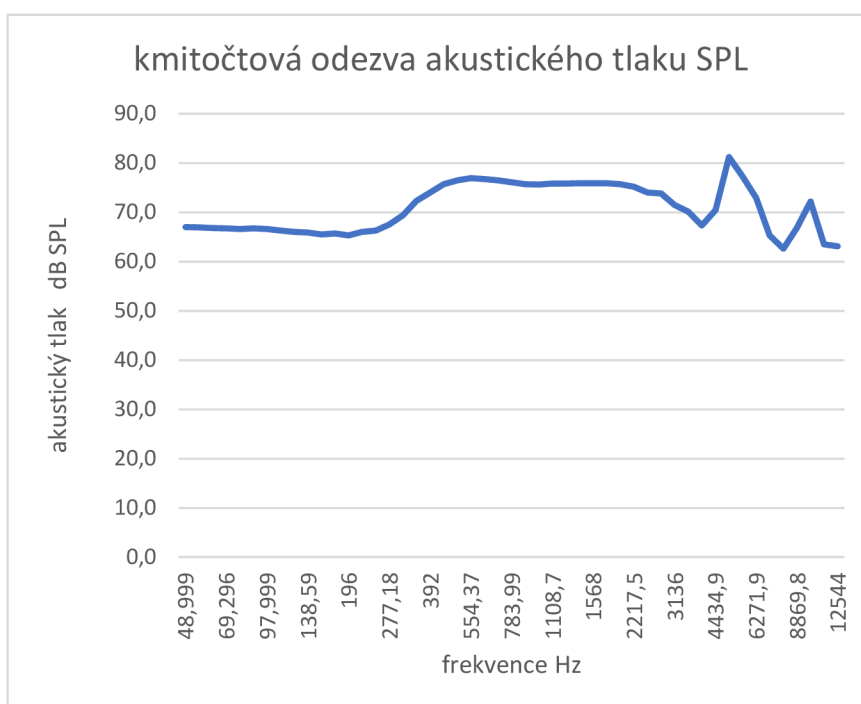
dokážete sluchem rozpoznat, tedy kdy není maskována ostatními. Složku nastavujte pomocí příslušného táhla v horní polovině programu označeného písmenem A, například "A5". Až budete mít složku nastavenou klikněte dvakrát na tlačítko „Store“ v levém dolním rohu a pokračujte na další otázku v seznamu v levé části obrazovky.

5.3 Použité vybavení

Poslechové testy byly provedeny na sluchátkách Sennheiser HD 4.40 připojených TRS kabelem o šířce 3,5 mm do zvukové karty Steinberg UR 242, u které je sluchátkový výstup nastaven na prvním dílku stupnice sluchátkového ovladače, a která je na stavena na počítači na 100 %.

5.4 Přepočet decibelů

Ve výše uvedeném nastavení byla naměřena kmitočtová odezva pomocí uměle hlavy zavřené v akustickém boxu. K měření byl použit vstupní signál z programu Reaktor 6 o intenzitě -24 dB FS.

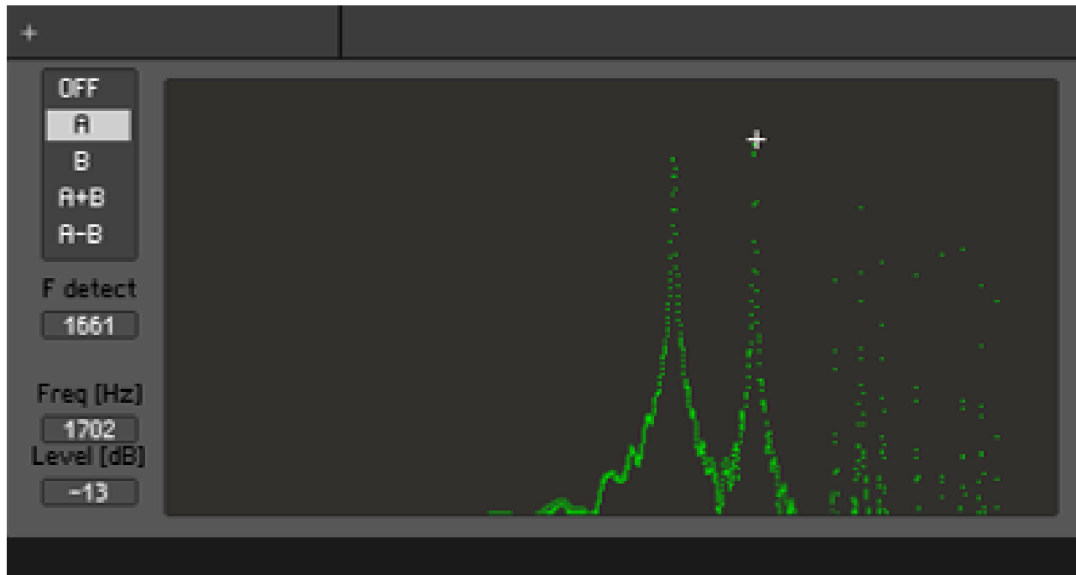


Obr. 5.2: Kmitočtová odezva testovacího vybavení

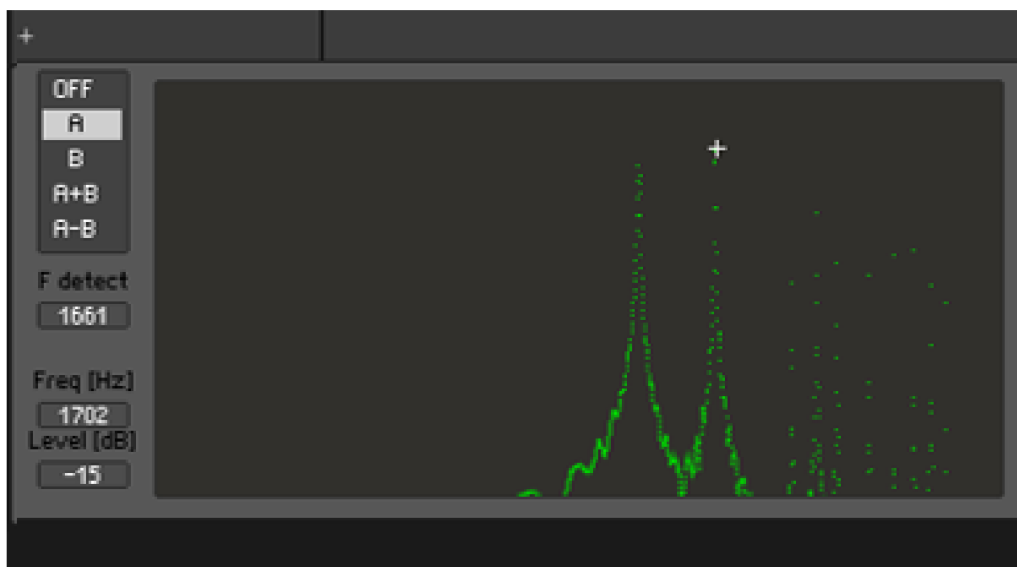
V prostředí poslechového testu hodnoty úrovně jednotlivých harmonických složek při nastavení parametru level -8 představují -13 dB FS při hodnotě 1. Při nastavení parametru level -10 představují -15 dB FS při hodnotě 1.

Pomocí vzorce $Z = 20 \cdot \log X_2/X_1$, (5.1)

kde X_1 je hodnota táhla 1 a X_2 hodnota táhla, kterou určil respondent, získáme hodnotu v dB SF, kterou musíme přičíst k hodnotě v dB, když je hodnota táhla 1, tedy -13 dB FS, respektive -15 dB FS.



Obr. 5.2: Hladina intenzity testovacího signálu v programu Reaktor 6



Obr. 5.3: Hladina intenzity testovacího signálu v programu Reaktor 6 při snížené intenzitě

6. ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DAT

6.1 Princip zpracování dat

Ze získaných dat od respondentů byl ke každé otázce zjištěn aritmetický průměr, následně výběrová směrodatná odchylka a interval spolehlivosti. Pro získání nezávislosti výsledků na frekvenci byla aritmetickým průměrům z výsledků připočtena korekce podle váhového filtru A. Korekce byla také přiřazena každé předem nastavené harmonické složce ve spektrech. Z těchto hodnot byla vypočítána průměrná intenzita spekter jednotlivých otázek.

Pro reprezentaci výsledků byl použit poměr mezi aritmetickým průměrům z výsledků po přičtení korekce a mezi průměrnou intenzitou spekter. Tato veličina by měla představovat kolikrát musela být nastavovaná složka hlasitější než zbytek spektra, aby nebyla spektrem maskována.

Dále byly také vypočítány poměry mezi průměrem z výsledků a fundamentem.

6.2 Výpočet statistických veličin

Příklady výpočtu pracují s otázkou 4 s, kdy byla doplňována 4 harmonická složka do sudého spektra. Pro ostatní příklady byly výpočty obdobné.

Aritmetický průměr výsledků

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = 11,41/57 = 0,20018 \text{ dB} \quad (6.1)$$

N je počet respondentů.

Výběrová směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = 0,20191 \text{ dB} \quad (6.2)$$

6.2.1 Interval spolehlivosti

Interval spolehlivosti byl vypočítán v programu Microsoft excel příkazem

$$CI = \text{CONFIDENCE.NORM}(0,05; s; N) = 0,0524155 \text{ dB}$$

kde 0,05 je hladina významnosti.

Horní a dolní mez intervalu

$$Hm = \bar{x} + CI = 0,252591 \text{ dB} \quad (6.3)$$

$$Dm = \bar{x} - CI = 0,1477599 \text{ dB} \quad (6.4)$$

6.2.2 Váhová funkce

$$A(f) = 20 \cdot \log \frac{12200^2 \cdot f^2}{(f^2 + 20,6^2) \sqrt{(f^2 + 107,7^2)} \sqrt{(f^2 + 737,9^2)} (f^2 + 12200^2)} - A1000 \quad (2.1)$$

$$A(f) = 20 \cdot \log \frac{12200^2 \cdot 415,3^2}{(415,3^2 + 20,6^2) \sqrt{(415,3^2 + 107,7^2)} \sqrt{(415,3^2 + 737,9^2)} (415,3^2 + 12200^2)} - (-2) \text{ dB}$$

$$A(f) = -109,24 \text{ dB}$$

Aritmetický průměr + korekce

$$\bar{x}_A = \bar{x} + A = -109,04 \text{ dB} \quad (6.5)$$

Obdobným způsobem byly vypočítány korekce pro všechny složky okolního spektra, na základě toho byly vypočítány:

Průměrná intenzita spektra po korekci S, intenzita fundamentu po korekci F.

Poměr aritmetického průměru a průměrné intenzity spektra po korekci.

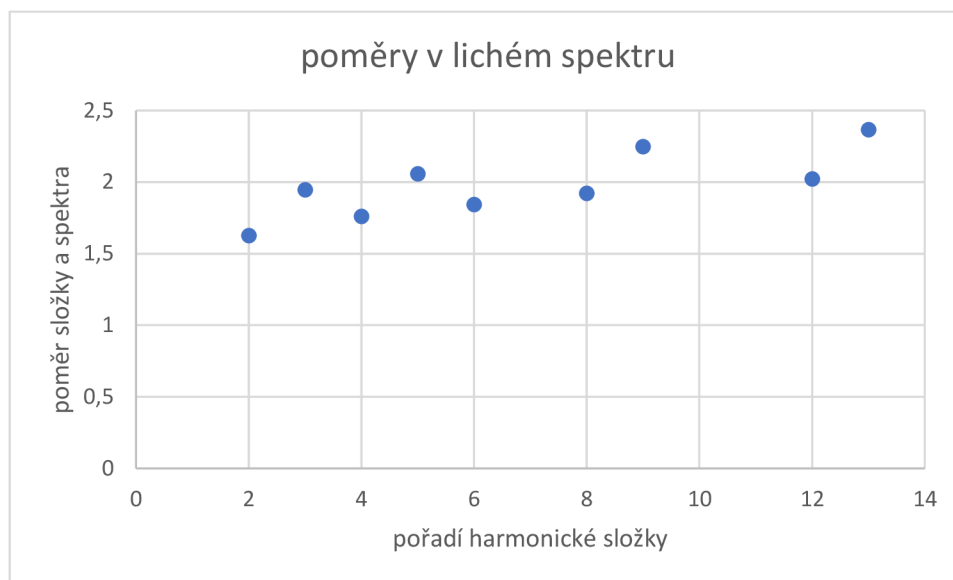
$$P = \frac{\bar{x}_A}{S} = \frac{\bar{x}_A}{-61,975} = 1,75936 \quad (6.6)$$

Poměr aritmetického průměru harmonické složky a fundamentu po korekci.

$$P_f = \frac{\bar{x}_A}{F} = \frac{\bar{x}_A}{-98,66} = 1,10518 \quad (6.7)$$

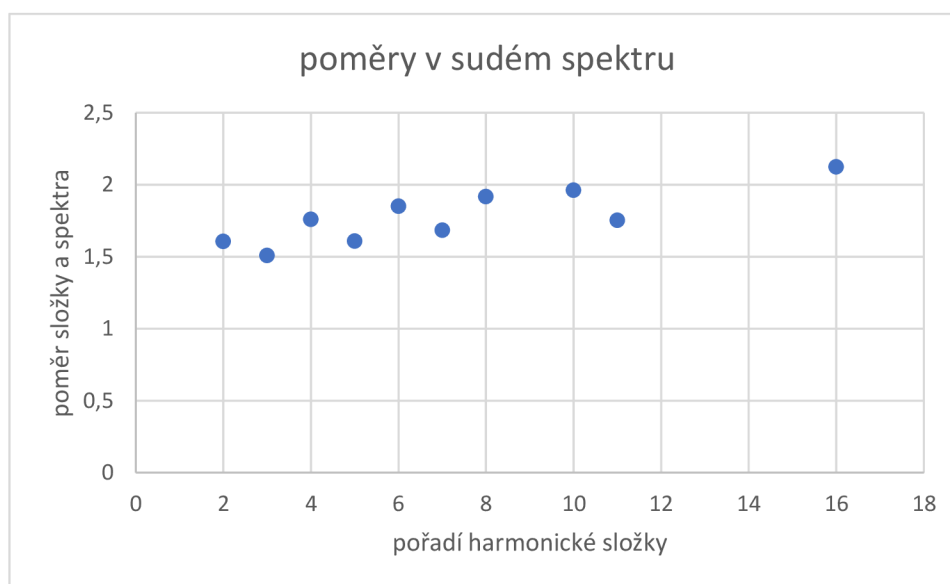
6.3 Vyhodnocení výsledků

Z poměrů aritmetického průměru a průměrné intenzity po korekci byly vytvořeny grafy, znázorňující schopnost rozpoznat jednotlivé harmonické složky v mixtuře. Grafy rozdělují otázky podle typu spektra.



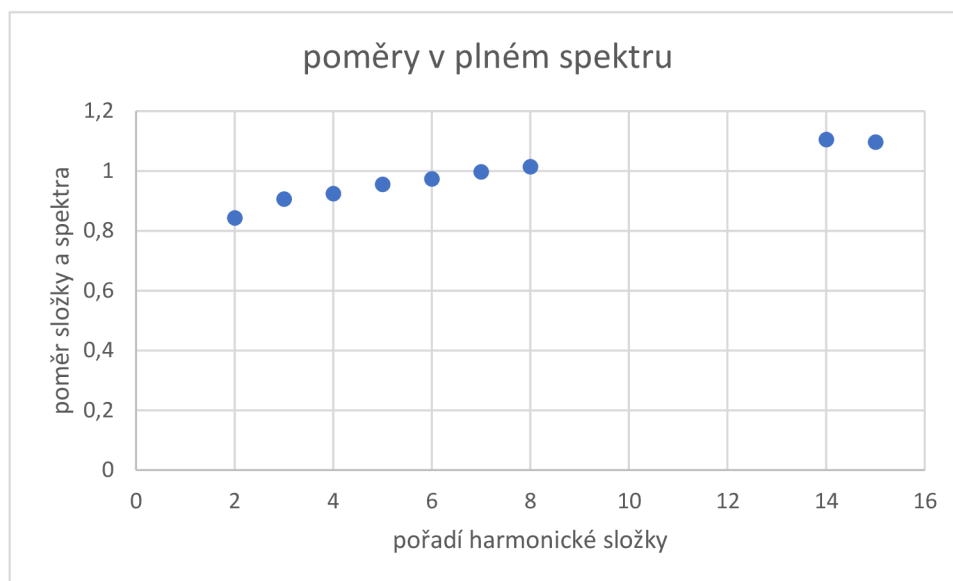
Obr. 6.1: Graf výsledků v lichém spektru

Z průběhu grafu v lichém spektru jsou zřejmé dva jevy. Rostoucí náročnost rozpoznání harmonické složky s rostoucí hledanou harmonickou složkou. Dále skutečnost, že v lichém spektru jsou liché složky náročnější na rozpoznání než sudé harmonické složky.



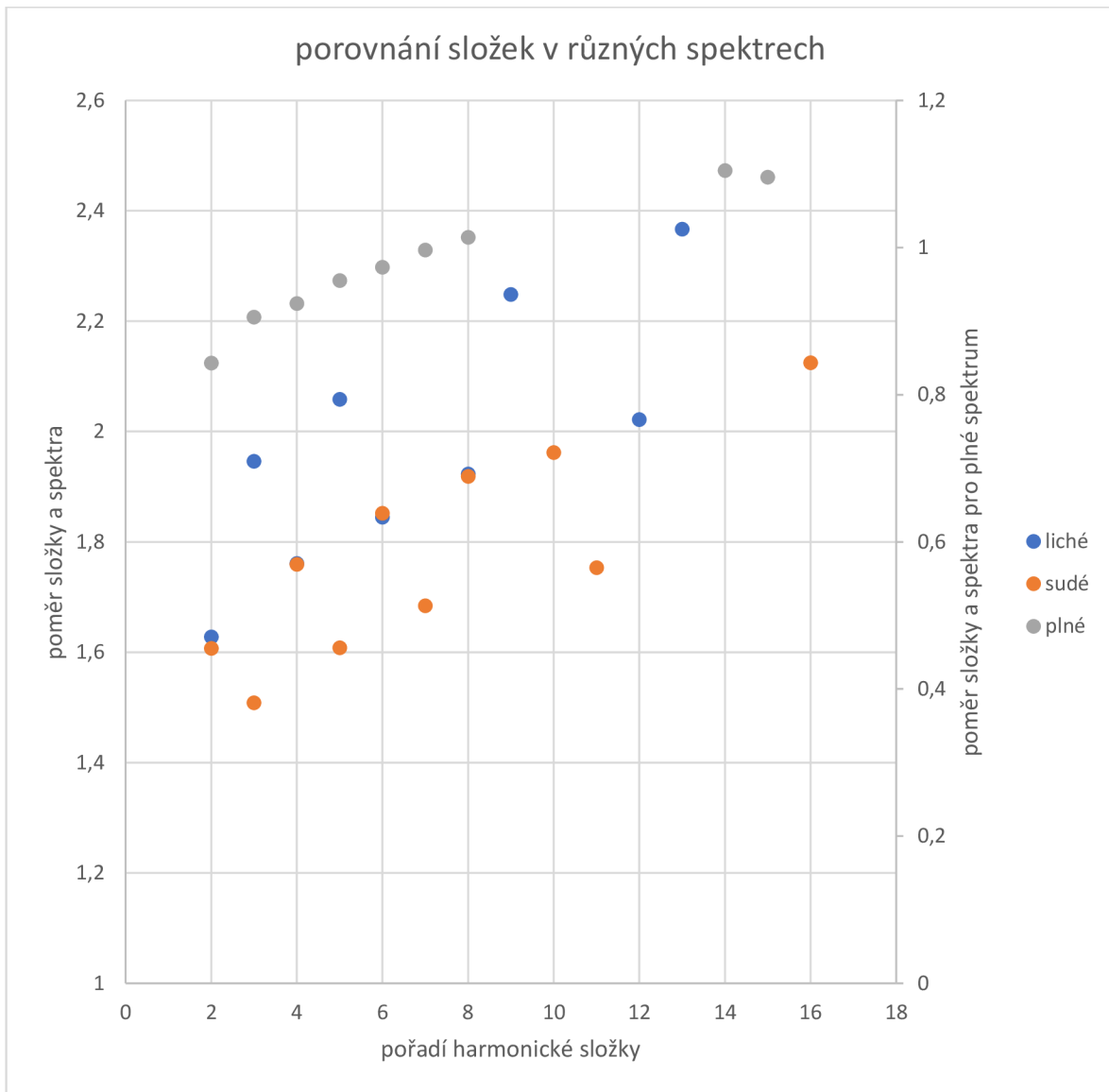
Obr. 6.2: Graf výsledků v sudém spektru

Graf v lichém spektru ukazuje obdobný jev ve stoupání náročnosti rozpoznání harmonické složky a opačný jev, kdy v sudém spektru jsou sudé složky náročnější na rozpoznání než liché.



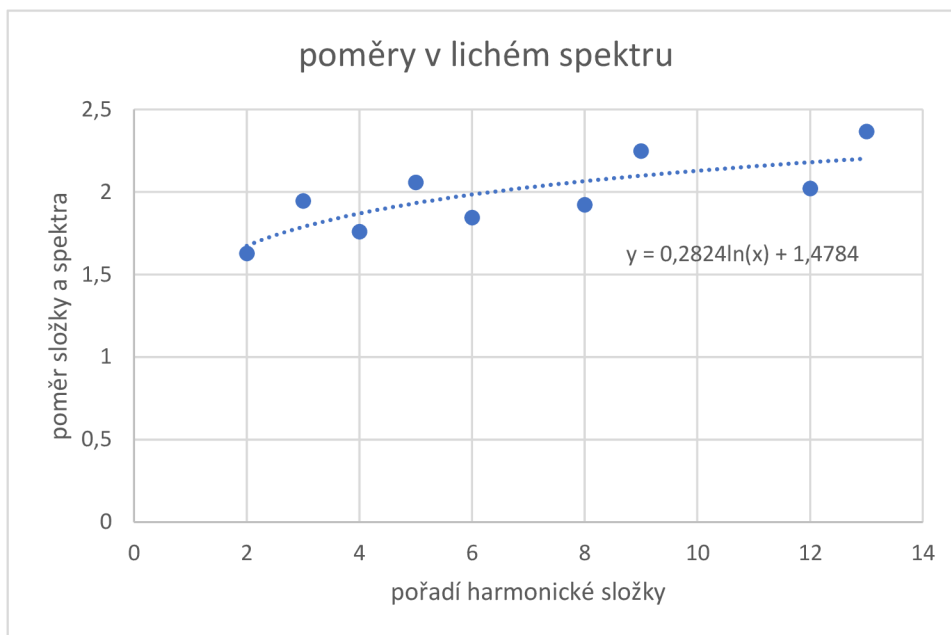
Obr. 6.3: Graf výsledků v plném spektru

V plném spektru pozorujeme rostoucí trend v náročnosti na rozpoznání harmonické složky. Rozdílné průběhy pro sudé a liché harmonické složky zde nepozorujeme.



Obr. 6.4: Graf výsledků v každém spektru

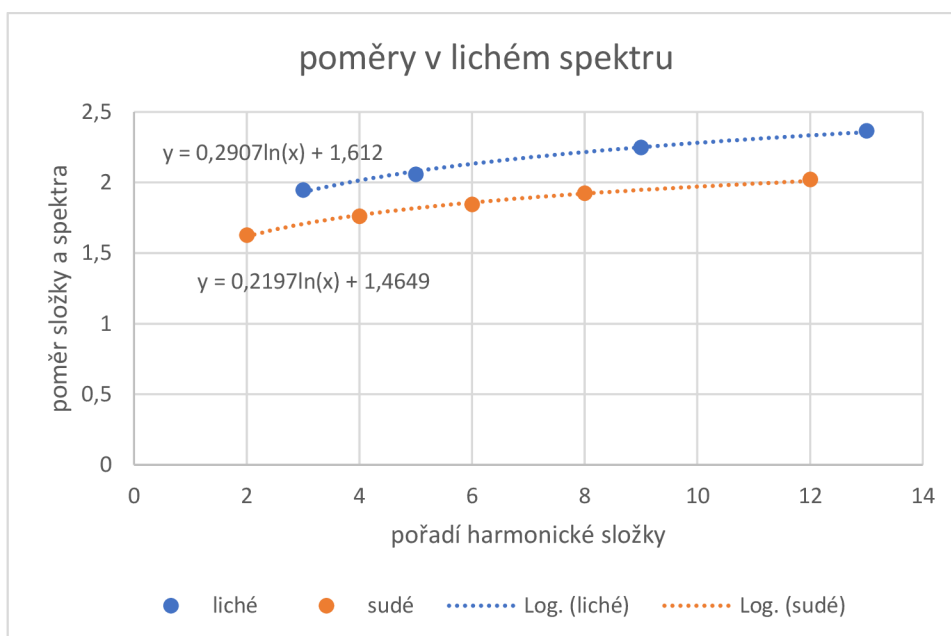
Graf 6.4, zobrazující tři výše uvedené průběhy ukazuje, že v lichém spektru bylo rozpoznání harmonické složky náročnější než v sudém. Sudé složky mají podobné hodnoty jak v sudém, tak v lichém spektru.



Obr. 6.5: Graf výsledků v lichém spektru

Výsledkům byl aproximován logaritmický průběh. Při vynesení logaritmické spojnice trendu v grafu výsledků v lichém spektru byla získána rovnice

$$y = 0,2824 \ln(x) + 1,4784 \quad (6.1)$$



Obr. 6.6: Graf výsledků v lichém spektru

Při rozdělení grafu na sudé a liché nastavované složky a následné logaritmicke aproximace obou průběhů byly získány rovnice

$$y = 0,2907 \ln(x) + 1,612 \quad (6.2)$$

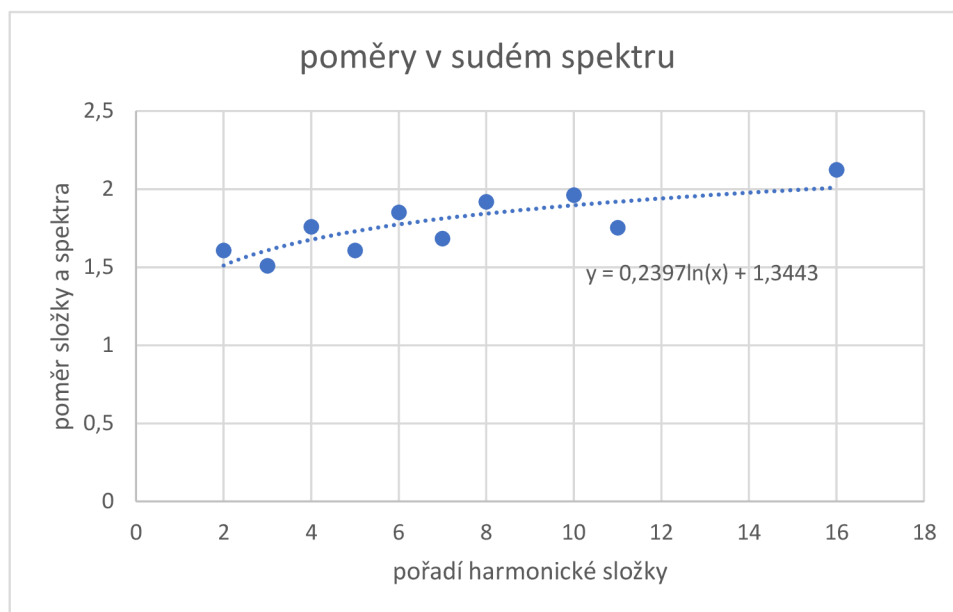
pro liché složky, a

$$y = 0,2197 \ln(x) + 1,4649 \quad (6.3)$$

pro složky sudé.

Logaritmicke průběh pro liché složky zde má sklon určený hodnotou 0,2907, který je vyšší než sudých složek, 0,2197. Prakticky jsou ale křivky podobné.

Vzdálenost na ose y je dána číslem 1,612 u lichých složek a 1,4649 u složek sudých. Z těchto hodnot byl vypočítán rozdíl 9,1 % mezi těmito dvěma průběhy.



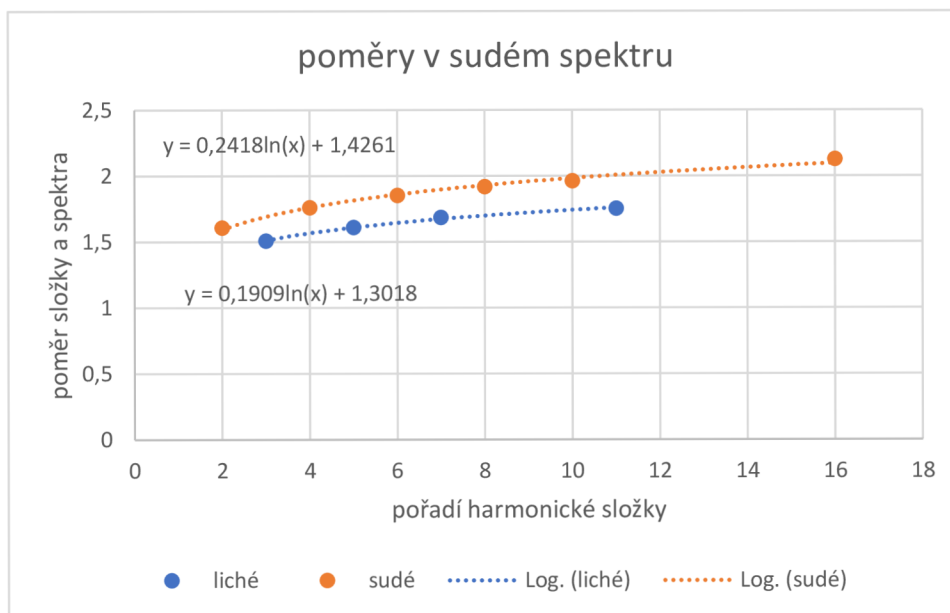
Obr. 6.7: Graf výsledků v sudém spektru

V sudém spektru byla výsledkům aproximována spojnice trendu s logaritmicke průběhem popsaným rovnicí

$$y = 0,2397 \ln(x) + 1,3443 \quad (6.4)$$

Proti obdobnému vztahu v lichém spektru, 0,2824, je sklon v sudém spektru daný číslem 0,2397. Tedy opět velmi podobný.

Co se týče vzdálenosti na ose y je rozdíl mezi oběma průběhy 15 %.



Obr. 6.8: Graf výsledků v sudém spektru

Při následném rozdělení opět na sudé a liché složky byly obdobným průběhem získány rovnice

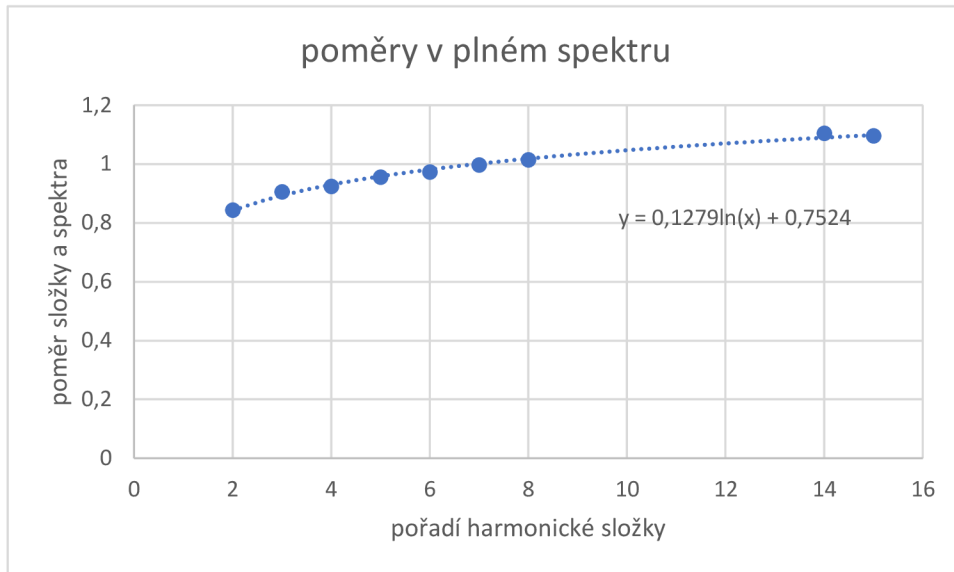
$$y = 0,2418 \ln(x) + 1,4261 \quad (6.5)$$

pro liché složky, a

$$y = 0,1909 \ln(x) + 1,3018 \quad (6.6)$$

pro složky sudé.

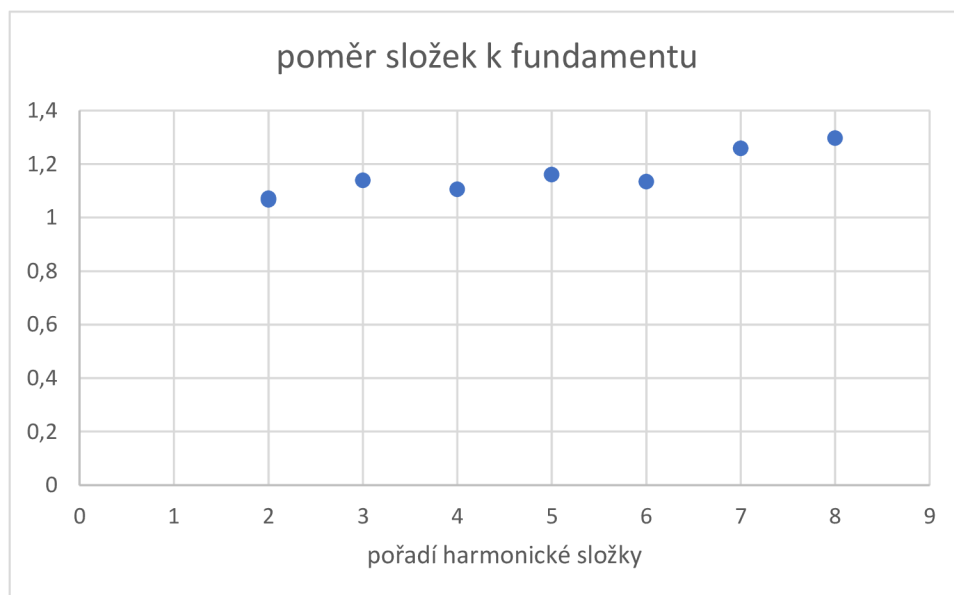
Sklon jednotlivých složek je zde opět velmi podobný. Vzdálenost průběhů na ose y se liší 9 %, rozdíl je tedy velmi podobný jako v lichém spektru.



Obr. 6.9: Graf výsledků v plném spektru

Obdobným postupem jako u lichého a sudého spektra byl aproximován logaritmický průběh grafu výsledků v plném spektru. Spojnice trendu vykazala průběh popsany rovnicí

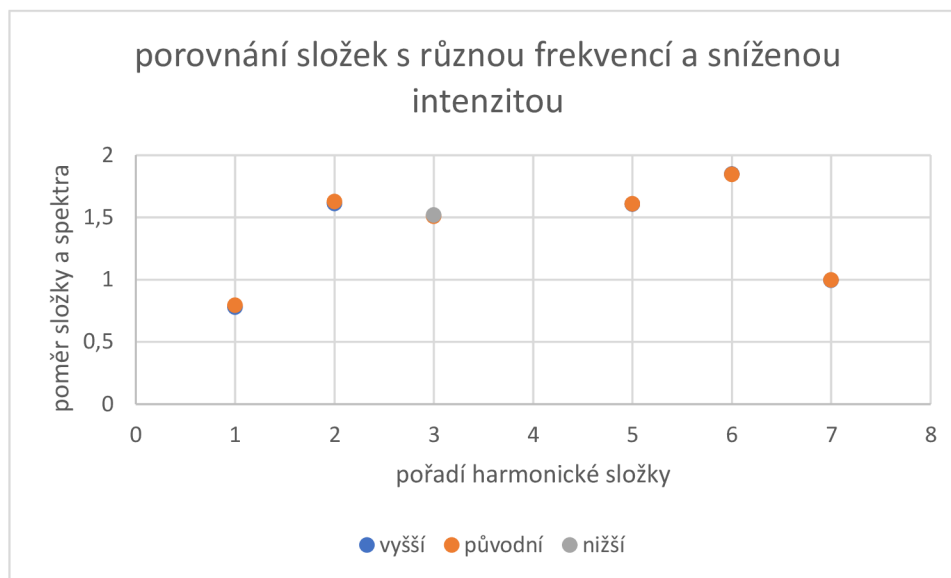
$$y = 0,1279 \ln(x) + 0,7524 \quad (6.7)$$



Obr. 6.10: Graf poměru nastavované složky a fundamentu

Na grafu znázorňujícím poměr průměru harmonické složky k fundamentu po korekci lze opět pozorovat patrný rozdíl mezi sudými a lichými složkami, i když ne tak zřetelný jako u grafů předchozích, stejně jako rostoucí náročnost na jejich rozpoznání.

Strmosti stoupání zabraňuje fakt, že fundament, jakožto nejintenzivnější harmonická složka má velký podíl na celkovém maskování, tudíž čím více se od něj harmonická složka vzdaluje tím se jí méně maskována.



Obr. 6.11: Graf porovnání složek s různou frekvencí a intenzitou

Graf porovnává výsledky vybraných otázek a otázek, které se opakovali se sníženou intenzitou. Je patrné, že se výsledky překrývají, což potvrzuje to, že po provedení korekce váhovým filtrem A jsou výsledky na frekvenci do jisté míry nezávislé. Zároveň se dají podobné průběhy odůvodnit tím, že intenzita byla snížena o dva decibely, což je řádově méně než vliv korekce, která ovlivnila hladiny často více než o sto decibelů.

6.4 Shrnutí

Výsledné průběhy se od sebe tvarem příliš neliší, mají podobný průběh a svým sklonem se liší pouze málo. Nicméně nejmenší sklon má průběh výsledků v plném harmonickém spektru, se stoupajícím pořadím harmonické složky její rozpoznatelnost klesá méně než u složek ve spektru sudém, a ještě méně než ve spektru lichém.

Vzájemná poloha průběhů v různých spektrech na ose y se je taková, že složky v lichém spektru jsou rozpoznatelné nejhůře, o 15 % hůře než ve spektru sudém. V obou spektrech se od sebe liší průběhy sudých a lichých složek a to o 9 %. V lichém spektru jsou vak liché složky hůře rozpoznatelné, zatímco v sudém spektru z něj více vyčnívají.

7. ZÁVĚR

Výsledné grafy potvrzují několik předpokladů:

Čím vyšší je harmonická složka tím hůře je v mixtuře rozpoznatelná z důvodu menších frekvenčních vzdáleností. Vypovídá o tom logaritmický průběh výsledků s mocnitelem od 0,1279 do 0,2907.

Liché harmonické složky jsou hůře rozpoznatelné, a tudíž jsou více maskovány v lichém spektru. Sudé složky jsou naopak více maskovány ve spektru sudém. Mezi sudými a lichými složkami v obou typech spektra je rozdíl kolem 9 %.

Dále bylo zjištěno několik poznatků:

V plném spektru se snižuje rozdíl v maskování sudých a lichých složek. Mocnitel rovnice popisující průběh výsledků v plném spektru je 0,1279, dále je pak rozdíl větší u lichých složek v sudém spektru, s mocnitelem 0,1909. Největší rozdíly, a tedy největší sklon vychází u lichých složek v lichém spektru s mocnitelem 0,2907.

V lichém spektru jsou obecně jednotlivé harmonické složky více maskovány, a tudíž hůře rozpoznatelné než ve spektru sudém. Jejich vzájemný rozdíl na ose y činí 15 %.

Výsledek maskování v plném spektru oproti sudému a lichému je v rozporu s předpokladem, kdy výsledky ukazují, že v plném spektru je rozpoznatelnost lepší. To má pravděpodobně příčinu ve výpočtu průměrné intenzity spekter. Při tomto výpočtu byly průměrné intenzity plných spekter řádově dvakrát větší než u sudých a lichých spekter, z důvodu započítání dvakrát více harmonických složek. Rozpoznatelnost harmonických složek však pravděpodobně klesla méně než dvakrát, proto při položení nastavené složky a průměrné intenzity spektra do poměru, vyšly výsledky v plném spektru nižší než u spekter sudých a lichých.

Součástí práce je také soubor obsahující poslechový test, který respondenti vyplňovali s názvem „Vzorový poslechový test“, soubor v programu Reaktor 6, s odpověďmi nastavenými na průměrnou hodnotu odpovědí všech respondentů a také složka zvukových souborů s názvem „zvuky“, obsahující nahrané zvuky jednotlivých otázek ze vzorového poslechového testu s odpověďmi nastavenými na průměrnou hodnotu odpovědí všech respondentů. Každý zvukový soubor má pár vteřin zvuku hraného v programu Reaktor 6, v příslušné konfiguraci. Soubory jsou pojmenovány podle nastavené složky a typu spektra, například „2 I“.

LITERATURA

- [1]. MELKA, ALOIS. *ZÁKLADY EXPERIMENTÁLNÍ PSYCHOAKUSTIKY*. PRAHA: AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ V PRAZE, 2005. AKUSTICKÁ KNIHOVNA ZVUKOVÉHO STUDIA HUDEBNÍ FAKULTY AMU. ISBN 80-733-1043-0.
- [2]. SYROVÝ, VÁCLAV. *HUDEBNÍ AKUSTIKA. 2., DOPL. VYD. V PRAZE: AKADEMIE MÚZICKÝCH UMĚNÍ, 2008. AKUSTICKÁ KNIHOVNA ZVUKOVÉHO STUDIA HUDEBNÍ FAKULTY AMU. ISBN 978-80-7331-127-8.*
- [3]. KABAROVÁ, ANÍSA. *HLUKOVÁ ANALÝZA ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ*. BRNO, 2015. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. VEDOUcí PRÁCE ING. JIŘÍ SCHIMMEL, PH.D.
- [4]. *EXPERIMENTÁLNÍ SOFTWAREVÝ HUDEBNÍ NÁSTROJ*. BRNO, 2016. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. VEDOUcí PRÁCE DOC. ING. MGA. MGR. DAN DLOUHÝ, PH.D.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky:

FS	úroveň zvuku vztažená k maximu konkrétního programu, (full scale)
HS	harmonická složka
k	označení plného spektra, (klastr)
l	označení lichého spektra
MIDI	digitální rozhraní hudebního nástroje, (Musical Instrument Digital Interface)
s	označení sudého spektra
SPL	úroveň akustického tlaku, (Sound Pressure Level)

Symboly:

A	korekce váhovým filtrem A
CI	interval spolehlivosti, (confidence interval)
dB	decibel
D_m	dolní mez
f	frekvence
H_m	horní mez
F	intenzita fundamentu po korekci
N	počet respondentů
P	poměr aritmetického průměru a průměrné intenzity spektra po korekci
P_f	poměr aritmetického průměru a intenzity fundamentu po korekci
s	výběrová směrodatná odchylka
S	průměrná intenzita spektra po korekci
\bar{x}	aritmetický průměr
\bar{x}_A	aritmetický průměr po korekci