

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

ANALÝZA VLIVU JEDNOTLIVÝCH HARMONICKÝCH SLOŽEK NEBO FORMANTOVÝCH OBLASTÍ NA VJEM BARVY ZVUKU

THE INFLUENCE OF SINGLE HARMONICS OR FORMANTS ON TIMBRE COLOR PERCEPTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Klimeš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

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

Student: Martin Klimeš

ID: 203733

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Analýza vlivu jednotlivých harmonických složek nebo formantových oblastí na vjem barvy zvuku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Připravte sadu signálů s různou zvukovou barvou - s nízkým, středním a vysokým počtem alikvótních složek i s různou mírou inharmonicit. Speciálně se zaměřte na intenzitu jednotlivých složek v prvním pásmu (1. - 8. harmonická složka) a formanty nacházející se v pásmu druhém (9. - 16. harmonická složka), či třetím (17. - 32. složka). Vyděte z metodiky zvukových barev V. Surového a A. Melky. Jako zdroj různě barevných signálů můžete využít živé nástroje, databanky samplerů nebo si signály i vymodelovat. Preferovaná je však živost. Vytvořte melodii o nejméně o třech tónech. Vytvořte dotazník s hodnotící škálou a proveďte poslechové testy na ideálním vzorku více než 100 respondentů. Vyhodnoťte výsledky a dejte je do souvislosti s kategoriemi barev. Vyhodnoťte, zda a při jaké míře intenzity jednotlivých harmonických složek či formantových oblastí posluchači předpokládané barvy identifikovali.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Melka, A.: Základy experimentální psychoakustiky. Praha: Akademie múzických umění, 2005. ISBN 80-733-043-0

[2] Štěpánek, J., Moravec, O.: Barva hudebního zvuku a její slovní popis, Akademie múzických umění v Praze, Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU, 2005. ISBN 80-7331-031-7.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

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 se zabývá výzkumem vlivu jednotlivých harmonických složek na vjem barvy zvuku. Byla vytvořena aplikace s dotazníkem, ve kterém respondenti posuzovali celkem 29 vzorků na různých bipolárních škálách. Vzorky byly buď vymodelované pomocí aditivní syntézy, nebo vytvořeny upravením hudebních nástrojů. Cílem bylo zkoumat, jak a jaké kombinace vyšších harmonických složek ovlivňují vjem barvy zvuku. Experiment je založen na metodě sémantického diferenciálu. Vzorky byly rozděleny do několika skupin a v rámci těchto skupin porovnány a dány do souvislosti s předpokládaným vjemem barev.

KLÍČOVÁ SLOVA

Harmonické složky, spektrum, psychoakustika, barva zvuku, sémantický diferenciál, poslechový test

ABSTRACT

This thesis is dealing with the research of the influence of individual harmonic on the perception of sound color. An application was created with a questionnaire in which respondents assessed a total of 29 samples on different bipolar scales. The samples were either modeled by additive synthesis or created by modifying musical instruments. The aim was to investigate how and what combinations of higher harmonic affect the perception of sound color. The experiment is based on the semantic differential method. The samples were divided into several groups and within these groups they were compared and related to the expected color perception.

KEYWORDS

Harmonic components, spectrum, psychoacoustics, sound color, semantic differential, listening test

KLIMEŠ, Martin. *Analýza vlivu jednotlivých harmonických složek nebo formantových oblastí na vjem barvy zvuku*. Brno, 2020, 90 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Analýza vlivu jednotlivých harmonických složek nebo formantových oblastí na vjem barvy zvuku“ 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.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost, poskytnutou literaturu a podnětné návrhy k práci. Dále děkuji všem ochotným lidem, za vyplnění mého poslechového testu

Obsah

1	Úvod	13
2	Psychoakustika	14
3	Periodické signály a jejich spektrum	15
3.1	Periodické signály	15
3.2	Harmonická analýza	16
3.3	Fourierova řada	16
4	Barva zvuku	18
4.1	Definice barvy zvuku	18
4.2	Výchozí teorie barvy zvuku	18
4.3	Vjem barvy zvuku	20
4.4	Spektrum tónu	20
4.5	Vjem dvou jednoduchých tónů	22
4.5.1	Vznik rázů	22
4.5.2	Harmonická řada tónů	24
4.5.3	Rozdílový mechanismus tónů	24
5	Výzkum	29
5.1	Metoda sémantického diferenciálu	29
5.2	Volba posuzovacích škál	29
5.3	Pilotní průzkum	30
5.4	Python GUI	31
5.4.1	Průběh výzkumu	31
5.5	Vzorky	32
5.5.1	Pořadí vzorků a jejich kategorizace	32
5.5.2	Pořadí vzorků	38
5.6	Respondenti	40
6	Spektrogramy vzorků	42
6.1	Spektrogramy sudých a lichých vzorků	42
6.2	Spektrogramy vzorků vzniklých kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu	44
6.3	Spektrogramy s různou mírou inharmonicit a šumem	46
6.4	Spektrogramy vzorků s formantovými oblastmi a rázy	48
6.5	Spektrogramy vzorků klavíru	50
6.6	Spektrogramy vzorků varhan	52

6.7	Spektrogramy vzorků kytary	55
6.8	Spektrogramy vzorků trombónu	57
7	Vyhodnocení experimentu	59
7.1	Skupina sudých a lichých vzorků	60
7.2	Skupina vzorků vzniklých kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu	63
7.3	Skupina vzorků s různou mírou inharmonicit a šumem	66
7.4	Skupina vzorků s formantovými oblastmi a rázy	69
7.5	Skupina vzorků klavíru	72
7.6	Skupina vzorků varhan	75
7.7	Skupina vzorků kytary	78
7.8	Skupina vzorků trombónu	81
7.9	Srovnání škál všech vzorků	83
7.10	Rozpory při výzkumu	85
8	Závěr	86
	Literatura	88
	Seznam příloh	90

Seznam obrázků

3.1	Základní signály a jejich spektra [2]	15
4.1	Rázy unisona a oktávy [2]	23
4.2	Harmonická řada tónů [12]	24
4.3	Rozdílové tóny různých intervalů [2]	26
4.4	Mechanismus posilování a doplňování spektra [2]	28
5.1	Příklad ohodnocení prvních tří vzorků	30
5.2	Dotazník v Pythonu	32
5.3	Věk respondentů	40
5.4	Nástrojové obsazení respondentů	41
5.5	povolání respondentů	41
6.1	Vzorek č. 1 - 2., 4., 6., 8. harmonická složka	42
6.2	Vzorek č. 9 - 1, 3, 5, 7 harmonická složka	42
6.3	Vzorek č. 15 - klavír s posílenými lichými složkami v prvním pásmu .	43
6.4	Vzorek č. 21 - klavír s posílenými sudými složkami v prvním pásmu .	43
6.5	Vzorek č. 3 - 1., 2., 4., 7., 8. harmonická složka - 7. - vyšší intenzita .	44
6.6	Vzorek č. 7 - 1., 2., 4., 6., 8. harmonická složka - 6. - vyšší intenzita .	44
6.7	Vzorek č. 18 - 1., 2., 3., 8. harmonická složka - 3. - vyšší intenzita . .	45
6.8	Vzorek č. 25 - 1., 2., 4., 5., 8. harmonická složka - 7. - vyšší intenzita .	45
6.9	Vzorek č. 12 - 1., 2., 3., 5., 6., 8., 10. harmonická složka - 1., 2., 3. - rozladěná	46
6.10	Vzorek č. 16 - 1., 2., 4. harmonická složka - 2., 4. - rozladěná	46
6.11	Vzorek č. 22 - 1., 2., 3., 4. harmonická složka - 2., 4. - rozladěná . . .	47
6.12	Vzorek č. 28 - 1., 2., 3., 5., 6., 8., 10. harmonická složka - 1., 2., 3. - rozladěná + šum	47
6.13	Vzorek č. 5 - 1., 2., 4., 8. harmonická složka + formant při dominující 27. harmonické složce	48
6.14	Vzorek č. 14 - 1., 2., 4., 8. harmonická složka + formant při dominující 32. harmonické složce	49
6.15	Vzorek č. 20 - rázy	49
6.16	Vzorek č. 2 - klavír beze změny	50
6.17	Vzorek č. 8 - klavír s posílenou 7. harmonickou složkou	50
6.18	Vzorek č. 29 - klavír bez 1. a 2. harmonické složky	51
6.19	Vzorek č. 4 - varhany beze změny	52
6.20	Vzorek č. 10 - varhany s posílenou 7., 9., 11., 14. harmonickou složkou	52
6.21	Vzorek č. 17 - varhany s posílenými oktávovými složkami (1, 2, 4, 8, 16, 32)	53
6.22	Vzorek č. 23 - varhany bez oktávových složek (1, 2, 4, 8, 16, 32) . . .	53

6.23	Vzorek č. 27 - varhany bez 1. a 2. harmonické složky	54
6.24	Vzorek č. 6 - kytara beze změny	55
6.25	Vzorek č. 11 - kytara bez 1. a 2. harmonické složky	55
6.26	Vzorek č. 24 - kytara s rozladěnou 3. harmonickou složkou	56
6.27	Vzorek č. 13 - trombon beze změny	57
6.28	Vzorek č. 19 - trombon s rozladěnou 1., 2., 4., 8. harmonickou složkou	57
6.29	Vzorek č. 26 - trombon s rozladěnou 3., 5., 6., 7. harmonickou složkou	58
7.1	Grafy sudých a lichých vzorků	61
7.2	Grafy vzorků vzniklých kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu	64
7.3	Grafy vzorků s různou mírou inharmonicit a šumem	67
7.4	Grafy vzorků s formantovými oblastmi a rázy	70
7.5	Grafy vzorků klavíru	73
7.6	Grafy vzorků varhan	76
7.7	Grafy vzorků kytary	79
7.8	Grafy vzorků trombónu	82
7.9	Porovnání nejčastějších škál všech vzorků	84

Seznam tabulek

4.1	Pořadí tónů harmonické řady a jejich kmitočty v Hz	24
5.1	Seznam vzorků se sudými a lichými harmonickými	33
5.2	Seznam vzorků vzniklých kombinací harmonických složek v první pásmu	34
5.3	Seznam vzorků s různou mírou inharmonicit	35
5.4	Seznam vzorků s formantovými oblastmi a rázy	35
5.5	Seznam vzorků klavíru	36
5.6	Seznam vzorků varhan	37
5.7	Seznam vzorků kytary	38
5.8	Seznam vzorků trombónu	38
5.9	Pořadí vzorků barevně rozlišených podle skupin	39
7.1	Škálování vzorků č. 1, 9, 15 a 21 (uspořádány pod sebou)	60
7.2	Aritmetické průměry vzorků č. 1, 9, 15 a 21	60
7.3	Složení spektra všech vzorků ve skupině sudých a lichých vzorků . . .	61
7.4	Škálování vzorků č. 3, 7, 18 a 25 (uspořádány pod sebou)	63
7.5	Aritmetické průměry vzorků č. 3, 7, 18 a 25	63
7.6	Složení spektra všech vzorků ve skupině vzniklých kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu	64
7.7	Škálování vzorků č. 12, 16, 22 a 28 (uspořádány pod sebou)	66
7.8	Aritmetické průměry vzorků č. 12, 16, 22 a 28	66
7.9	Složení spektra všech vzorků ve skupině s různou mírou inharmonicit a šumem	67
7.10	Škálování vzorků č. 5, 14 a 20 (uspořádány pod sebou)	69
7.11	Aritmetické průměry vzorků č. 5, 14 a 20	69
7.12	Složení spektra všech vzorků ve skupině s formantovými oblastmi a rázy	70
7.13	Škálování vzorků č. 2, 8 a 29 (uspořádány pod sebou)	72
7.14	Aritmetické průměry vzorků č. 2, 8 a 29	72
7.15	Složení spektra všech vzorků klavíru	73
7.16	Škálování vzorků č. 4, 10, 17, 23 a 27 (uspořádány pod sebou)	75
7.17	Aritmetické průměry vzorků č. 4, 10, 17, 23 a 27	76
7.18	Složení spektra všech vzorků varhan	76
7.19	Škálování vzorků č. 6, 11 a 24 (uspořádány pod sebou)	78
7.20	Aritmetické průměry vzorků č. 6, 11 a 24	78
7.21	Složení spektra všech vzorků kytary	79
7.22	Škálování vzorků č. 13, 19 a 26 (uspořádány pod sebou)	81
7.23	Aritmetické průměry vzorků č. 13, 19 a 26	81
7.24	Složení spektra všech vzorků trombónu	82

7.25	Vzorky a jejich škály s největší mírou rozptylu výsledků	85
------	--	----

Seznam výpisů

1 Úvod

Všichni lidé jsou v běžném životě vystavováni nekonečnému množství všelijakých zvuků a ruchů. Určitě každý už někdy přemýšlel o tom, jak je možné, že určité zvuky znějí tak krásně a příjemně, ale jiné nám připadnou drsné a sluchu nijak zvláště nelahodící. Hudebníci se často setkávají s otázkou, jak je možné, že některé intervaly zní konsonantně, jiné disonantně. Celkový vjem barvy zvuku je však velmi subjektivní. Jeden posluchač může hodnotit určitý zvuk jako ostrý, jiný jako jiskrný, další zas jako špičatý atd. A právě proto jsem se rozhodl při výzkumu vlivu jednotlivých harmonických složek na vjem barvy zvuku využít metody sémantického diferenciálu, kde respondenti na několika bipolárních škálách označují stupně, které nejlépe odpovídají jejich posouzení podnětu.

Tato práce je velmi úzce spjata s psychologií, a to především s psychoakustikou. Proto bude nejprve zmíněn stručný úvod do psychoakustiky a její obecná definice. Dále bude popsána Fourierova řada, která slouží k popisu rozkladu signálu na dílčí harmonické složky. Právě kombinace jednotlivých harmonických složek je hlavním prvkem při vytváření vzorků v poslechovém testu. Vzhledem k tomu, že zkoumaným prvkem je barva zvuku, značná pozornost je věnována kapitole zabývající se právě touto problematikou. Nejprve je zmíněna její obecná definice a zákony. Dále pak předpokládaný vliv jednotlivých harmonických složek na vjem barvy zvuku. Pozornost je také kladena na popis spektra tónu a rozdílového mechanismu tónů.

V praktické části této práce vytvořím dotazník, ve kterém budu pomocí metody sémantického diferenciálu respondentům předkládat jednotlivé vzorky. Cílem tohoto výzkumu bude na počtu 100 respondentů zjistit, jaký je vjem jednotlivých kombinací vyšších harmonických a formantů a na základě toho určit, jaké harmonické složky a jejich kombinace jsou pro lidský sluch nejpříjemnější, a které naopak nejvíce odpudivé. Dotazník bude obsahovat celkem 29 vzorků. Vzorky budou signály s různou zvukovou barvou – s nízkým, středním a vysokým počtem alikvótních složek i s různou mírou inharmonicit. Budou rozděleny do několika skupin a v rámci těchto skupin porovnány a dány do souvislosti s předpokládaným vjemem barev.

2 Psychoakustika

Psychologická akustika, zkráceně psychoakustika je mezioborovou vědní disciplínou, v níž se stýká psychologie s akustikou. Nejedná se přitom jen o hraniční disciplínu těchto dvou věd, ale o propojení celé řady dalších disciplín, jako jsou např. neurofyzologie, teorie signálů, statistika, kybernetika, ale i estetika aj. [2]

Cílem psychoakustiky je vyšetřování veškerých účinků zvukových dějů na psychiku člověka, tj. na jeho chování a prožívání. Předmětem zájmu psychoakustiky mohou být nejrůznější otázky, sahající od měření prahů slyšení osob přes posuzování zvukové kvality hudebních nástrojů k posuzování rušivých účinků hluku v kabině automobilu až třeba po studium vzniku agresivity u osob dlouhodobě vystavených působení hluku. V nejširším pojetí je cílem psychoakustiky vyšetřování veškerých účinků zvukových dějů na psychiku člověka.

Předchůdcem dnešní psychoakustiky je psychofyzika, jež je historickým základem experimentální psychologie, tj. té části psychologie, v níž je základní metodou bádání pokus, neboli experiment. Za zakladatele psychofyziky jsou považováni německý anatom a fyziolog Ernst Heinrich Weber a německý fyzik a filozof Gustav Theodor Fechner [1].

Hudební psychoakustika (také psychoakustika hudby) studuje psychické reakce na hudební signály, tj. na takové zvukové signály, které jsou nositeli hudební informace. hudební signály můžeme podle [2] rozdělit na:

- přirozené – jsou produktem akustického hudebního nástroje či lidského hlasového ústrojí
- umělé – jsou generované elektrickým obvodem

V praktické části jsem se zabýval výzkumem subjektivního vjemu jak přirozených hudebních signálů, tak i vymodelovaných umělých signálů.

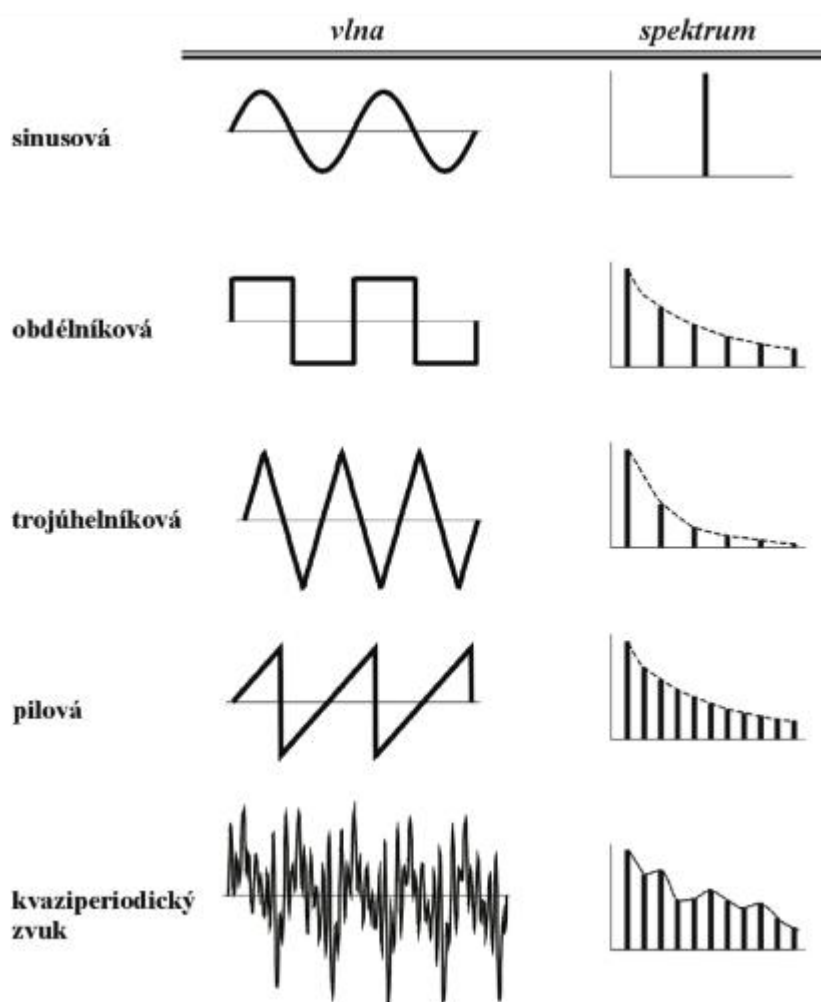
3 Periodické signály a jejich spektrum

3.1 Periodické signály

Za periodický signál je považovaná každá funkce, u níž se v pravidelném časovém intervalu její průběh stále opakuje a lze ji podle [2] popsat vztahem:

$$f(t) = f(t + nT) \quad (3.1)$$

Periodické signály se dělí na harmonické ($\sin \omega t$, $\cos \omega t$), ty mají ve svém frekvenčním spektru pouze jedinou spektrální čáru na příslušné frekvenci, a na signály komplexní, které kromě základní složky obsahují ještě další frekvenční složky na celistvých násobcích základní frekvence (viz obr. 3.1)



Obr. 3.1: Základní signály a jejich spektra [2]

3.2 Harmonická analýza

Teorie hudebního signálu má svůj základ v analytickém a syntetickém pohledu na jeho vlastnosti. Analýza hudebního resp. zvukového signálu patří v akustice k základním vyšetřovacím metodám. Slouží k jednoznačné kvantifikaci fyzikálních vlastností signálu směřující k objektivizaci sluchového vjemu, který tento signál vyvolává [2].

Harmonická analýza je operace, při níž se periodický signál rozkládá na dílčí harmonické složky (v případě harmonické syntézy je z harmonických složek skládán). Kmitočet vyšších harmonických složek je dán celistvým násobkem základního kmitočtu $f_1 = 1/T_1$, kde T_1 je perioda základní harmonické složky. To znamená, že kmitočet základní a vyšších harmonických složek je $f_1, 2f_1, 3f_1, 4f_1, \dots$, [8]

3.3 Fourierova řada

Matematický aparát k rozkladu periodického signálu na dílčí harmonické složky nám poskytl francouzský matematik Jean Baptiste Joseph Fourier. Matematická definice Fourierovy řady podle [7] zní:

Nechť $f(x)$ je periodická funkce s periodou 2π , tj. $f(x + 2\pi) = f(x)$ pro všechna x , a nechtě $f(x)$ a $f'(x)$ jsou po částech spojitě funkce v intervalu $-\pi, \pi$. Koeficienty a_n a b_n jsou dány vzorcem:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad (3.2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad (3.3)$$

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots, \quad (3.4)$$

Pak v každém bodě x , v němž $f(x)$ je spojitá, platí:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = f(x), \quad (3.5)$$

a v každém bodě, kde $f(x)$ není spojitá, platí:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) = \frac{f(x+0) + f(x-0)}{2}, \quad (3.6)$$

kde $f(x+0) = f(x_+)$ je limita zprava v bodě x , a $f(x-0) = f(x_-)$ je limita zleva v bodě x . Protože se v reálných signálech vyskytuje i jiná perioda než 2π , tak zavedeme úhlový kmitočet $w_1 = \frac{2\pi}{T_1}$, kde T_1 je nová perioda periodického signálu $s(t)$. Dostaneme tak první tvar Fourierovy řady, kterému se říká goniometrický [8]:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(kwt) + b_k \sin(kwt), \quad (3.7)$$

kde k představuje celočíselné pořadové číslo vyšší harmonické složky, w představuje úhlovou frekvenci signálu. T představuje periodu signálu. Čas, ve kterém se signál nachází, je označován veličinou t . Jednotlivé koeficienty Fourierovy řady se vypočítají následovně:

$$a_0 = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) dt, \quad (3.8)$$

$$a_k = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) \cos(kw_1 t) dt, \quad (3.9)$$

$$b_k = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) \sin(kw_1 t) dt, \quad (3.10)$$

Základní Fourierovu řadu lze přepsat, aby lépe vyhovovala různým potřebám. Podle [8] můžeme získat druhý tvar Fourierovy řady tzv. amplitudově-fázový tvar Fourierovy řady:

$$s(t) = \frac{C_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(kw_1 t + \varphi_k), \quad (3.11)$$

kde

$$C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (3.12)$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{-b_k}{a_k}. \quad (3.13)$$

kde C_k je modul a φ_k je fáze koeficientů Fourierovy řady.

4 Barva zvuku

4.1 Definice barvy zvuku

Barva zvuku je mezinárodně definovaná jako „vlastnost sluchového vnímání, která umožňuje posluchači usoudit, že dva neidentické zvuky mající stejnou hlasitost a stejnou výšku si nejsou podobné“ [3], [4]. Samozřejmě se předpokládají, při sluchovém srovnávání dvou akustických signálů, stejné podmínky, stejný způsob prostorové prezentace a stejná subjektivní doba trvání [5]. V dodatku k citované definici se říká, že „barva zvuku závisí primárně na tvaru vlny, ale také na akustickém tlaku a krátkodobých vlastnostech zvuku“.

K této definici lze vyslovit několik výhrad, např. že definice vymezuje pojem barvy zvuku pouze negativně, tj. spíše nám říká, co barva zvuku není, než to, co barva zvuku je. Dále není pravda, že barvu zvuku lze posuzovat pouze u zvuků, které jsou stejně hlasité a současně stejně vysoké.

Barva zvuku je asi nejsložitější, nejzajímavější, nejvíce zkoumanou a přesto nejméně pochopenou a probádanou veličinou ze všech základních sluchových vjemových veličin. Výzkum barvy zvuku je metodicky a časově velmi náročný [1].

V této práci jsem pro její zkoumání využil metodu sémantického diferenciálu (viz kapitola 5.1). Ta se snaží jednotlivé zvukové podněty posuzovat z mnoha dílčích hledisek a vhodně je pojmenovat.

4.2 Výchozí teorie barvy zvuku

Pod pojmem zvuk si můžeme představit každý podnět, který může náš sluch zachytit. Přitom se rozlišuje vlastní zvuk (objektivní existence) od jeho následného vjemu (subjektivní existence) [13].

S jednoduchými tóny (tzn. kmitání sinusového průběhu) se v praxi setkáme jen výjimečně. Většina zvuků, se kterými se můžeme v běžném životě setkat spadá do kategorie komplexních zvuků s periodickým nebo náhodně se měnícím časovým průběhem [1].

V roce 1811 francouzský matematik Joseph Fourier popsal způsob rozkladu obecného periodického i neperiodického signálu do podoby řady či integrálu jednoduchých harmonických signálů (viz kapitola 3.3). Tím tak poskytl akustice matematické prostředky analýzy a syntézy zvukového signálu. Až později se podařila Ohmovi najít souvislost mezi touto matematikou a hudbou resp. zvukovými signály. Zjistil, že ucho vnímá pravidelné kmitání částic vzduchu jako jednoduchý tón a každé jiné periodické kmitání těchto částic rozkládá v řadu pravidelných (sinusových) kmitů a vnímá k nim odpovídající řadu jednoduchých tónů. Při určování vjemu barvy zvuku

lidské ucho v podstatě pracuje jako frekvenční analyzátor, kdy vyhodnocuje frekvenci a amplitudu jednotlivých dílčích kmitů. Fáze dílčích kmitů v tomto vjemu ale zastoupena není, protože lidské ucho není schopno fázi zvukového signálu zaregistrovat [2].

Zjištění přítomnosti konkrétní harmonické složky závisí nejprve na určení intervalu, který tato složka svírá s 1. harmonickou, jejíž frekvence určuje vnímanou výšku tónu.

Na základě dlouholetých analýz zvuku hudebních nástrojů vyslovil Erich Schumann svoje zákony barvy zvuku, které podle [2] zní:

1. Zákon formantových oblastí

Barva zvuku resp. tónu hudebního nástroje nezávisí na výšce základní harmonické složky, ale je dána pevnou (frekvenční) polohou formantových oblastí, které si vyznačují silnějšími vyššími harmonickými tóny. Při stoupající výšce tónu a jeho stejné dynamice setrvává intenzitní maximum dané formantové oblasti na příslušném harmonickém tónu tak dlouho, dokud tento harmonický tón nedosáhne horní hranice oblasti. Potom se maximum přesouvá na nižší harmonický tón, který se v této formantové oblasti nalézá, nebo který do ní právě vstupuje.

2. Zákon formantových intervalů

Pro barvu zvuku resp. tónu hudebního nástroje nejsou rozhodující jen frekvenční polohy jednotlivých formantových oblastí, ale také interval mezi těmito oblastmi. Rozhodující je především interval mezi nejsilnějšími harmonickými složkami (intenzitní maxima) těchto oblastí. Každý hudební nástroj má svoji vlastní charakteristickou velikost tohoto intervalu, což právě určuje jeho typickou barvu.

3. Zákon akustického posuvu

Při stoupající dynamice tónu se přesouvá intenzitní maximum v dané formantové oblasti na harmonické složky vyšších pořadových čsel. Složky v horní části oblasti jsou obecně silnější než složky ve spodní části.

4. Zákon akustického skoku

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

4.3 Vjem barvy zvuku

Vjem barvy zvuku je na rozdíl od vjemu výšky a hlasitosti veličinou vícerozměrnou nelze jej jednoduše ani subjektivně ani objektivně vyjádřit. Obecný verbální popis vjemu barvy vychází z pojmu „barevnost“, který je však subjektivně neurčitý a nestabilní.

Konkrétní verbální popis vycházející z pojmových párů (ostrý–tupý, světlý–tmavý apod.), sleduje už určitý zvolený rozměr barvy. Přesto i tato přiřazení pojmových párů k vybrané vlastnosti barvy jsou mnohem méně objektivní a přesná než subjektivní určení výšky či hlasitosti [2]. Výška tónu se dá totiž jednoduše vyjádřit párem hluboký–vysoký, hlasitost tónu párem tichý–hlasitý. K pojmenování barvy je naproti tomu velké až neomezené množství adjektivních párů. Navzdory bohatému množství slovních atributů, které se dají použít k popisu barvy zvuku, běžní lidé nedokáží barvu zvuku popsat vlastními slovy [5].

Nepřímá definice barvy tónu říká, že pokud dva stejně dlouhé tóny, které vykazují totožnou výšku i hlasitost, se od sebe odlišují, tak se odlišují právě ve své barvě.

Barva je základním akustickým typologickým rysem konkrétního hudebního nástroje. Velmi však záleží na výšce a dynamice tónu, technice hry a na jedinečných vlastnostech každého jednotlivého kusu nástroje. Další věcí která dělá výzkum barvy zvuku méně přesnou jsou různé zvukové zkušenosti posluchače. To je jeden z hlavních problémů při měření pomocí psychologické metody sémantického diferenciálu.

4.4 Spektrum tónu

Struktura harmonického spektra sleduje všeobecně známé uspořádání jednotlivých frekvenčních složek bez ohledu na jejich konkrétní velikost. Hudební intervaly mezi harmonickými složkami tvoří totiž pevnou strukturu spektra, zcela nezávislou na frekvenci první harmonické složky nebo na úrovni složek.

Hermann von Helmholtz v definici barvy tónu klade na první místo důležitosti právě počet složek. Naprostá většina diskretních spekter tónů stejné výšky vykazuje teoreticky stejný počet subjektivně vnímatelných složek, závislý pouze na zvoleném frekvenčním a dynamickém rozpětí spektra. Chybějící složky je možné si představit jako složky v každém případě existující, ale o mimořádně nízké úrovni.

Při použití Fourierovy řady (viz kapitola 3.3) platí při syntéze obyčejná linearita, kdy postupným přidáváním jednotlivých vyšších harmonických složek lineárně roste kvantita spektra, resp. jeho objektivní obsah. Co se však týká subjektivního vnímání, tak pro sluchový vjem barvy odpovídajícího tónu již zmíněná linearita neplatí. Vjem barvy tónu roste nelineárně.

V praxi to znamená, že objektivně se při součtu dvou jednoduchých tónů tvoří jen dvě složky spektra složeného tónu. Subjektivně se však tvoří minimálně tři složky, které spolu navzájem interferují a podílejí se na vjemu barvy tohoto tónu (viz kapitola 4.5.3).

Řada hudebních akustiků a psychologů přiznává vjem barvy zvuku i jednoduchým tónům (sinusovému kmitání) [6]. Barvu těchto tónů se snažil pojmenovat Helmholtz a na základě detailního zkoumání nejrůznějších jednoduchých tónů a jejich kombinováním definoval základní vztahy mezi typem spektra tónu a odpovídajícím vjemem jeho barvy:

1. Jednoduché sinusové tóny znějí velmi měkce a příjemně, bez jakékoliv drsnosti, ne silně a v hluboké poloze temně, tupě.
2. Komplexní tón, které jsou tvořeny harmonickými složkami přiměřené intenzity do 6. složky, znějí plně a „hudebně“. Jsou zvukově bohatší a průraznější. Absence harmonických vyšších pořadových čísel způsobuje jejich libozvučnost a měkkost. Tyto tóny jsou typické pro klavír, otevřené varhanní píšťaly a nízkou dynamiku lesního rohu i lidského hlasu.
3. Komplexní tóny tvořené řadou pouze lichých harmonických (liché spektrum), jako např. tóny vydávané klarinetem, dutě a při větším počtu vyšších harmonických „huhňavě“ resp. nasálně.
4. Převažuje-li ve spektru komplexního tónu 1. harmonická, jeho barva bude plná a tón bude nosný. V opačném případě při převaze vyšších harmonických se tón bude jevit jako prázdný (spíše úzký či užší). Tento rozdíl je typický mezi široce a úzce menzurovanými retnými varhanními píšťalami, mezi jazykovými píšťalami s přirozenou délkou ozvučny a tzv. regály, dále mezi klavírem a cembalem apod.
5. Komplexní tóny s intenzivními harmonickými nad 6. nebo 7. složkou mají barvu spíše ostrou a drsnou, což souvisí především s konkrétní sestavou těchto vyšších harmonických. Stupeň ostrosti tónu může být různý a velmi charakteristický, jako např. u plechových či dřevěných dechových nástrojů, u smyčcových nástrojů či lidského hlasu apod. a zřetelně tyto nástroje odlišuje (spolu s dynamikou tónu) [2].

Hraniční složky, tj. frekvenčně nejnížší a nejvyšší harmonická, mají ve spektru tónu významně subjektivní postavení. Nejnížší 1. harmonická je nejméně maskovaná a současně nejvíce posilovanou složkou ve vjemu barvy (viz kapitola 4.5.3). Její intenzita nebo dokonce i její absence sice nemá vliv na vjem výšky tónu, zásadně však ale určuje plnost a šířku tónu.

Na plnost dále navazuje další důležitá vlastnost tónu vztažená k procesu jeho šíření reálným prostorem, a to nosnost. Při nedostatečné intenzitě či absenci nižších harmonických složek (především 1. harmonické) tón ztrácí nosnost a v reálném prostoru se velmi rychle vytrácí. Jeho barva je pak závislá na konkrétních akustických podmínkách [2]. Vliv 1. harmonické složky na vjem nosnosti však v této práci zkoumat nebudu, protože při průzkumu použiji u všech respondentů sluchátka. Nosnost by byla třeba měřit ve větších akustických prostorech. V souvislosti s 1. harmonickou složkou se spíše zaměřím na vjem plnosti a šířky tónu.

Vymezení zcela konkrétní frekvenčně nejvyšší harmonické složky ve spektru reálného tónu je většinou problematické. Kromě toho také řada hudebních nástrojů produkuje tóny s harmonickými (i neharmonickými) v neslyšitelné oblasti nad 20 kHz. Můžeme však ale identifikovat nejdominantnější složku spektra, jejíž interval ke složce fundamentální (1. harmonické složce) je důležitý pro vjem barvy zvuku. Vjem barvy zvuk je v podstatě vnímání intervalů jednotlivých harmonických složek vůči sobě a vůči fundamentu (to platí především a jednotlivých složek do 7-8 harmonické), a také vnímání intervalů mezi formantovými oblastmi, především mezi jejich dominantními složkami.

Harmonické či neharmonické intervalové vztahy uvnitř diskrétního spektra nejsou jenom příčinou různého stupně konsonantnosti či disonantnosti frekvenční struktury jako souzvuku jejích složek, ale zásadní měrou určují také charakter tónu. V tomto směru lze vymezit základní typologické třídy spekter podle jejich struktury resp. obsahu harmonických složek. Po subjektivní stránce působí nejuniverzálněji spektrum komplexní (sudé i liché harmonické složky), které odpovídá časovému průběhu pilového signálu, např. tónu smyčcových nástrojů. Liché spektrum má spíše dutý a nasální charakter, např. tón klarinetu. Postrádá přitom světlost reálných oktávových složek. Sudé spektrum se projevuje nejvyšším stupněm zvukové světlosti a současně nejnižší barevností [2]. V praktické části této práce budu pomocí vhodně zvolených adjektivních škál zjišťovat, jakým způsobem budou respondenti liché a sudé spektrum vnímat.

4.5 Vjem dvou jednoduchých tónů

4.5.1 Vznik rázů

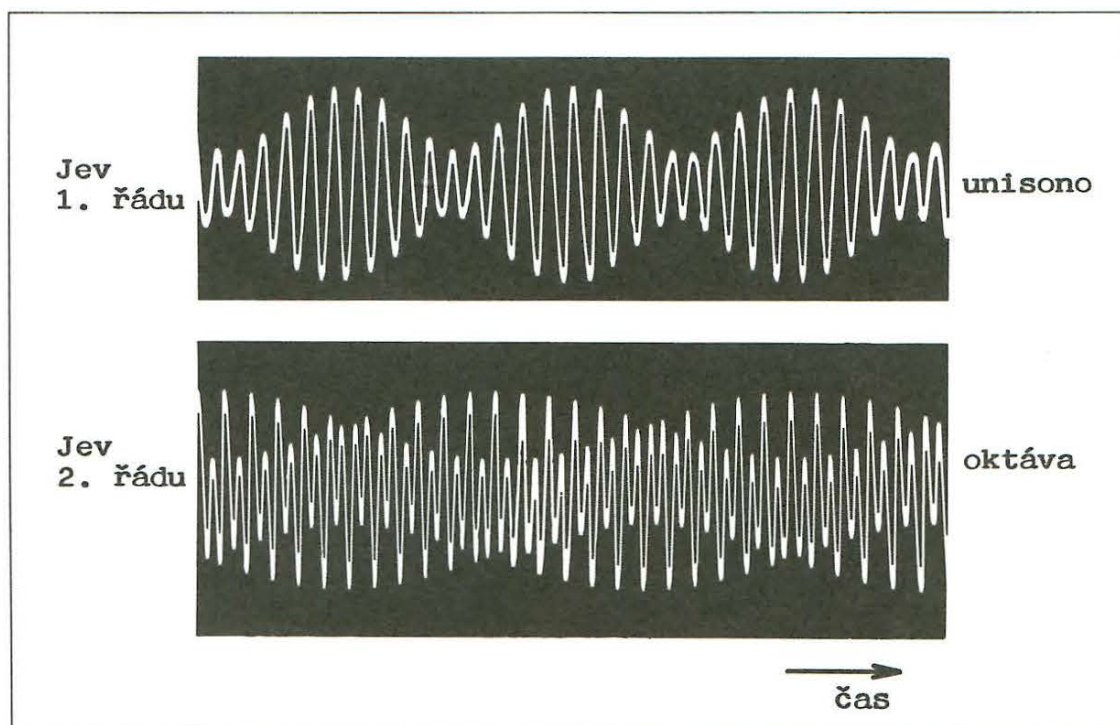
Důležitým případem vjemu dvou spoluznějících jednoduchých tónů je jejich postupné rozladování od unisono až po interval oktávy. Během tohoto rozladování dochází nejprve ke vzniku rázů a poté ke vzniku kombinačních tónů. Rázy vznikají při současném znění dvou nepatrně odlišných tónů (do rozdílu asi 20 Hz). Po kvalitativní stránce představují rázy v rozsahu své frekvence, tj. od 0 do cca 20 Hz

příjemné hudební tremolo podstatně obohacující sluchový vjem [2]. Rázů se využívá při ladění nástrojů – vyladování se provádí tak dlouho, až zázněje zcela vymizí. Rázy nevznikají v trilku či při tremolu a nejsou postřehnutelné ani mezi nástroji odlišné barvy nebo mezi tóny s rozdílnou intenzitou [13]. Těmto rázům rozladěného unisona se říká jevy prvního řádu (viz obr. 4.1).

Jestliže se frekvence tónu f_2 blíží k dvojnásobku frekvence tónu f_1 , tj. k oktávě, dochází znovu ke vzniku silných rázů (jevy druhého řádu) dle vztahu:

$$f_2 = 2f_1 + \mu, \quad (4.1)$$

kde μ představuje rozdíl frekvencí dvou tónů v rozsahu cca 0 až 16 Hz. Výsledný kmit začne měnit svůj tvar právě s periodou $1/\mu$. Tyto změny fáze mezi tóny f_1 a f_2 již ucho vnímá velmi citlivě. Od rázů rozladěného unisona se však velmi liší. Subjektivně se dá toto rázování rozladěné oktávy popisovat jako kolísání hlasitosti nebo výšky, a nebo jako pravidelné fluktace barvy. Vznik těchto rázů rozladěné oktávy se označuje jako jevy druhého řádu (viz obr. 4.1). Optimální podmínky vzniku rázů druhého řádu nastávají, má-li vyšší tón nižší intenzitu [2].



Obr. 4.1: Rázy unisona a oktávy [2]

Z hlediska subjektivního vnímání jsou rázy druhého řádu frekvenčně omezeny cca do 1500 Hz (pro f_1 i f_2). Nad touto hodnotou vjem rázování mizí. Vznik rázů druhého řádu je kromě rozladěného intervalu oktávy při zvýšené pozornosti vnímatelný

i u intervalu kvinty a kvarty. Frekvence rázování je zde však dvojnásobná, resp. trojnásobná, a také součet těchto dvou intervalů vede ke složitějšímu tvaru výsledného kmitání. Rázy těchto intervalů jsou tak pro ucho mnohem méně identifikovatelné [2].

4.5.2 Harmonická řada tónů

Před vysvětlením rozdílového mechanismu tónů (viz kapitola 4.5.3) je třeba zmínit harmonickou řadu tónů. Harmonická řada je posloupnost celočíselných násobků základní frekvence. Při znění základního tónu (fundamentu) zaznívají i tyto jeho celočíselné násobky. Tyto tóny jsou pak za sebou řazeny v konkrétních intervalech: základní tón, čistá prima – čistá oktáva – čistá kvinta – čistá kvarta – velká tercie – malá tercie – (menší) malá tercie – (větší) velká sekunda – velká sekunda (tzv. velký celý tón) – velká sekunda (tzv. malý celý tón), (větší) malá sekunda atd. Harmonické tóny si směrem nahoru přičítají frekvenci základního tónu, ale i tak se jejich intervaly směrem k vyšším stále zmenšují (viz tab. 4.1 a 4.2) [10].

C	c	g	c ₁	e ₁	g ₁	b ₁	c ₂	d ₂	e ₂	fis ₂	g ₂	as ₂	b ₁₂	h ₂	c ₃
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
66	132	198	264	330	396	462	528	594	660	726	792	858	924	990	1056

Tab. 4.1: Pořadí tónů harmonické řady a jejich kmitočty v Hz



Obr. 4.2: Harmonická řada tónů [12]

4.5.3 Rozdílový mechanismus tónů

Diferenční (rozdílové) tóny vznikají a znějí při hře dvojjzvuků a vícezvuků. Existenci diferenčních tónů jako první prokázal v roce 1741 německý hudební teoretik a varhaník Georg Andreas Sorge. Bývají také označovány jako Tartiniho tóny (podle Giuseppe Tartiniho, který tento druh tónů popsal v roce 1754). Zvláštností diferenčního tónu je to, že se nedá změřit, neboť vzniká až v uchu, díky nelinearitě sluchového aparátu [10].

Zazní-li tón, sluch tento tón vyhodnocuje jako souzvuk jeho harmonických složek. Sluchový vjem tónu můžeme chápat jako vyhodnocení souzvuku, tedy akordu jeho harmonických složek. Konsonantnost či disonantnost tohoto souzvuku souvisí nejprve s uspořádáním jednotlivých harmonických složek ve spektru, tzn. jaké intervaly souzvuk vyšších harmonických obsahuje, a teprve potom s intenzitou těchto harmonických v roli jednotlivých tónů souzvuku.

V důsledku nelineárního zkreslení ve sluchovém orgánu dochází subjektivně k obohacování zvukové informace. Při nelineárním zkreslení dochází ve sluchovém orgánu ke vzniku kombinačních tónů, a to jak diferenčních (rozdílových), tak sumačních (součtových). Frekvence diferenčního tónu prvního řádu je dána rozdílem frekvencí dvou současně vnímaných tónů a podle [2] se dá spočítat jako:

$$f_{r1} = f_1 - f_2. \quad (4.2)$$

Frekvence diferenčního je tedy rozdílem frekvencí základních tónů. V praxi si vznik diferenčního tónu můžeme představit tak, že když zazní dva tóny v intervalu menším než oktáva, leží diferenční pod nižším z nich. Zazní-li v intervalu větším než oktáva, nachází se mezi těmito tóny. Pokud je hraným intervalem čistá oktáva, je diferenční tón stejný jako nižší z produkovaných tónů [10].

Při vysokých intenzitách se objevují ještě diferenční, případně i sumační tóny vyšších řádů.

Existence sumačních tónů bývá někdy spojována až s velmi vysokými hladinami intenzity. Řada akustiků dokonce jejich přítomnost ve sluchovém vjemu popírá. Vznik kombinačních tónů je podle posledních výzkumů připisován převážně nelinearitě převodu hydrodynamických dějů v hlemýždi na nervové vzruchy. Šířící se vlna podél Cortiho orgánu postupuje totiž od vysokých k hlubokým frekvencím, a tak častěji inicializuje vláskové buňky pro vjem intenzivněji maskovaných vysokých frekvencí.

Naproti tomu v důsledku lineárního zkreslení a maskování slabších harmonických silnějšími harmonickými, dochází k ochuzování zvukové informace. Zkoumání tohoto subjektivního vjemu barvy je na rozdíl od objektivního obohacování spektra mnohem složitější.

Diferenční tóny vyšších řádů, které můžeme slyšet při relativně nižších intenzitách původních tónů, odpovídají frekvencím:

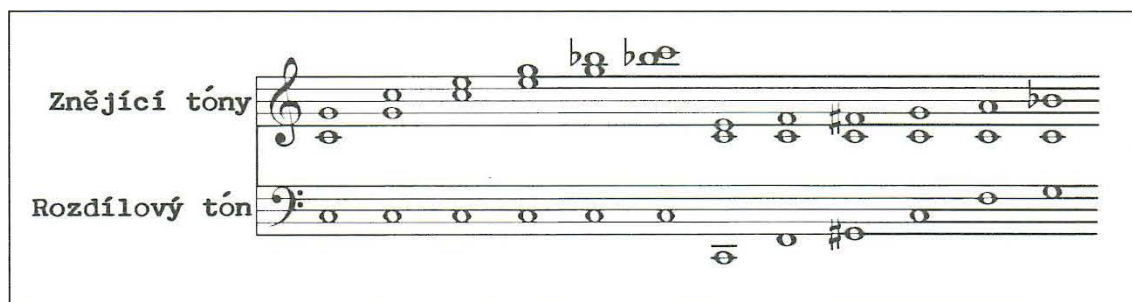
$$f_{r2} = 2f_1 - f_2 \quad (4.3)$$

$$f_{r3} = 3f_1 - f_2 \quad (4.4)$$

Druhý a třetí diferenční tón jsou zřetelně přítomny, když tón f_2 leží přibližně mezi $1,1f_1$ a $1,3f_1$.

Při nepatrném rozladění tónů f_1 a f_2 se diferenční tón prvního řádu ztotožňuje s rázy. Pokud se dva stejné tóny od sebe pomalu vzdalují, dochází k vjemu určité tónové výšky až při rozdílu frekvencí nad 20 Hz.

Diferenční tón vzniklý při zaznění dvou tónů různých intervalů je zobrazen na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Rozdílové tóny různých intervalů [2]

Co se týče jednotlivých intervalů a jejich vzniklých diferenčních a sumačních tónů, tak u primi resp. unisona je diferenční tón: $1 - 1 = 0$ v podstatě představován pouze vzniklými rázy v důsledku mírného rozladění unisona. Sumační tóny nemají téměř žádný vliv na obohacení sluchového vjemu, i tak je ale zajímavé zkoumat jejich fiktivní polohu, hlavně co se týče vzniku disonancí ve spektru. Sumační tón unisona: $1 + 1 = 2$ posiluje oktávu, tj. 2. harmonickou.

V intervalu oktávy posiluje diferenční tón: $2 - 1 = 1$ 1. harmonickou a sumační tón: $2 + 1 = 3$ zcela paradoxně 3. harmonickou tj. kvintu. Oktáva je v akustice zvláštním intervalem. Diferenční tón zde posiluje fundament, tudíž zde nedojde k nějakému výraznějšímu barevnému obohacení. Proto také, je-li tón složen pouze z 1. a 2. harmonické, je barevně chudý.

Je-li však tón složen z 1. a 3. harmonické, můžeme říct, že jeho barva je již plná. Mechanismus diferenčního tónu: $3 - 1 = 2$ doplňuje chybějící 2. harmonickou a sumační tón: $3 + 1 = 4$ obsazuje pozici 4. harmonické. U kvinty, tj. intervalu mezi 2. a 3. harmonickou, posiluje její diferenční tón: $3 - 2 = 1$ základní harmonickou složku. Sumační tón: $3 + 2 = 5$ obsazuje pozici 5. harmonické, tj. tercie. Tím se interval kvinty zřetelně obohacuje lichostí, resp. nasalitou. Proto je také kvinta považována za základní barvotvorný interval.

I u intervalu kvarty posiluje diferenční tón: $4 - 3 = 1$ základní harmonickou složku, stejně jako u kvinty. Kvarta však oproti kvintě nevykazuje tak velký stupeň konsonance. Jedním z důvodů je její sumační tón: $4 + 3 = 7$, který posiluje disonantní 7. harmonickou. Dvouoktávový vztah 4. a 1. harmonické vede k diferenčnímu tónu:

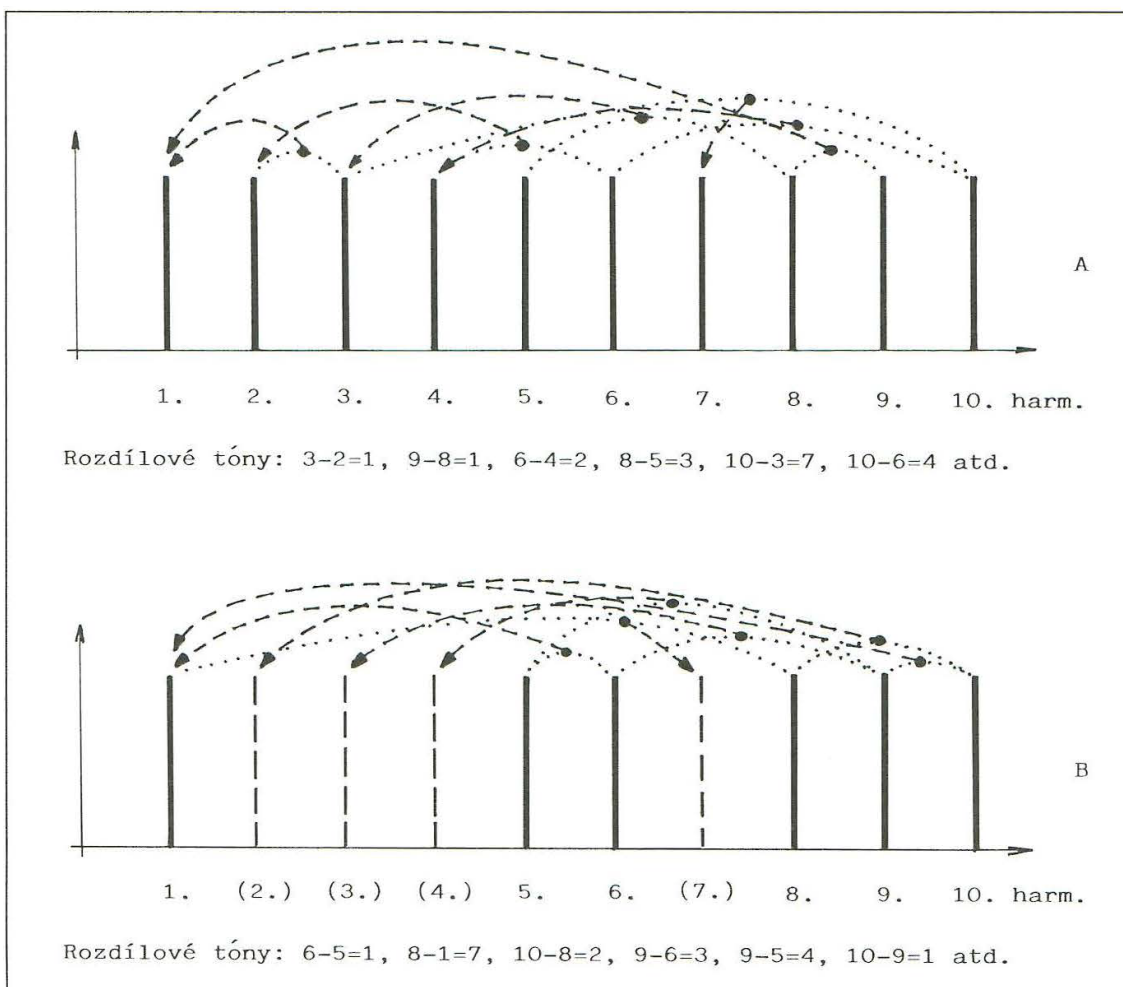
$4 - 1 = 3$ kvinty, tj. 3. harmonické a v sumačním tónu: $4 + 1 = 5$ obsazuje 5. harmonickou, tedy tercii.

Interval velké sexty mezi 3. a 5. harmonickou má diferenční tón: $5 - 3 = 2$ v pozici 2. harmonické a sumační tón: $5 + 3 = 8$ v pozici 8. harmonické. Takhle by se dalo pokračovat ve výčtu diferenčních a sumačních tónů dále.

Díky pozicím diferenčních tónů si můžeme všimnout, že posilující mechanismus směřuje od vyšších frekvencí k nižším, a to až k fundamentu. Směrem k vyšším frekvencím se uplatňují sumační tóny, zde se však uplatňuje intenzivní maskování, a tak se vliv těchto tónů nepřipouští. Případné omezení nízkých frekvencí je tímto posilujícím mechanismem subjektivně kompenzováno. Např. u tónů s nízkou úrovní 1. harmonické složky vůči vyšším složkám lidský sluch neustále vnímá výšku hraného tónu [2]. Tento zvukový jev se v praxi využívá např. při stavbě varhan, kdy se neinstalují nejdelší píšťaly pro tóny nejnižších subkontraoktávových frekvencí, ale místo nich se použijí dvě píšťaly vyšších kontraoktávových frekvencí, které nám svým rozdílem vytvoří sluchový vjem požadovaného subkontraoktávového tónu [10].

Naproti tomu směrem k vysokým frekvencím tento posilující mechanismus chybí a proto také případnou absenci vyšších harmonických složek ve spektru tónu nelze nijak subjektivně doplnit.

Subjektivní pohled na spektrum tónu předpokládá a zohledňuje vzájemnou interakci jednotlivých harmonických složek (viz obr. 4.4 A) Ta může být někdy tak silná, že ve vjemu barvy subjektivně převažuje konkrétní interval, který objektivně ve spektru vnímaného tónu není vůbec obsažen. U většiny hudebních nástrojů je sled harmonických složek nepřerušovaný, a tak subjektivní vjem stávající složky jen ověřuje a potvrzuje. Pokud je sled vyšších harmonických přerušovaný, subjektivní vjem na místa chybějících složek dosazuje nové „virtuální“ harmonické složky (na obr. 4.4 B) jsou vyznačené čárkovaně), které informaci o barvě doplňují.



Obr. 4.4: Mechanismus posilování a doplňování spektra [2]

5 Výzkum

5.1 Metoda sémantického diferenciálu

Metoda sémantického diferenciálu se nejprve používala k zjišťování a měření významu pojmů, později našla uplatnění při zkoumání osobnosti, v sociologii, experimentální estetice i jinde.

Při výzkumu vlivu jednotlivých harmonických složek na vjem barvy zvuku jsem se rozhodl pro použití této metody, protože jsou při ní objekty (vzorčky v dotazníku) posuzovány z mnoha dílčích hledisek. Díky tomu je možné jejich komplexní posouzení. V psychoakustice se tato metoda používá k zjišťování základních percepčních dimenzí vícerozměrných subjektivních veličin jako je barva zvuku, celková kvalita, rušivost hluku apod.

Při měření metodou sémantického diferenciálu se po respondentech žádá, aby vyšetřované objekty (v mém případě jednotlivé vzorky signálu) posoudili na několika bipolárních posuzovacích škálách. Škály bývají většinou sedmistupňové a jejich póly jsou definovány dvojicemi protikladných pojmů (v mém případě adjektiv např. jemný/drsný, konsonantní/disonantní, tmavý/jasný apod.). Při zpracování soudů, které pokusné osoby vyjádřily označením těch poloh na škále, které nejlépe odpovídají jejich posouzení podnětu, se nejprve podle zvoleného klíče každému stupni škály přiřadí odpovídající číselná hodnota (sedmistupňové škále můžeme např. zleva doprava přiřadit čísla 1, 2, 3, . . . , 7). K slovnímu označení jednotlivých stupňů škály se používají výrazy jako „mimořádně“, „velmi“, „trochu“, „ani jeden“.

5.2 Volba posuzovacích škál

Asi nejobtížnější část experimentu představuje správný výběr vhodných posuzovacích škál. Dělal jsem si obavy, že kdybych v dotazníku uvedl adjektiva jako medový, jadrný, nasální apod. výsledky by mohly být nepřesné, protože by každý respondent cítil význam adjektiva jinak. Případně by vůbec neměl představu, co má konkrétní adjektivum představovat. Z toho důvodu je nezbytné před výzkumem barvy zvuku sesbírat vhodná adjektiva. Sběr popisných adjektiv lze provádět různými způsoby. Můžeme vzít z vědecké literatury již hotové slovníky adjektiv, sestavené na základně dřívějšího zkoumání barvy zvuku, nebo můžeme sestavit vlastní slovník z relevantních popisných adjektiv vyskytujících se s velkou částí v odborné literatuře. Další možností získání vhodných adjektiv je experimentální sběr adjektiv, kdy respondenti na základně předkládaných pojmů, hodnotí jejich srozumitelnost a vhodnost k popisu barvy zvuku.

Já jsem využil výsledky provedeného experimentálního sběru dat Jana Štěpánka a Ondřeje Moravce a podle jejich práce [14] a na základě vlastního citu jsem využil následující adjektiva: barevný, mdlý, úzký, široký, drsný, sametový, světlý, tmavý, jemný, plný, prázdný, hladký, jasný, tmavý, konsonantní, disonantní, ostrý tupý, jiskrný, přidušený, znělý, zvonivý, ale i příjemný a nepříjemný.

5.3 Pilotní průzkum

Před rozsáhlým kvantitativním výzkumem jsem v rámci semestrální práce vytvořil pilotní výzkum s deseti respondenty. Hlavní důvod byl ten, abych odhalil případné nedostatky, upravil či pozměnil zkoumané vzorky a upravil škály tak, aby byli respondenti schopni co nejpřesněji vyjádřit vjem barvy zvuku.

Pilotní dotazník byl vytvořen v prostředí MS Excel. Respondentovi bylo sděleno, že bude v daném pořadí spouštět jednotlivé vzorky. Vzorky budou umístěny vpravo od posuzovacích škál a budou se spouštět dvojklikem. Respondent bude upozorněn, že poslechový test musí provádět v určeném pořadí, které je dáno pořadím vzorků. Po poslechnutí vzorku, který má přibližně 3 vteřiny, respondent zapíše hodnotu 1 do vybrané buňky. Zvolená buňka představuje stupeň posuzovací škály, který nejlépe odpovídá jejich posouzení podnětu (viz obr. 5.1). Každý vzorek bude hodnocen pomocí čtyř škál s antonymními adjektivními páry. Vzor vyplněných škál v pilotním dotazníku u prvních tří vzorků je zobrazen na následujícím obrázku 5.1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	vzorek 1	<i>mimořádně</i>	<i>velmi</i>	<i>poněkud</i>	<i>ani jeden</i>	<i>poněkud</i>	<i>velmi</i>	<i>mimořádně</i>		
2	plný	1							dutý	
3	bryskní			1					tupý	
4	široký		1						úzký	
5	jasný				1				zastřený	
6										
7	vzorek 2	<i>mimořádně</i>	<i>velmi</i>	<i>poněkud</i>	<i>ani jeden</i>	<i>poněkud</i>	<i>velmi</i>	<i>mimořádně</i>		
8	řezavý			1					jemný	
9	plný							1	prázdný	
10	drsný			1					hladký	
11	jasný				1				tmavý	
12										
13	vzorek 3	<i>mimořádně</i>	<i>velmi</i>	<i>poněkud</i>	<i>ani jeden</i>	<i>poněkud</i>	<i>velmi</i>	<i>mimořádně</i>		
14	ostrý					1			tupý	
15	příjemný			1					nepříjemný	
16	plný				1				prázdný	
17	konsonantní			1					disonantní	

Obr. 5.1: Příklad ohodnocení prvních tří vzorků

5.4 Python GUI

Pilotní dotazník vytvořený v prostředí MS Excel nebyl vhodný pro rozsáhlý kvantitativní výzkum. Stávalo se, že respondenti opomíjeli ohodnotit některé škály, a dokonce i vzorky. Celkově byl dotazník nepřehledný a špatně se v něm orientovalo.

Pro hlavní průzkum jsem se proto rozhodl vytvořit vlastní aplikaci v programovacím jazyce Python pomocí modulu tkinter. Respondenti zaklikávali zvolené stupně škály přímo do aplikace a nebylo nutné každému respondentovi předkládat vlastní záznamový arch. Papírové záznamové archy bývají při větším množství mnohem složitější na zpracování a celkovou manipulaci.

V Pythonu jsem využil knihovnu openpyxl, která umožňuje číst a zapisovat do Excelu. Při každém započetí dotazníku se v Excelu vytvořil nový list. Na každého respondenta tak připadal vlastní list a ten se ukládal do jednoho souboru s celkovými výsledky. Buňky A až G představovaly v každém listě číselné hodnoty škály. Do těchto buněk se zapisovaly hodnoty 1 až 7 podle zvoleného stupně škály respondenta v aplikaci. Výsledky všech buněk všech listů se poté sečetly a vypočetly se se jejich aritmetické průměry pro každou buňku tzn. všechny výsledné hodnoty buněk B až H byly sečteny a vyděleny počtem respondentů. To nám dalo žádaný aritmetický průměr u jednoho vzorku od všech respondentů pro jednu ze čtyř škál.

5.4.1 Průběh výzkumu

Původní plán byl takový, že každý respondent obdrží zkalibrovaná sluchátka a jeden notebook. Bohužel kvůli vzniklé epidemii koronaviru se nebylo možné setkat s respondenty osobně. A tak byla aplikace respondentům rozesílána přes internet.

Po spuštění aplikace respondent zadal věk, pohlaví a hudební nástroj, na který hraje, nebo kterému se věnuje nejvíce. Při pokračování byl ještě dotázán, zda je studentem oboru Audio inženýrství, pedagogem hudební školy, studentem hudební školy, výkonným umělcem nebo pracujícím zvukařem. Pro výzkum bylo čerpáno právě z těchto skupin lidí. Jedná se o poměrně náročný výzkum. Nemělo cenu brát respondenty z laické veřejnosti. Aby výsledky vykazovaly nějaké smysluplné hodnoty, respondenti byli bráni z řad lidí, kteří nějakým způsobem aktivně trénují svůj sluch, a tím pádem dokáží analyzovat a popsat to, co slyší.

Po zodpovězení všech otázek následoval samotný dotazník. Skládal se celkem z 29 vzorků. U každého vzorku se měří počet, kolikrát si respondent musel vzorek přehrát. Tento údaj nám poté řekne, které ze vzorků byly nejnáročnější na posouzení.

Aby se zabránilo opomenutí ohodnocení některé za škál, tlačítko pro pokračování na následující vzorek se objeví až poté, co respondent všechny škály ohodnotí.

Screenshot prostředí aplikace je zobrazen na následujícím obrázku 5.2.

Vzorek 4

Přehrát vzorek

plný Mimořádně Velmi Trochu Ani jeden Trochu Velmi Mimořádně prázdný

široký Mimořádně Velmi Trochu Ani jeden Trochu Velmi Mimořádně úzký

zvonivý Mimořádně Velmi Trochu Ani jeden Trochu Velmi Mimořádně sametový

jasný Mimořádně Velmi Trochu Ani jeden Trochu Velmi Mimořádně tmavý

Další vzorek

Obr. 5.2: Dotazník v Pythonu

5.5 Vzorky

Správný výběr vzorků byl stěžejní pro analýzu vlivu harmonických složek na vjem barvy zvuku. Variant, které se daly zkoumat na základě jednotlivých harmonických složek bylo obrovské množství. Důležité tedy bylo si vybrat, na co se má práce zaměřit. Práce kladla důraz především na kombinaci harmonických složek s různou mírou inharmonicit a to převážně v prvním pásmu tzn. 1.-8. harmonická a na harmonické složky a jejich intenzitu u vybraných hudebních nástrojů. V rámci dotazníku je zkoumán i vjem formantů při různých intenzitních maximech, vliv šumu na vjem disonance rozladěných harmonických a na jednom vzorku se zkoumá vjem velmi znatelných rázů. V rámci práce byly stanoveny určité skupiny vzorků, vypracován předpoklad, jak by mohli posluchači určité vzorky vnímat a poté byly tyto vzorky mezi sebou porovnány na základě výsledků dotazníku. Byla připravena sada celkem 29 vzorků s různou zvukovou barvou. Umělé signály byly vymodelovány v aditivním syntetizéru Morphine a hudební nástroje byly brány a jejich harmonické složky upravovány rovněž v Morphine.

5.5.1 Pořadí vzorků a jejich kategorizace

Aby výzkum měl nějaký smysl je třeba vzorky podobného charakteru vhodně rozdělit do skupin a v těchto skupinách výsledky porovnat na stejných škálách a při hraní

stejně melodie. Vzorky byly rozděleny do osmi skupin. Z toho se čtyři skupiny týkají pouze vzorků vzniklých aditivní syntézou a další čtyři upraveným spektrem vybraných hudebních nástrojů. Skupiny vzorků aditivní syntézy byly: sudé a liché vzorky, vzorky vzniklé kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu, vzorky s formantovými oblastmi a rázy a vzorky s různou mírou inharmonicit a šumem. Skupiny hudebních nástrojů s upraveným spektrem byly: vzorky klavíru, vzorky trombónu, vzorky kytary a vzorky varhan.

U všech těchto skupin byly vzorky roztríděny v tabulce, která obsahuje pořadí vzorku v dotazníku, druh (způsob vytvoření vzorku: aditivní syntéza/hudební nástroj), tóny melodie a seznam harmonických složek, ze kterých byl vytvořen. Každá skupina má přiřazenou jinou barvu, aby se z celkové tabulky všech vzorků (viz tab. 5.9) dalo přehledně určit rozmístění vzorků konkrétní skupiny v rámci celého dotazníku.

Sudé a liché vzorky

Tato skupina obsahuje celkem 4 vzorky. Z toho 2 vymodelované pomocí aditivní syntézy a 2 hudební nástroje, u kterých byly upravené harmonické složky. Na této skupině vzorků se zkoumají předpokládané barvy sudého a lichého spektra. Seznam vzorků je uveden v následující tabulce 5.1.

Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky
vzorek č. 1	syntéza	D, E, Fis, E, D	sudé
vzorek č. 9	syntéza	D, E, Fis, E, D	liché
vzorek č. 15	klavír	D, E, Fis, E, D	v prvním pásmu pouze liché HS
vzorek č. 21	klavír	D, E, Fis, E, D	v prvním pásmu pouze sudé HS

Tab. 5.1: Seznam vzorků se sudými a lichými harmonickými

Sudé vyšší harmonické (2, 4, 6, 8) tvoří oktávy od fundamentální složky (1. harmonická), a proto jsou konsonantnější – podporují tonalitu a ladění. Liché vyšší harmonické (1, 3, 5, 7) tvoří s fundamentem intervaly čisté kvinty, velké tercie, malé septimy atd. Obsahem těchto harmonických se ve spektru zvyšuje disonance. Předpoklad je takový, že vzorky se sudým obsahem spektra budou vykazovat konsonantnější, jasnější a méně plnou barvu. Vzorky s lichým obsahem spektra se naproti tomu budou zdát jako disonantnější, zvonivější a s plnější barvou.

Vzorky vzniklé kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu

Tato skupina obsahuje celkem 4 vzorky. Všechny jsou vymodelované pomocí aditivní syntézy. Každý vzorek obsahuje vždy 1., 2., 4., 8. harmonickou složku a k nim je přiřazována 3., 4., 5., 7., harmonická složka o vyšší intenzitě. V této skupině

je zkoumán vliv mimooktávových složek v prvním pásmu spektra na barvu zvuku – především pak účinek rozdílového mechanismu tónů (viz kap. 4.5.3). Seznam vzorků je uveden v následující tabulce 5.2.

Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky
vzorek č. 3	syntéza	H, E, A, Gis, Fis	1, 2, 4, 7, 8 - 7 - vyšší intenzita
vzorek č. 7	syntéza	H, E, A, Gis, Fis	1, 2, 4, 6, 8 - 6 - vyšší intenzita
vzorek č. 18	syntéza	H, E, A, Gis, Fis	1, 2, 3, 4, 8 - 3 - vyšší intenzita
vzorek č. 25	syntéza	H, E, A, Gis, Fis	1, 2, 4, 5, 8 - 5 - vyšší intenzita

Tab. 5.2: Seznam vzorků vzniklých kombinací harmonických složek v první pásmu

U vzorku s posílenou 7. harmonickou složkou (vzorek č. 3) je předpokládáný vjem disonance, protože 7. harmonická složka svírá s fundamentem disonantní interval malé septimy. Navíc při tomto složení spektra 7. harmonická složka subjektivně doplňuje díky diferenčnímu tónu $7-2=5$ 5. harmonickou složku a díky diferenčnímu tónu $7-4=3$ 3. harmonickou složku. Tím se tento vzorek obohacuje lichostí a proto by se měl zdát jako plný, zvonivý, bryskní a více disonantní.

Vzorek s posílenou 6. harmonickou (vzorek č. 7) by se měl zdát jako mírně konsonantní, protože 6. harmonická složka svírá s fundamentem interval čisté kvinty. Diferenční tóny pak většinou posilují oktávové složky např. $8-6=2$ posiluje 2. harmonickou složku, $6-4=2$ posiluje rovněž 2. harmonickou složku. Tím se ještě více posiluje tonalita. Díky 6. harmonické složce by se tak vzorek měl zdát jako konsonantní a jasný.

U vzorku s posílenou 3. harmonickou složkou (vzorek č. 18) došlo ke zvýraznění dutého charakteru. Předpokládá se tedy vjem mírné konsonance a dutého charakteru. Diferenční tóny $3-1=2$, $3-2=1$ a $4-3=1$ podporují základní tonální složky. A Diferenční tón $8-3=5$ podporuje 5. harmonickou složku. Tím se mírně obohacuje lichostí a díky posíleným tonálním složkám by se měl zdát jako zvonivý, konsonantní a dutý.

5. harmonická složka (vzorek č. 25) svírá s fundamentem interval velké tercie. 5. harmonická složka by u vzorku měla posílit nazalitu. Rozdílový mechanismus tónů subjektivně doplňuje v případě diferenčního tónu $5-2=3$ 3. harmonickou složku a v případě diferenčního $8-5=3$ také 3. harmonickou složku. 3. harmonická složka tvoří s fundamentem interval kvinty. U vzorku obsahujícího kromě oktávových složek i 5. harmonickou se předpokládá vjem lichosti tzn. bude se zdát jako zvonivý, bryskní, nazální a mírně konsonantní.

Vzorky s různou mírou inharmonicit a šumem

Tato skupina obsahuje celkem 4 vzorky. Všechny byly vymodelované pomocí aditivní syntézy. Na dvou vzorcích s rozladěnými prvními třemi harmonickými se zkoumá, do jaké míry zabránil šum vjemu disonance. U zbylých dvou se porovnává vjem inharmonicit v závislosti na počtu oktávových složek. Seznam vzorků je uveden v následující tabulce 5.3.

Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky
vzorek č. 12	syntéza	D, E, Fis, E, D, Cis, D	1, 2, 3, 5, 6, 8, 10 - 1, 2, 3 - rozladěné
vzorek č. 16	syntéza	D, E, Fis, E, D, Cis, D	1, 2, 4 - 2, 4 - rozladěné
vzorek č. 22	syntéza	D, E, Fis, E, D, Cis, D	1, 2, 3, 4 - 2, 4 - rozladěné
vzorek č. 28	syntéza	D, E, Fis, E, D, Cis, D	1, 2, 3, 5, 6, 8, 10 - 1, 2, 3 - roz. + šum

Tab. 5.3: Seznam vzorků s různou mírou inharmonicit

Vzorek č. 12 a vzorek č. 28 jsou složeny ze spektra čítající 7 harmonických složek. Celkový charakter znějících harmonických je konsonantní skládající se z oktáv, kvint a tercií. U obou vzorků je však 1., 2. a 3. harmonická složka rozladěná (výška první a třetí je zvýšena o 10 %, výška druhé snížena o 10 %). Ke vzorku č. 28 je přimíchán šum do oblasti těchto harmonických. Cílem je zjistit, zda-li šum vzorku prospěl co se týče konsonantnosti a celkové příjemnosti poslechu tohoto vzorku, nebo zda-li je lepší slyšet ve vzorku disonanci, ale bez šumu.

Vzorek č. 16 a vzorek č. 22 jsou oba složeny z 1., 2. a 4. harmonické, což jsou oktávové tonální složky. U obou vzorků jsou rozladěné první dvě harmonické (výška první je zvýšena o 10 % a výška druhé je snížena o 10 %). K vzorku č. 22 je navíc přidána 3. harmonická – ta tvoří kvintu k fundamentu. Cílem srovnání těchto dvou vzorků je zjistit, zda-li přidaná 3. harmonická pomůže k silnějšímu cítění tonality vzorku a tudíž menšímu vjemu disonance, či nikoliv.

Vzorky s formantovými oblastmi a rázy

Tato skupina obsahuje celkem 3 vzorky. Všechny byly vymodelované pomocí aditivní syntézy. Jsou zde zkoumány rázy a vliv umístění formantu na vjem barvy zvuku. Seznam vzorků je uveden v následující tabulce 5.4.

Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky
vzorek č. 5	syntéza	C, E, D, F, E, G, C	1, 2, 4, 8 + formant při dominující 27
vzorek č. 14	syntéza	C, E, D, F, E, G, C	1, 2, 4, 8 + formant při dominující 32
vzorek č. 20	syntéza	C	pouze 2. HS - jednou rozladěná

Tab. 5.4: Seznam vzorků s formantovými oblastmi a rázy

Vzorek č. 5 a Vzorek č. 14 se skládají z 1., 2., 4. a 8. harmonické složky. K nim je přidána formantová oblast. Intenzitní maxima formantových oblastí jsou u obou vzorků odlišné. U vzorku č. 5 se intenzitní maximum nachází na 27. harmonické složce – předpokládá se větší vjem disonance a drsného nepříjemného charakteru, než u vzorku č. 14. Zde je intenzitní maximum formantové oblasti na 32. harmonické složce, ta je celočíselným násobkem fundamentu, a tudíž podporuje tonalitu.

Vzorek č. 20 je trochu odlišný. Není reprezentován melodií, nýbrž pouze jedním tónem. Je složen ze dvou současně znějících tónů C. Z toho jeden zní o 12 Hz níž. Tento malý rozdíl frekvencí dvou shodných tónů splňuje podmínku pro vznik rázů (viz kapitola 4.5.1).

Vzorky klavíru

Tato skupina obsahuje celkem 3 vzorky vzniklé ubíráním a posilováním vybraných harmonických složek u spektra klavíru. V této skupině je zkoumán vliv 1. a 2. harmonické složky na nosnost a plnost tónu klavíru. Dále pak vliv posílené a konstantní složky ve spektru klavíru.

Seznam vzorků je uveden v následující tabulce 5.5.

Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky
vzorek č. 2	klavír	G, D, C, H, A, G	původní spektrum klavíru
vzorek č. 8	klavír	G, D, C, H, A, G	7 - vyšší intenzita
vzorek č. 29	klavír	G, D, C, H, A, G	bez 1, 2

Tab. 5.5: Seznam vzorků klavíru

U vzorku č. 2 nedošlo k žádné úpravě. Jedná se o původní spektrum klavíru (viz obr. 6.16). Slouží zde jako referenční bod, se kterým budeme porovnávat následující dva vzorky klavíru s již upraveným spektrem.

Vzorek č. 8 má odebranou 1. a 2. harmonickou (viz obr. 6.17). Tyto dvě harmonické jsou v podstatě základními nosnými pilíři spektra. Jejich odebrání by mělo způsobit, že se vzorek bude zdát jako slabý, prázdný, mdlý a úzký.

U vzorku č. 29 se posílila 7. harmonická složka a v celé časové oblasti spektra zůstala konstantní (viz obr. 6.18). Díky melodii, u které šly tóny hned po sobě, konstantní „trčivý“ charakter příliš nevynikne. Ale i tak se předpokládá její vliv na posílení vjemu drsnosti a především disonance vzorku. Důvodem je to, že 7. harmonická složka svírá s fundamentem disonantní interval malé septimy.

Vzorky varhan

Tato skupina obsahuje celkem 5 vzorků. Všechny vznikly posilováním nebo odebráním vybraných harmonických složek varhan. Opět zde je zkoumán vliv 1. a 2. harmonické složky. Dále pak vliv posílení harmonických složek, které by měly způsobit silný vjem disonance. Naopak u dalšího vzorku se zkoumá vjem barvy spektra varhan s posílenými oktávovými harmonickými, a také s úplně odebranými oktávovými složkami. Seznam vzorků je uveden v následující tabulce 5.6.

Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky
vzorek č. 4	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	původní spektrum varhan
vzorek č. 10	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	7, 9, 11, 14 - posílené
vzorek č. 17	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	1, 2, 4, 8, 16, 32 - posílené
vzorek č. 23	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	bez 1, 2, 4, 8, 16, 32
vzorek č. 27	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	bez 1, 2

Tab. 5.6: Seznam vzorků varhan

Vzorek č. 4 je složen z původního spektra varhan (viz obr. 6.19). Vzorek č. 10 se skládá z původních složek spektra varhan, ale jsou u něj posíleny harmonické složky, které s tonálními složkami tvoří následující intervaly: malá septima, velká sekunda, zvětšená kvarta a malá septima (7., 9., 11. a 14. harmonická) (viz obr. 6.20). U tohoto vzorku tedy počítáme s vjemem disonance, drsnosti, zvonivosti a jasného charakteru.

Vzorek č. 17 má posílené pouze oktávové tonální složky (1., 2., 4., 8., 16. a 32. harmonickou) (viz obr. 6.21) a tudíž by měl působit konsonantně, plně a rovněž zvonivě. Naproti tomu vzorek č. 23 má tyto tonální oktávové složky odebrané (viz obr. 6.21). Měl by se tak zdát jako barevně mdlý, prázdný, úzký a méně jasný.

U vzorku č. 27 stejně jako u klavíru zkoumáme vliv odebrané 1. a 2. harmonické složky na vjem barvy zvuku (viz obr. 6.23). Vzorek by se měl zdát jako mdlý, slabý, málo nosný a úzký.

Vzorky kytary

Tato skupina obsahuje celkem 3 vzorky. Všechny vzorky jsou vzniklé upravením vybraných harmonických složek u kytary. Cílem je porovnat, u jakého ze tří uvedených nástrojů (klavír, varhany a kytara) dojde k největšímu poklesu vjemu plnosti barvy a šířky tónu, zapříčiněným odebráním 1. a 2. harmonické složky. Dále je zde vzorek s rozladěnou 3. harmonickou složkou a zkoumá se vliv této složky na vjem disonance. Seznam vzorků je uveden v následující tabulce 5.7.

Vzorek č. 6 se skládá z původních složek spektra kytary (viz obr. 6.24). U vzorku č. 11 došlo k odebrání 1. a 2. harmonické složky (viz obr. 6.25) a bude se porovnávat, u jakého nástroje došlo k největší újmě na vjemu barvy zvuku.

Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky
vzorek č. 6	kytara	H, Dis, Cis, H, E, H	původní spektrum kytary
vzorek č. 11	kytara	H, Dis, Cis, H, E, H	bez 1, 2
vzorek č. 24	kytara	H, Dis, Cis, H, E, H	3 - rozladěná

Tab. 5.7: Seznam vzorků kytary

Vzorek č. 21 obsahuje původní složky (viz obr. 6.4). Výška 3. harmonické složky je však u něj zvýšena o 10 % . 3. harmonická složka tvoří interval čisté kvinty k fundamentu a je to základní barvotvorná složka. Jejím rozladěním by se mělo docílit vjemu nepříjemné a drsnější barvy, disonantnosti a ostrosti.

Vzorky trombónu

Tato skupina obsahuje celkem 3 vzorky. Všechny vznikly upravením a rozladěním vybraných složek spektra trombónu. Vzorky mají rozladěné buď sudé nebo liché složky. Cílem je zjistit, jaká varianta působí pro sluch hůře a zní více disonantně. Seznam vzorků je uveden v následující tabulce 5.8.

Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky
vzorek č. 13	trombón	Gis, H, Gis, E, Gis, Fis	původní spektrum trombónu
vzorek č. 19	trombón	Gis, H, Gis, E, Gis, Fis	1, 2, 4, 8 - rozladěné
vzorek č. 26	trombón	Gis, H, Gis, E, Gis, Fis	3, 5, 6, 7 - rozladěné

Tab. 5.8: Seznam vzorků trombónu

Vzorek č. 13 je složen rovněž z původních složek spektra trombónu (viz obr. 6.27). Vzorek č. 19 má rozladěnou 1., 2., 4. a 8. harmonickou složku – rozladíme u něj oktávové složky, které nám určují základní frekvenci (viz obr. 6.28). Vzorek č. 26 má rozladěnou 3., 5., 6. a 7. harmonickou složku – u tohoto vzorku došlo k rozladění mimooktávových složek z prvního pásma (viz obr. 6.29). Cílem je tedy zjistit, jaký z těchto dvou vzorků bude mít drsnější a disonantnější charakter.

5.5.2 Pořadí vzorků

Určení správného pořadí vzorků bylo jedním z hlavních důvodů vypracování pilotního průzkumu. Pořadí v dotazníku musí být takové, aby vzorky z jednotlivých skupin nešly ihned po sobě, ale aby byly umístěné ve větším rozestupu. Dále bylo třeba, aby vzorky byly v dotazníku promíchány v takovém pořadí, aby byl pestrý a posluchače nenudil. Pestrost dotazníku se zajistila tím, že se mezi vymodelované signály vkládaly vzorky hudebních nástrojů. Přesné pořadí vzorků je uvedeno v následujících tabulkách 5.9.

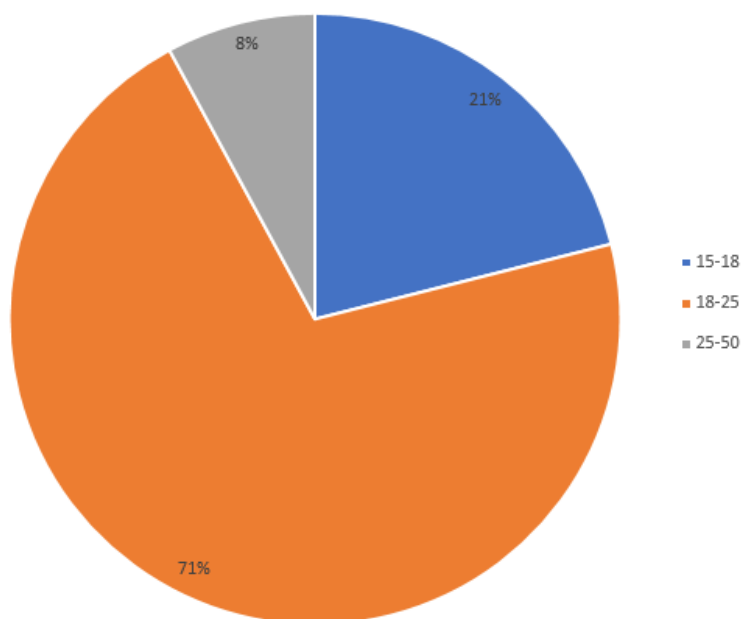
Pořadí	Druh	Tóny melodie	Harmonické složky a jejich úprava
vzorek č. 1	syntéza	D, E, Fis, E, D	2, 4, 6, 8
vzorek č. 2	klavír	G, D, C, H, A, G	původní složky
vzorek č. 3	syntéza	H, E, A, Gis, Fis	1, 2, 4, 7, 8 - 7 - vyšší intenzita
vzorek č. 4	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	původní složky
vzorek č. 5	syntéza	C, E, D, F, E, G, C	1, 2, 4, 8 + formant při dominující 27
vzorek č. 6	kytara	H, Dis, Cis, H, E, H	původní složky
vzorek č. 7	syntéza	H, E, A, Gis, Fis	1, 2, 4, 6, 8 - 6 - vyšší intenzita
vzorek č. 8	klavír	G, D, C, H, A, G	7 - vyšší intenzita
vzorek č. 9	syntéza	D, E, Fis, E, D	1, 3, 5, 7
vzorek č. 10	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	7, 9, 11, 14 - posílené
vzorek č. 11	kytara	H, Dis, Cis, H, E, H	bez 1, 2
vzorek č. 12	syntéza	D, E, Fis, E, D, Cis, D	1, 2, 3, 5, 6, 8, 10 - 1, 2, 3 - rozladěné
vzorek č. 13	trombón	Gis, H, Gis, E, Gis, Fis	původní složky
vzorek č. 14	syntéza	C, E, D, F, E, G, C	1, 2, 4, 8 + formant při dominující 32
vzorek č. 15	klavír	D, E, Fis, E, D	v prvním pásmu pouze liché HS
vzorek č. 16	syntéza	D, E, Fis, E, D, Cis, D	1, 2, 4 - 2, 4 - rozladěné
vzorek č. 17	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	1, 2, 4, 8, 16, 32 - posílené
vzorek č. 18	syntéza	H, E, A, Gis, Fis	1, 2, 3, 4, 8 - 3 - vyšší intenzita
vzorek č. 19	trombón	Gis, H, Gis, E, Gis, Fis	1, 2, 4, 8 - rozladěné
vzorek č. 20	syntéza	C	pouze 2. HS - jednou rozladěná
vzorek č. 21	klavír	D, E, Fis, E, D	v prvním pásmu pouze sudé HS
vzorek č. 22	syntéza	D, E, Fis, E, D, Cis, D	1, 2, 3, 4 - 2, 4 - rozladěné
vzorek č. 23	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	bez 1, 2, 4, 8, 16, 32
vzorek č. 24	kytara	H, Dis, Cis, H, E, H	3 - rozladěná
vzorek č. 25	syntéza	H, E, A, Gis, Fis	1, 2, 4, 5, 8 - 5 - vyšší intenzita
vzorek č. 26	trombón	Gis, H, Gis, E, Gis, Fis	3, 5, 6, 7 - rozladěné
vzorek č. 27	varhany	H, Gis, Fis, E, Fis, H	bez 1, 2
vzorek č. 28	syntéza	D, E, Fis, E, D, Cis, D	1, 2, 3, 5, 6, 8, 10 - 1, 2, 3 - roz. + šum
vzorek č. 29	klavír	G, D, C, H, A, G	bez 1, 2

Tab. 5.9: Pořadí vzorků barevně rozlišených podle skupin

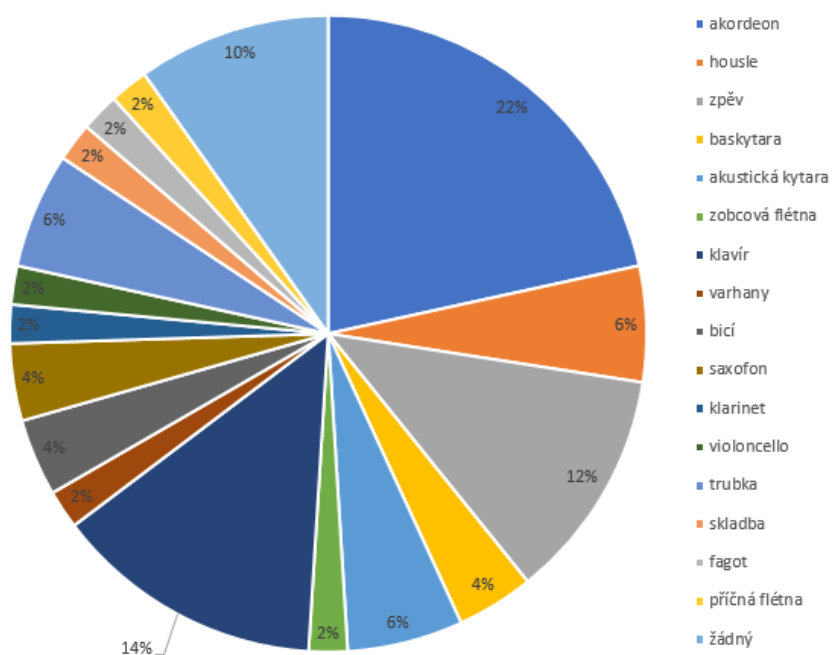
5.6 Respondenti

Pro pilotní výzkum stačilo pouze 10 respondentů. V rámci rozsáhlého výzkumu bylo však nutné využít výsledků od alespoň 100 respondentů. Kvůli vyplnění mého poslechového testu bylo osloveno přes 150 lidí. Bohužel části z nich aplikace vůbec nefungovala nebo nebyli ochotni test provést, jelikož se jednalo o poměrně časově náročnou a pečlivou záležitost. Celkový počet respondentů byl tedy přesně 100.

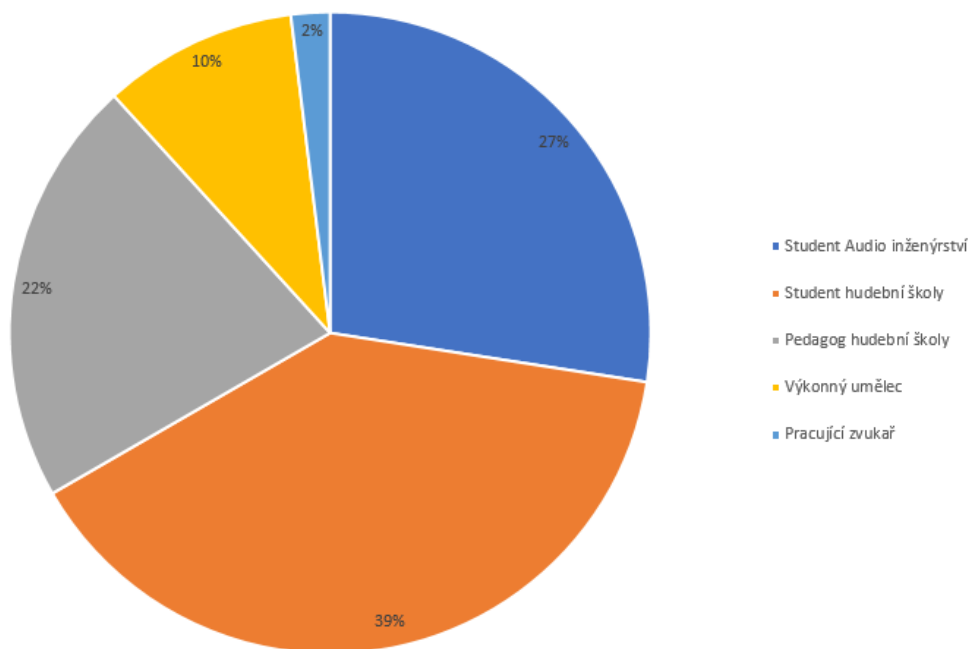
V rámci aplikace byli respondenti dotázáni na pohlaví, věk a hudební nástroj. Dále se jich aplikace zeptala na jejich povolání. Na výběr byly tyto možnosti: Student oboru Audio inženýrství, Student hudební školy (JAMU, ZUŠ, konzervatoře), Pedagog hudební školy, Výkonný umělec a Pracující zvukař. V následujících grafech jsou zobrazeny údaje o respondentech. Sám jsem studentem konzervatoře hry na akordeon. Nejvíce kontaktů mám právě lidi hrající na tento nástroj a tudíž je pochopitelné, že největší zastoupení respondentů jednoho nástroje je právě z řad akordeonistů. Co se pohlaví týče, tak zastoupení mužů a žen bylo stejné: 50 mužů a 50 žen.



Obr. 5.3: Věk respondentů



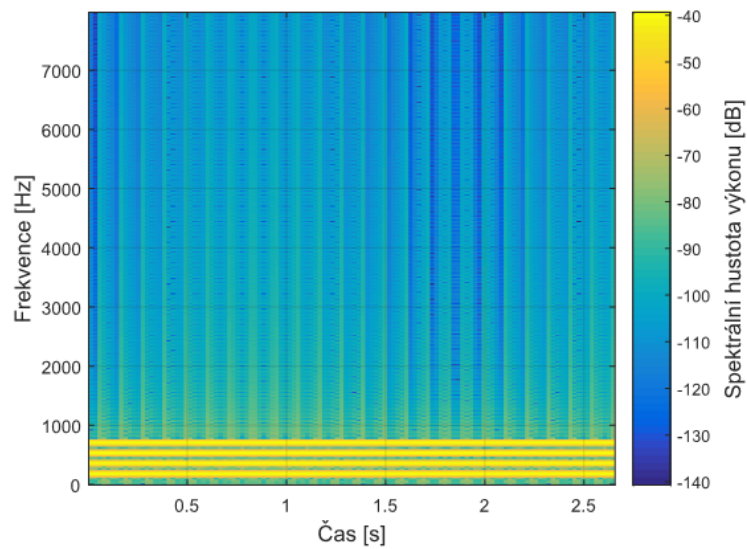
Obr. 5.4: Nástrojové obsazení respondentů



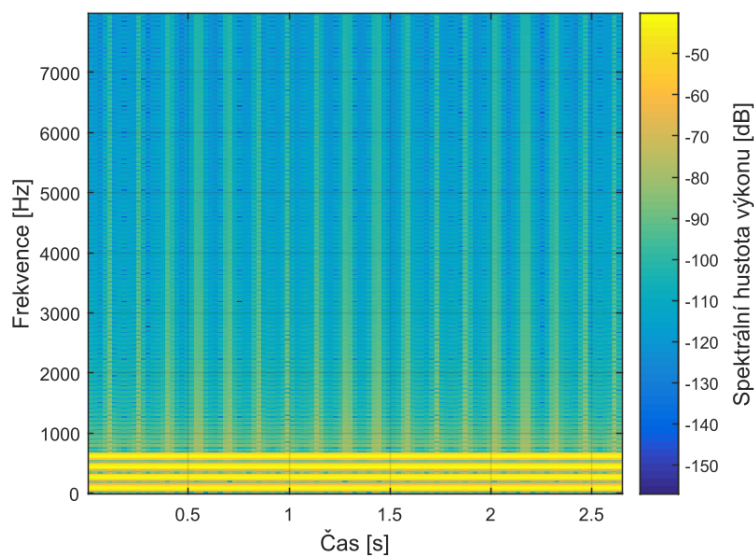
Obr. 5.5: povolání respondentů

6 Spektrogramy vzorků

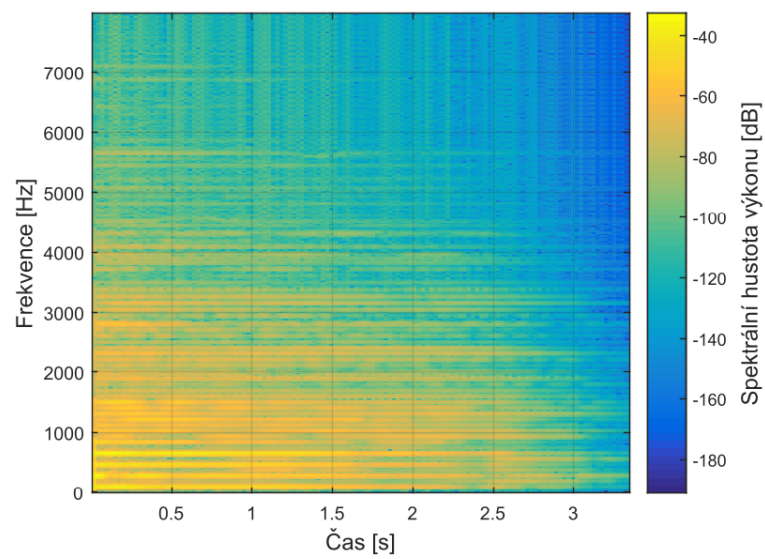
6.1 Spektrogramy sudých a lichých vzorků



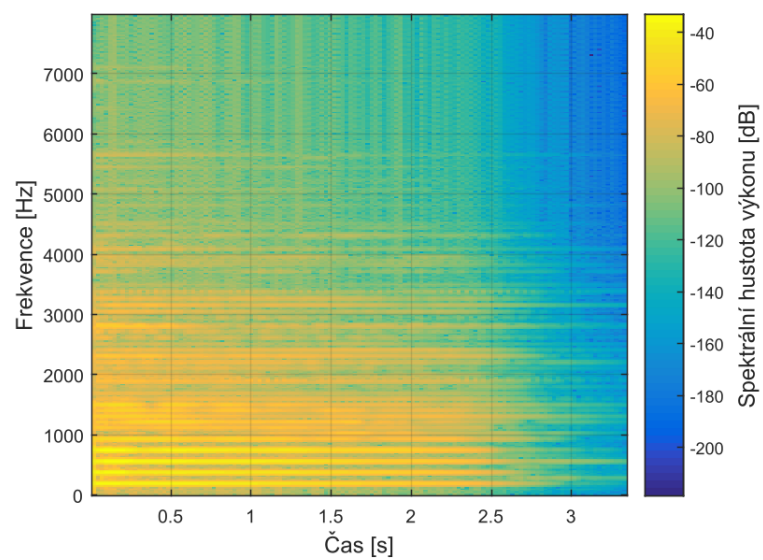
Obr. 6.1: Vzorek č. 1 - 2., 4., 6., 8. harmonická složka



Obr. 6.2: Vzorek č. 9 - 1, 3, 5, 7 harmonická složka

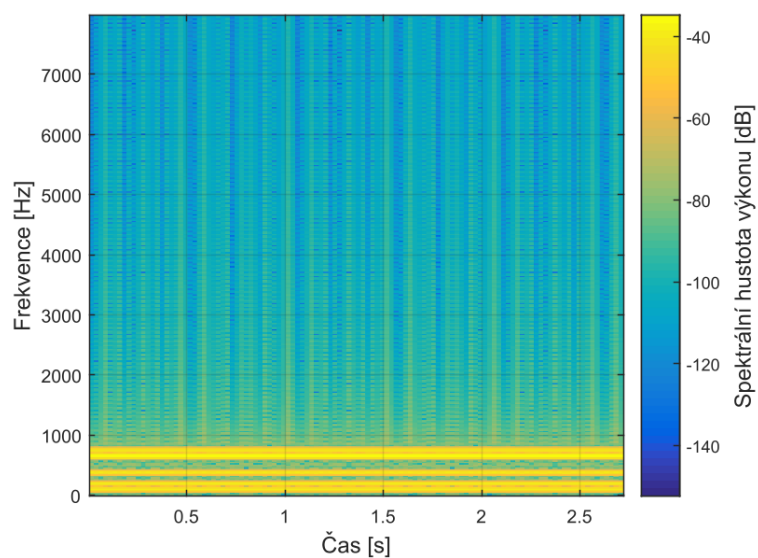


Obr. 6.3: Vzorek č. 15 - klavír s posílenými lichými složkami v prvním pásmu

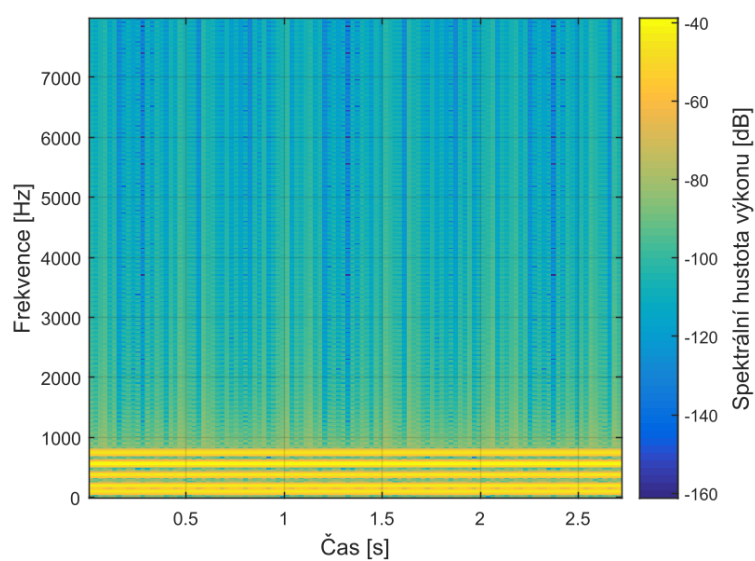


Obr. 6.4: Vzorek č. 21 - klavír s posílenými sudými složkami v prvním pásmu

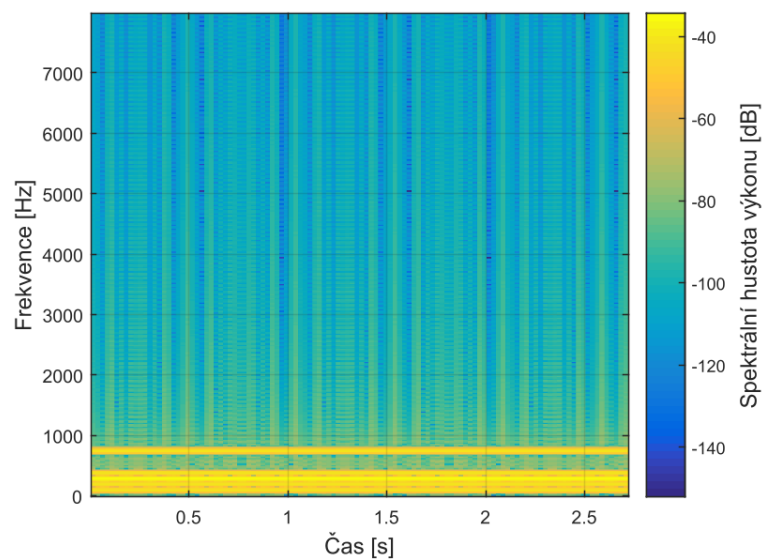
6.2 Spektrogramy vzorků vzniklých kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu



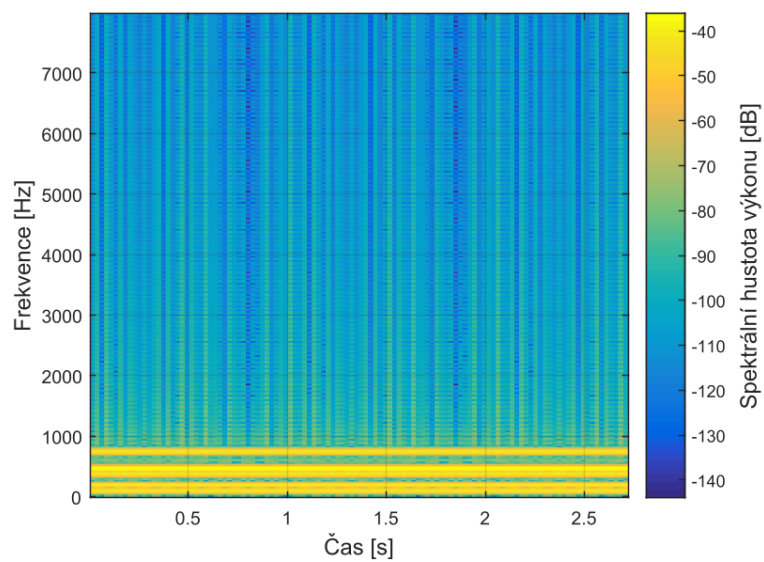
Obr. 6.5: Vzorek č. 3 - 1., 2., 4., 7., 8. harmonická složka - 7. - vyšší intenzita



Obr. 6.6: Vzorek č. 7 - 1., 2., 4., 6., 8. harmonická složka - 6. - vyšší intenzita

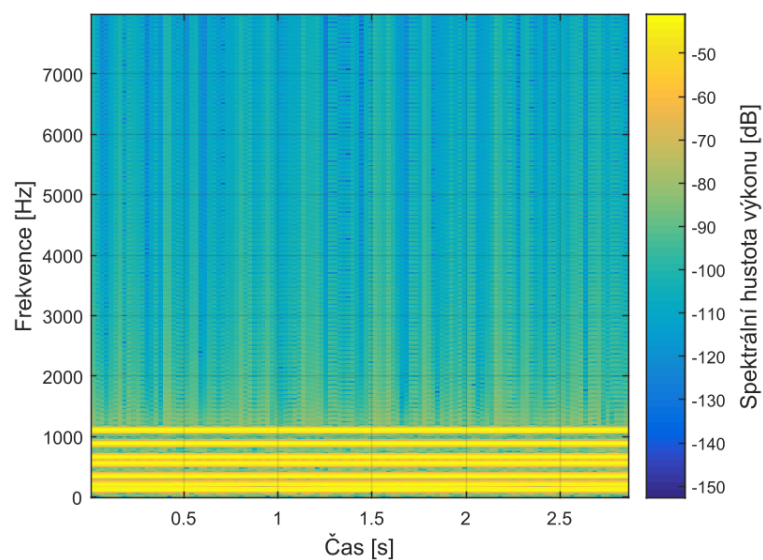


Obr. 6.7: Vzorek č. 18 - 1., 2., 3., 8. harmonická složka - 3. - vyšší intenzita

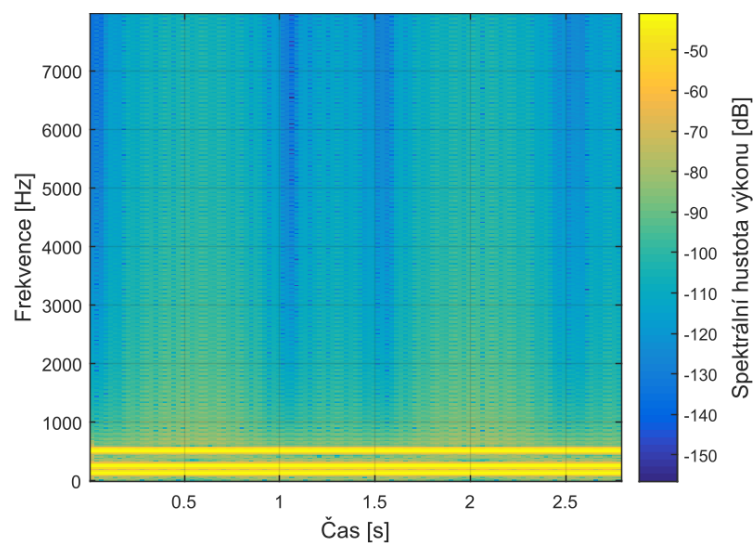


Obr. 6.8: Vzorek č. 25 - 1., 2., 4., 5., 8. harmonická složka - 7. - vyšší intenzita

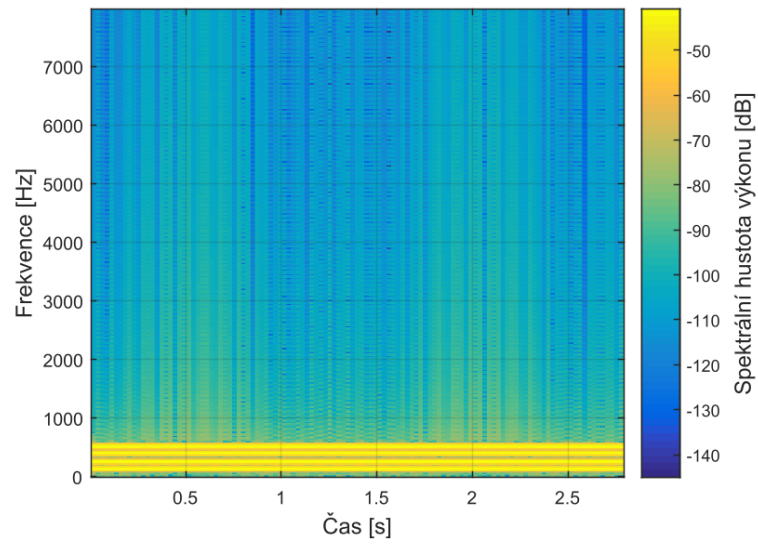
6.3 Spektrogramy s různou mírou inharmonicit a šumem



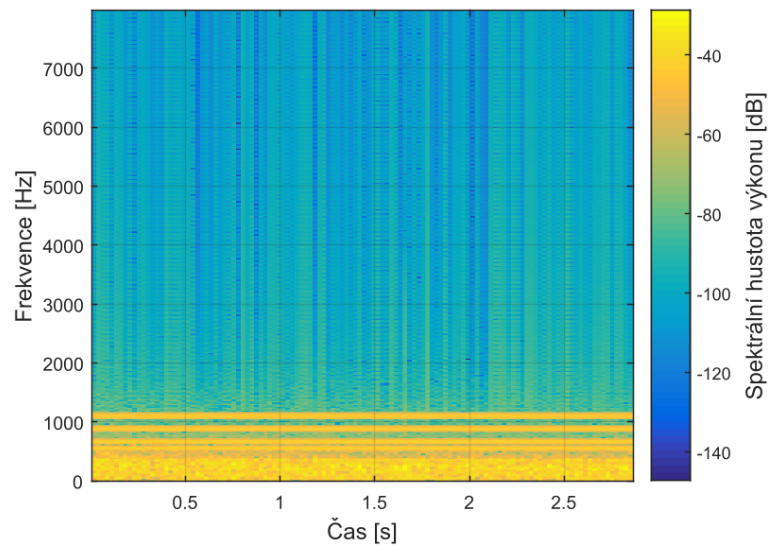
Obr. 6.9: Vzorek č. 12 - 1., 2., 3., 5., 6., 8., 10. harmonická složka - 1., 2., 3. - rozladěná



Obr. 6.10: Vzorek č. 16 - 1., 2., 4. harmonická složka - 2., 4. - rozladěná

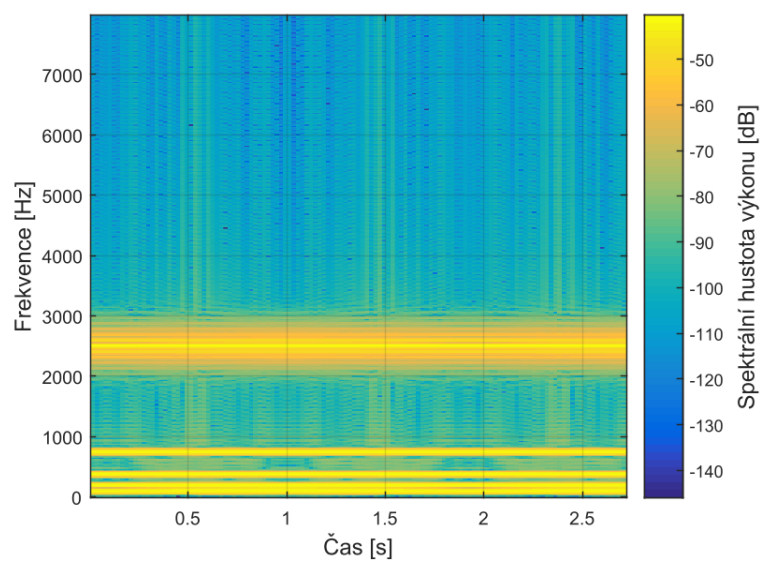


Obr. 6.11: Vzorek č. 22 - 1., 2., 3., 4. harmonická složka - 2., 4. - rozladěná

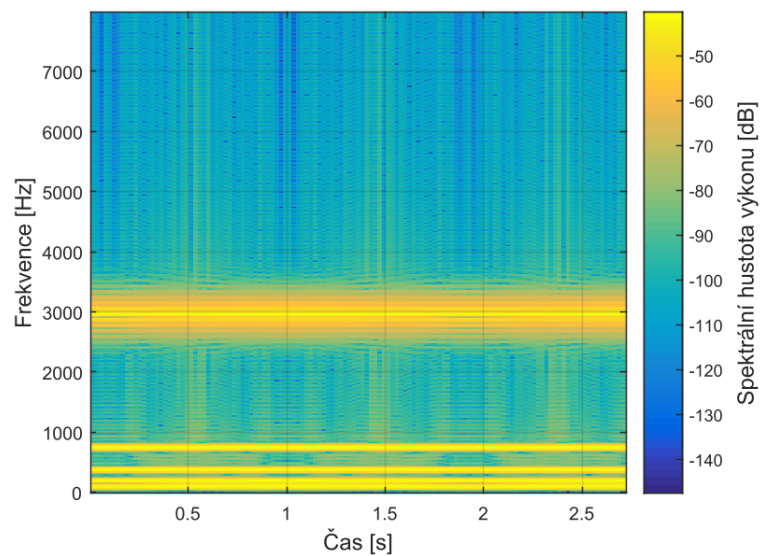


Obr. 6.12: Vzorek č. 28 - 1., 2., 3., 5., 6., 8., 10. harmonická složka - 1., 2., 3. - rozladěná + šum

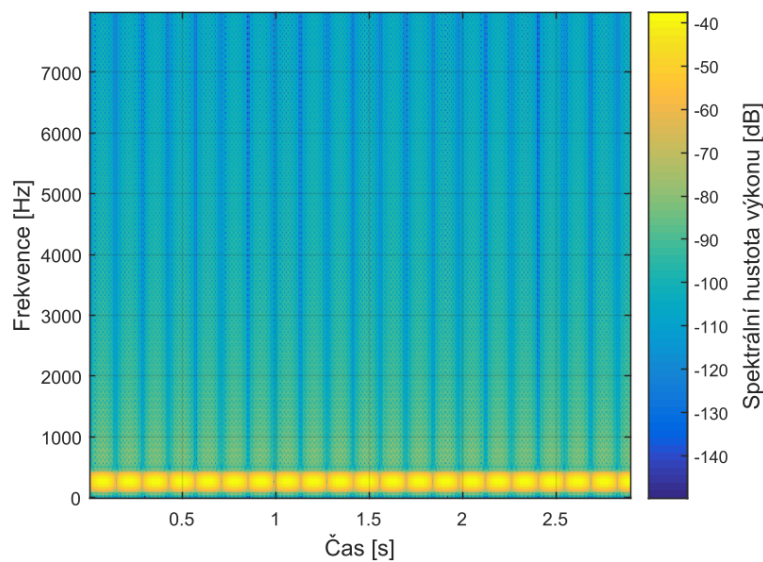
6.4 Spektrogramy vzorků s formantovými oblastmi a rázy



Obr. 6.13: Vzorek č. 5 - 1., 2., 4., 8. harmonická složka + formant při dominující 27. harmonické složce

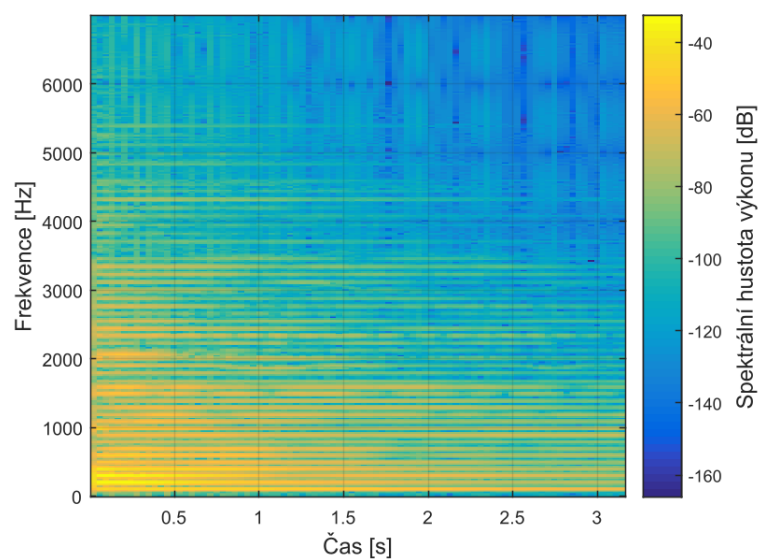


Obr. 6.14: Vzorek č. 14 - 1., 2., 4., 8. harmonická složka + formant při dominující 32. harmonické složce



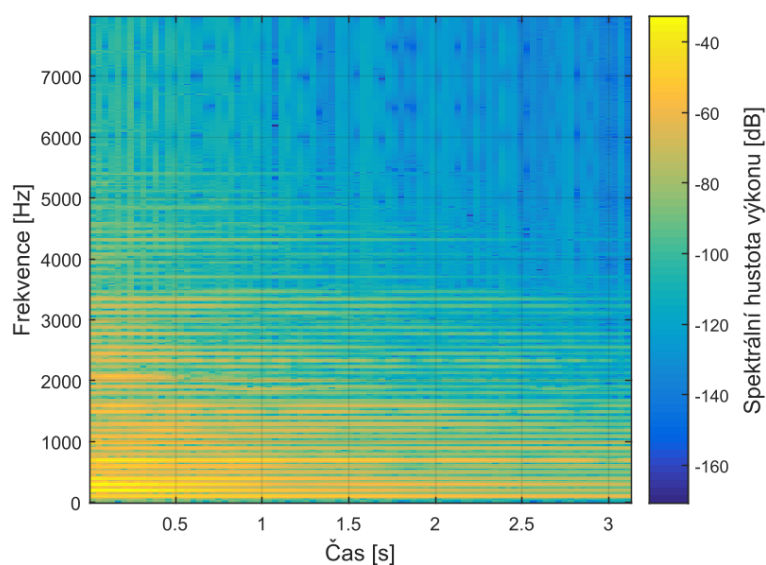
Obr. 6.15: Vzorek č. 20 - rázy

6.5 Spektrogramy vzorků klavíru

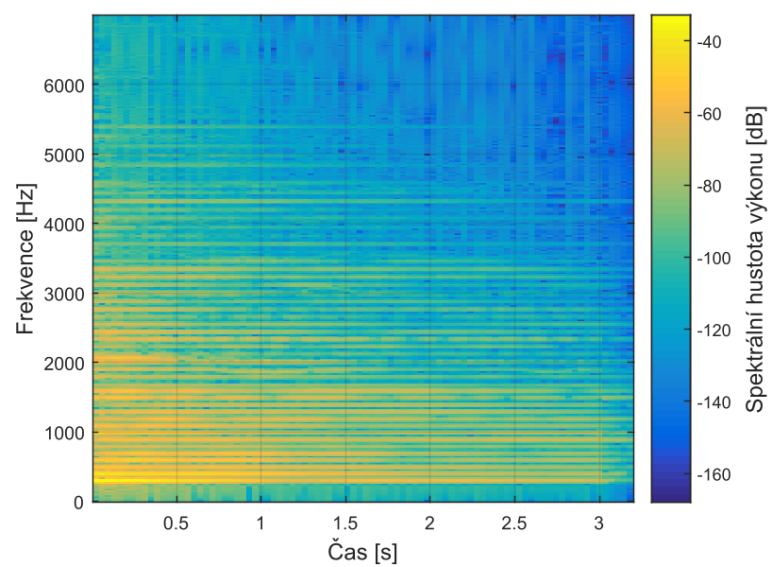


Obr. 6.16: Vzorek č. 2 - klavír beze změny

Zobrazené spektrum vzorku č. 2 vzniklo úderem kladívka do struny. Je zde vidět postupné doznívání tónu. Zvuk klavíru byl poměrně čistý, spektrum není nijak zahuštěné. Nejsilnější jsou harmonické složky v prvním pásmu tvořící základní barvu a tonalitu tónu.

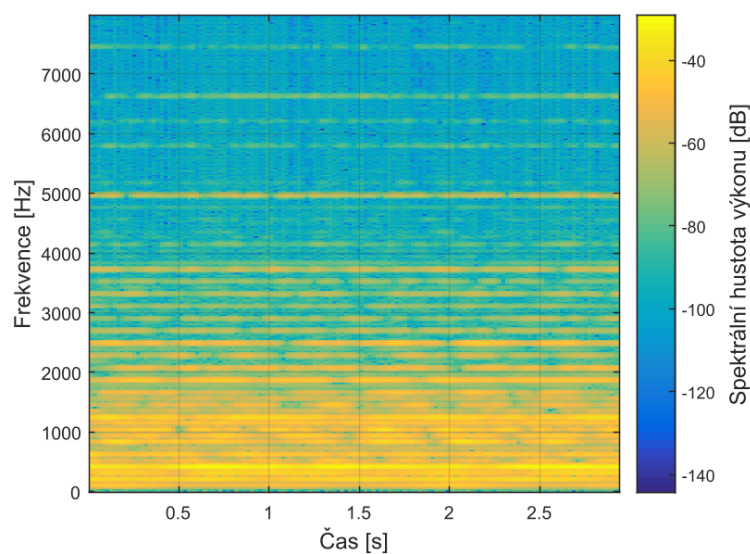


Obr. 6.17: Vzorek č. 8 - klavír s posílenou 7. harmonickou složkou



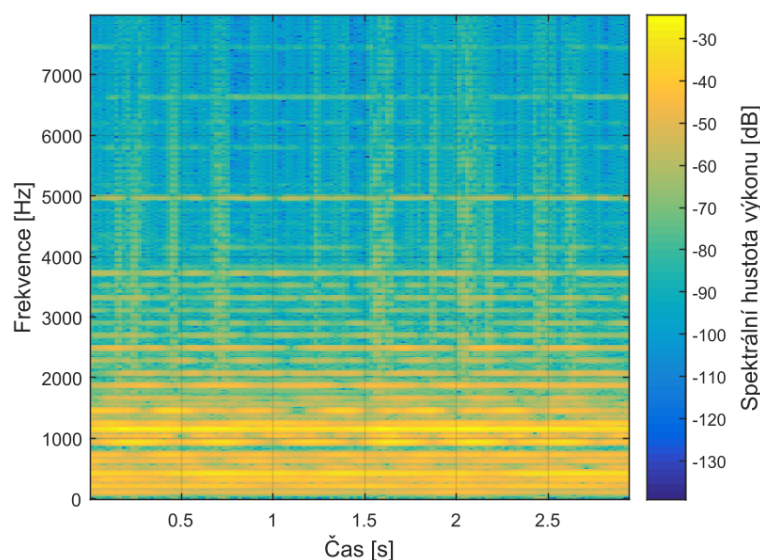
Obr. 6.18: Vzorek č. 29 - kalvír bez 1. a 2. harmonické složky

6.6 Spektrogramy vzorků varhan

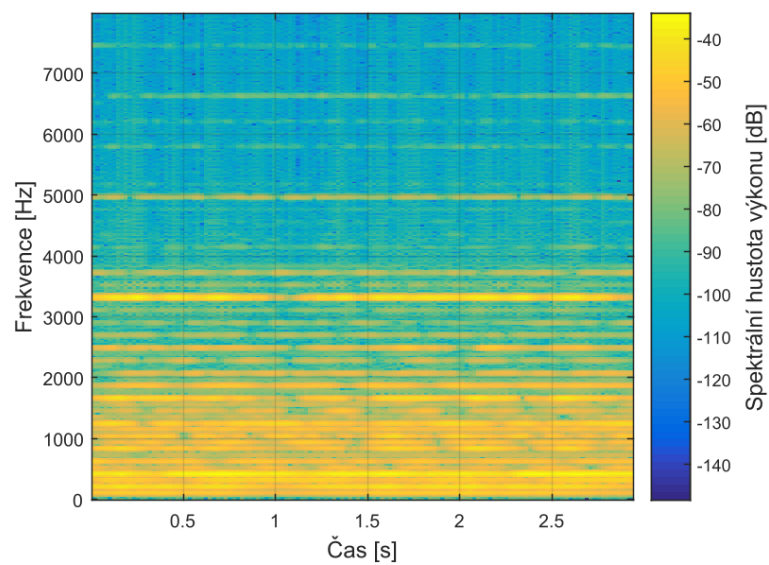


Obr. 6.19: Vzorek č. 4 - varhany beze změny

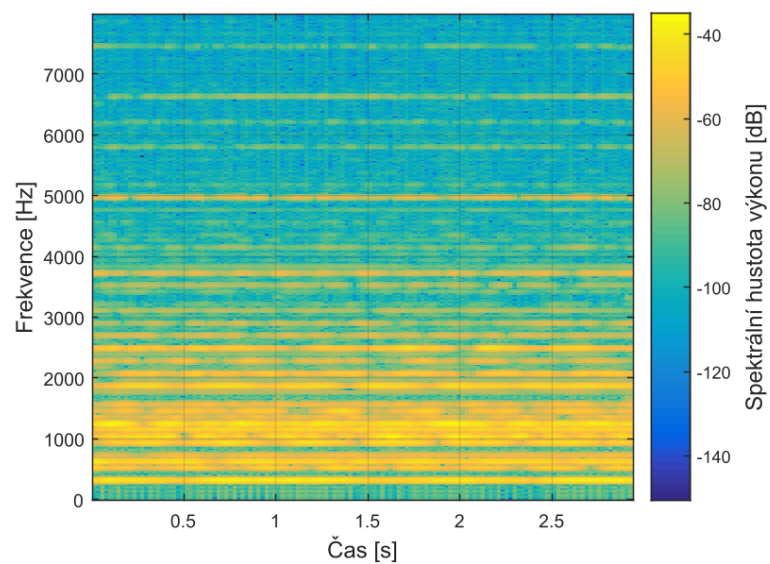
Oproti jiným nástrojům je spektrum varhan při hraní jednoho tónu specifické tím, že se nemění s časem, ale zůstává konstantní po celou dobu měření spektrogramu. Je patrné, že varhany mají velmi nahuštěné složky převážně do 32. harmonické. Velká hustota lichých i sudých složek pak způsobuje zvonivou barvu varhan.



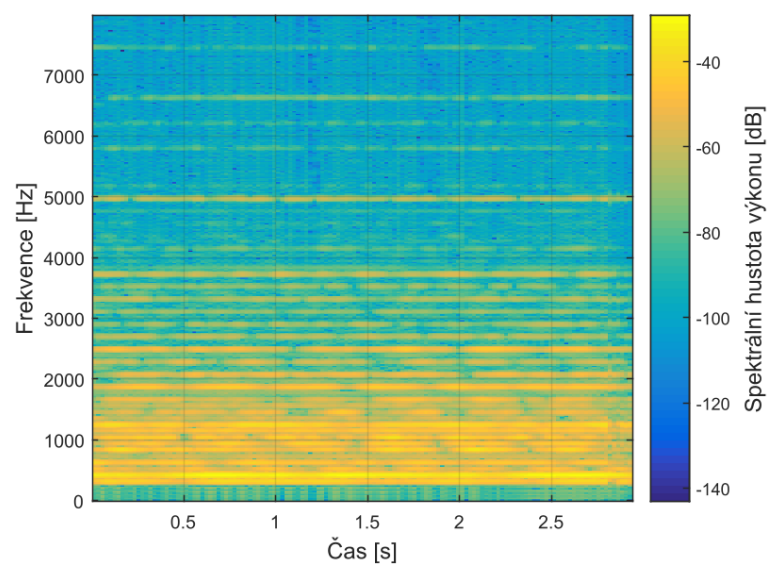
Obr. 6.20: Vzorek č. 10 - varhany s posílenou 7., 9., 11., 14. harmonickou složkou



Obr. 6.21: Vzorek č. 17 - varhany s posílenými oktávovými složkami (1, 2, 4, 8, 16, 32)

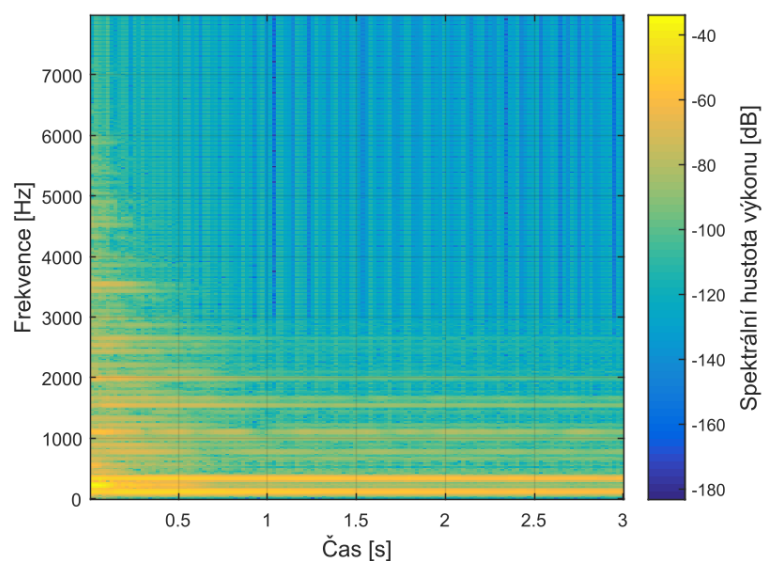


Obr. 6.22: Vzorek č. 23 - varhany bez oktávových složek (1, 2, 4, 8, 16, 32)



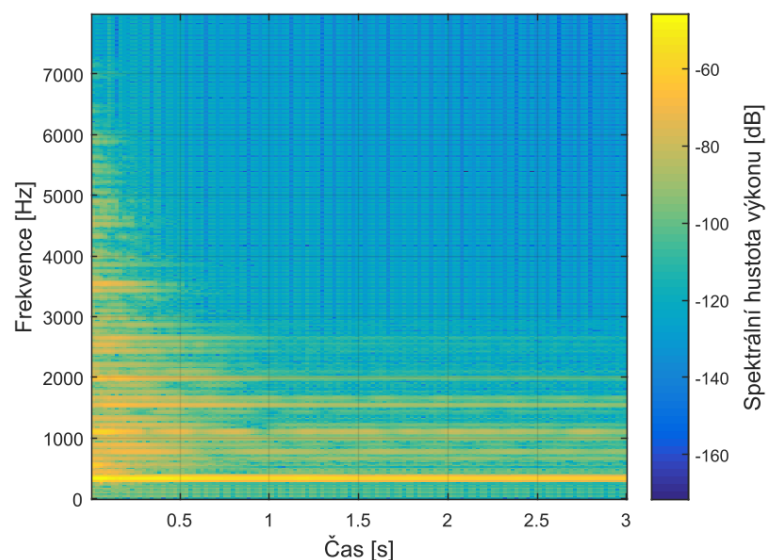
Obr. 6.23: Vzorek č. 27 - varhany bez 1. a 2. harmonické složky

6.7 Spektrogramy vzorků kytary

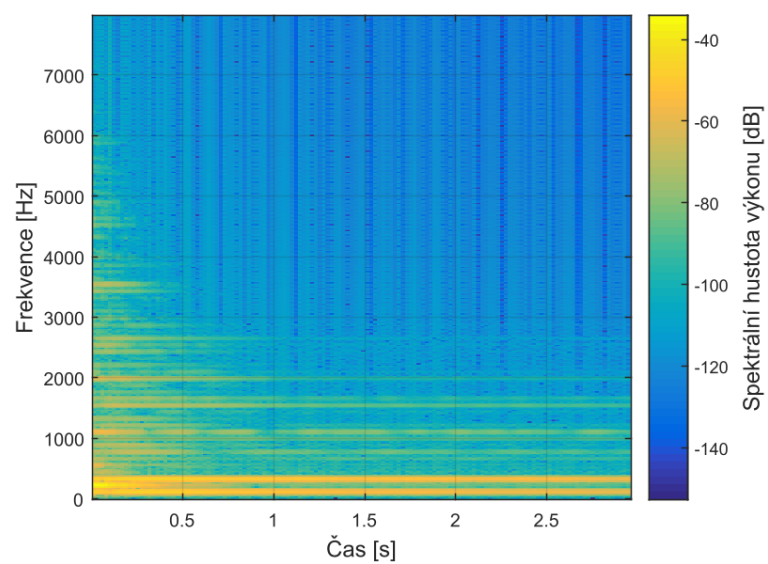


Obr. 6.24: Vzorek č. 6 - kytara beze změny

Přirozené spektrum kytary je na první pohled velmi prázdné. Při drknutí na strunu sice zazní poměrně velké množství alikvótních složek, mají však malou intenzitu a většinu z nich téměř okamžitě klesne intenzita na minimum. Při pohledu na spektrogram je zřejmé, že základními nosnými složkami pro dlouho znějící tóny jsou převážně 1., 2., a 3. harmonická složka.

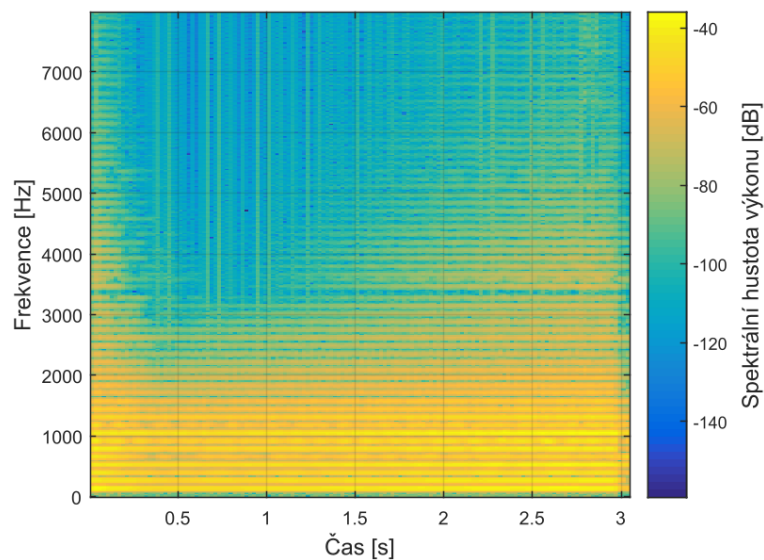


Obr. 6.25: Vzorek č. 11 - kytara bez 1. a 2. harmonické složky



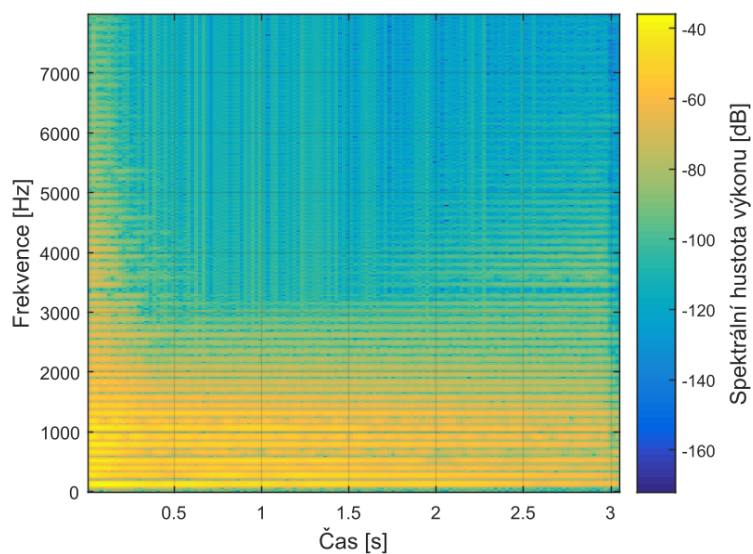
Obr. 6.26: Vzorek č. 24 - kytara s rozladěnou 3. harmonickou složkou

6.8 Spektrogramy vzorků trombónu

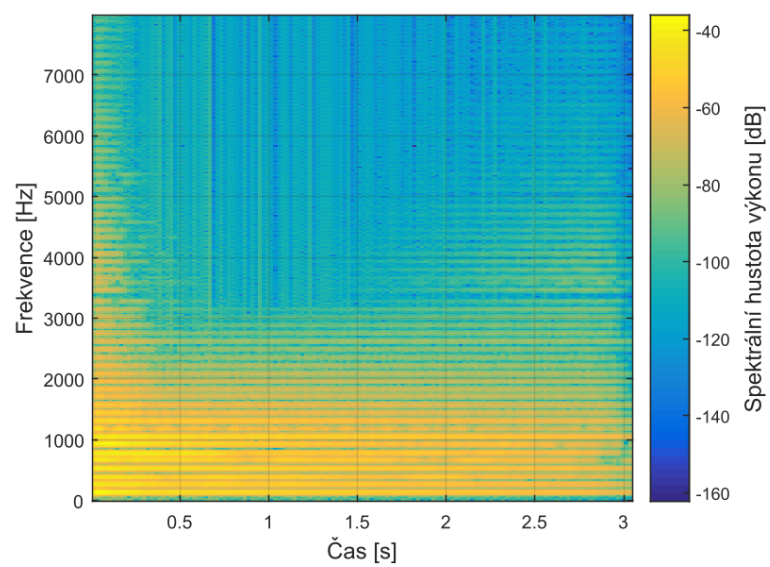


Obr. 6.27: Vzorek č. 13 - trombón beze změny

Spektrum trombónu je tvořeno pilovým signálem. Ten obsahuje všechny harmonické složky. Má tedy velmi průrazný zvuk. Barva je pak plná, sytá a jasná.



Obr. 6.28: Vzorek č. 19 - trombón s rozladěnou 1., 2., 4., 8. harmonickou složkou



Obr. 6.29: Vzorek č. 26 - trombon s rozladěnou 3., 5., 6., 7. harmonickou složkou

7 Vyhodnocení experimentu

Pro analýzu výsledků byla použita metoda škálování podle Dunna a Kinga. Tato metoda umožňuje vytvoření procentuální škály, na které můžeme vidět náklonnost respondentům k jednotlivým stupňům škály. Kvůli úspoře místa jsou termíny v tabulce „Mimořádně“, „Velmi“, „Trochu“, „Ani jeden“ nahrazeny počátečním písmenem tzn. „M“, „V“, „T“ a „0“.

U každé skupiny vzorků je tabulka, kde jsou vždy u každého zkoumaného páru vyneseny výsledky všech vzorků ze skupiny. Tyto výsledky vyjadřují v procentech, kolikrát respondenti vybrali daný stupeň a můžeme je mezi sebou vertikálně srovnávat. Vzhledem k tomu, že respondentů bylo přesně sto, procentuální hodnota přesně odpovídá počtu, kolikrát daný stupeň respondenti preferovali. Kvůli zvýšené přehlednosti vzorky nejsou pojmenované. U tabulky je vždy uvedeno jejich pořadí tak, jak jsou vertikálně uspořádány.

U každé skupiny vzorků jsou také čtyři grafy pro každou škálu. Zde jsou mezi sebou graficky porovnány výsledky stupňů škál.

Dále je zde tabulka s aritmetickými průměry. Tyto průměry pak ukazují, k jakému stupni škály se respondenti přikláněli. Pokud se výsledný aritmetický průměr jedné škály pohyboval v intervalu $\langle 3,5; 4,5 \rangle$, je možné hovořit o neutrálním hodnocení vzorku. Vjem vzorku se nepřikláněl ani k jednomu pólu. Při dosažení průměru pod hodnotu 3,5 nebo nad hodnotu 4,5 se vjem vzorku klonil k jednomu nebo k druhému extrému.

7.1 Skupina sudých a lichých vzorků

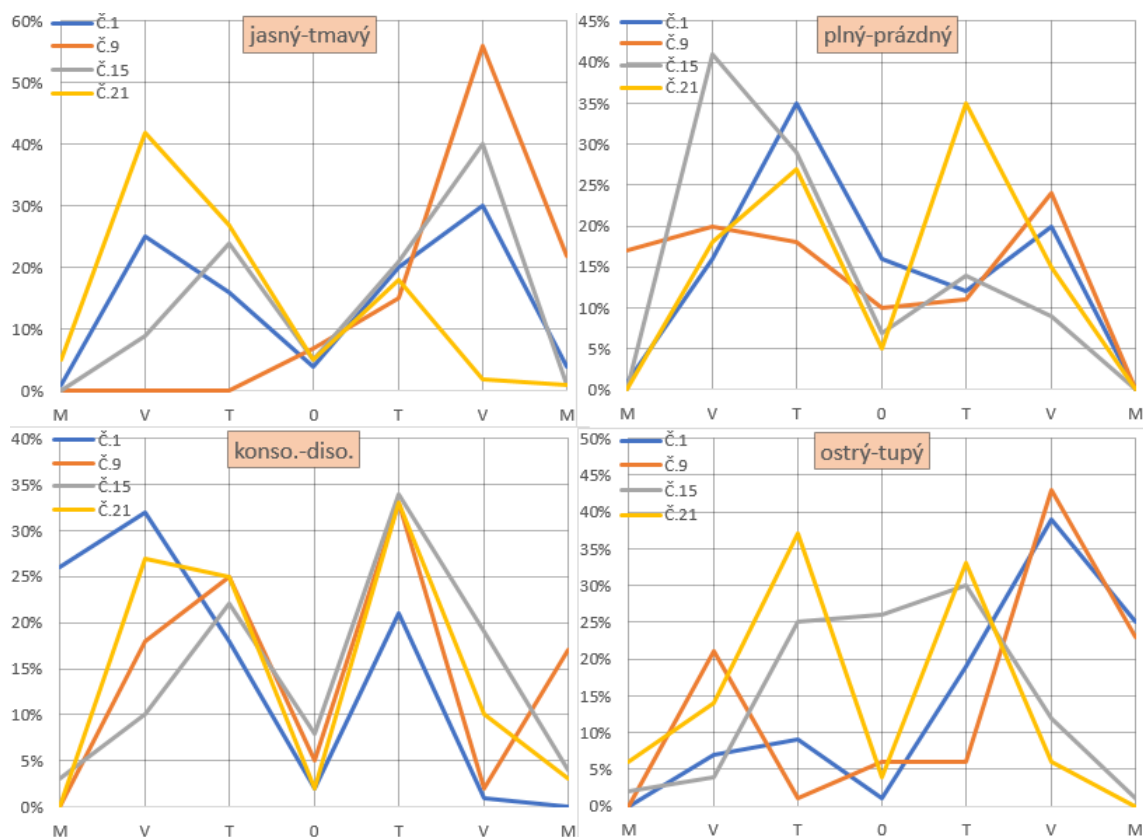
V této skupině se zkoumá vliv převahy sudých nebo lichých složek spektra na vjem barvy zvuku. Skupina vzorků je podrobně popsána v sekci 5.5.1. V následující tabulce 7.1 jsou procentuálně vyjádřeny preference respondentů jednotlivých stupňů škály dle škálování Dunna a Kinga. Vzorky jsou celkem čtyři a jsou vertikálně uspořádány podle pořadí, v jakém se v dotazníku vyskytly tzn. vzorek č. 1, vzorek č. 9, vzorek č. 15 a vzorek č. 21. Výsledky jsou vyneseny do grafu 7.1. V další tabulce 7.2 jsou pak aritmetické průměry vzorků pro jednotlivé škály.

	M(%)	V(%)	T(%)	0(%)	T(%)	V(%)	M(%)	
jasný	1	25	16	4	20	30	4	tmavý
	0	0	0	7	15	56	22	
	0	9	24	5	21	40	1	
	5	42	27	5	18	2	1	
plný	1	16	35	16	12	20	0	prázdný
	17	20	18	10	11	24	0	
	0	41	29	7	14	9	0	
	0	18	27	5	35	15	0	
konsonantní	26	32	18	2	21	1	0	disonantní
	0	18	25	5	33	2	17	
	3	10	22	8	34	19	4	
	0	27	25	2	33	10	3	
ostrý	0	7	9	1	19	39	25	tupý
	0	21	1	6	6	43	23	
	2	4	25	26	30	12	1	
	6	14	37	4	33	6	0	

Tab. 7.1: Škálování vzorků č. 1, 9, 15 a 21 (uspořádány pod sebou)

	Vzorek č. 1	Vzorek č. 9	Vzorek č. 15	Vzorek č. 21
jasný-tmavý	4.23	5.93	4.62	2.99
plný-prázdný	3.82	3.50	3.21	4.02
konsonantní-disonantní	2.63	4.27	4.33	3.83
ostrý-tupý	5.49	5.18	4.18	3.62

Tab. 7.2: Aritmetické průměry vzorků č. 1, 9, 15 a 21



Obr. 7.1: Grafy sudých a lichých vzorků

Vzorek č. 1	sudé složky v prvním pásmu - 2., 4., 6., 8. harmonická
Vzorek č. 9	liché složky v prvním pásmu - 1., 3., 5., 7. harmonická
Vzorek č. 15	původní složky klavíru s posílenými lichými složkami v prvním pásmu
Vzorek č. 21	původní složky klavíru s posílenými sudými složkami v prvním pásmu

Tab. 7.3: Složení spektra všech vzorků ve skupině sudých a lichých vzorků

Hned při prvotním pohledu na grafy je vidět poměrně velká neshoda mezi respondenty. Nemůžeme tedy říct, že by se respondenti u této skupiny vzorků přiklínili převážně k jedné straně. Nejnáchylnější vzorek na nepřesné ohodnocení je vzorek č. 1. Respondenti se poprvé setkají s dotazníkem a v podstatě zjišťují co mají dělat. V grafu u páru jasný-tmavý vykazuje vzorek č. 1 velkou nevyrovnanost. Aritmetický průměr nám vyšel 4.23 tudíž nebyl splněn předpoklad vjemu jasného tónu. Byl však vnímán jasněji než vzorek č. 9, čemuž odpovídá teorie. Vzorek č. 9 se zdá jako velmi tmavý. To dokazuje i aritmetický průměr 5.93 a navíc jej 56% respondentů označilo jako „velmi“ tmavý. Vzorek složený z lichého spektra tedy splnil předpoklad vjemu tmavosti. Nejjasněji působil vzorek č. 21. To potvrdilo předpoklad, že má být jasnější než vzorek č. 15.

Z druhého grafu páru plný-prázdný je patrné, že vzorek č. 15 se zdál jako nejplnější. Také aritmetický průměr (3.21) ukazuje náchylnost ke vnímání plnosti. Zajímavé je však to, že rovněž lichý vzorek č. 9 se sice zdá více prázdný, ale většinou počtu respondentů (17%) se zdál jako „mimořádně“ plný. Oba vzorky však splnily předpoklad vjemu plnosti. Vzorky č. 1 a 21 se podle předpokladu více rovnaly vjemu prázdného charakteru.

Co se týče konsonance a disonance, tak nejkonsonantnější byly podle očekávání vzorek č. 1 s arit. průměrem 2.63 a hned po něm následoval vzorek č. 21. Ten měl ale arit. průměr 3.83. Tudíž se nepřiklíní ani k jednomu pólu. Liché vzorky č. 9 a 15 měly navzájem velmi podobné výsledky a oba se podle očekávání přiklínily k vjemu disonance.

Na grafu ostrý-tupý můžeme pozorovat, že vzorky vymodelované pomocí aditivní syntézy (vzorek č. 1 a vzorek č. 9) se zdají oba jako velmi tupé oproti vzorkům upravených hudebních nástrojů. Podle očekávání se vzorek č. 9 zdál o trochu ostřejší. U vzorků č. 15 a 21 se výsledky pohybovaly kolem středu škály.

Výsledky respondentů u této skupiny se značně neshodují. Je zřejmé, že velmi záleží zda-li se jedná o hudební nástroj nebo o vymodelovaný signál. I tak ale můžeme obě dvojice srovnat a říct, že předpokládané barvy u lichého a sudého spektra se u vzorků potvrdily. Co se týče počtu přehrání jednotlivých vzorků, tak největšího počtu dosáhl pochopitelně vzorek č. 1 s průměrem 5.16 přehrání. To je celkově největší počet přehrání z celého průzkumu. Zajímavé je však to, že průměry počtů přehrání u vzorků s hudebními nástroji (vzorek č. 15 a 21) byly téměř totožné (3.04 a 3.03). Zároveň byly větší než u vymodelovaného vzorku č. 9 (2.58).

7.2 Skupina vzorků vzniklých kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu

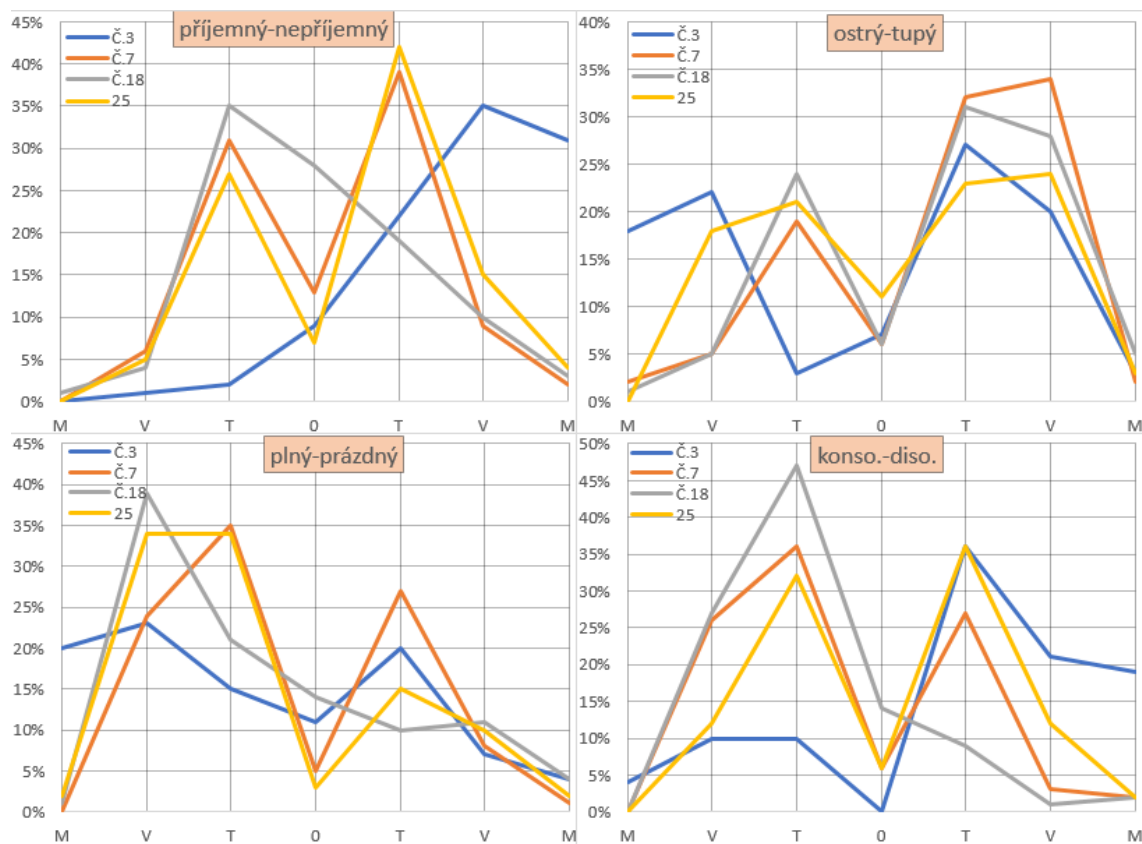
Vzorky této skupiny jsou složeny z oktávových složek a vždy je k nim přidána 7., 6., 5. nebo 3. harmonická složka. Skupina vzorků je podrobně popsána v sekci 5.5.1. V následující tabulce 7.4 jsou výsledky škálování dle Dunna a Kinga. Vzorky jsou celkem čtyři a jsou vertikálně uspořádány podle pořadí, v jakém se v dotazníku vyskytly tzn. Vzorek č. 3, Vzorek č. 7, Vzorek č. 18 a Vzorek č. 25. Výsledky jsou vyneseny do grafu 7.2. V další tabulce 7.5 jsou pak aritmetické průměry vzorků pro jednotlivé škály.

	M(%)	V(%)	T(%)	O(%)	T(%)	V(%)	M(%)	
příjemný	0	1	2	9	22	35	31	nepříjemný
	0	6	31	13	39	9	2	
	1	4	35	28	19	10	3	
	0	5	27	7	42	15	4	
ostrý	18	22	3	7	27	20	3	tupý
	2	5	19	6	32	34	2	
	1	5	24	6	31	28	5	
	0	18	21	11	23	24	3	
plný	20	23	15	11	20	7	4	prázdný
	0	24	35	5	27	8	1	
	1	39	21	14	10	11	4	
	2	34	34	3	15	10	2	
konsonantní	4	10	10	0	36	21	19	disonantní
	0	26	36	6	27	3	2	
	0	27	47	14	9	1	2	
	0	12	32	6	36	12	2	

Tab. 7.4: Škálování vzorků č. 3, 7, 18 a 25 (uspořádány pod sebou)

	Vzorek č. 3	Vzorek č. 7	Vzorek č. 18	Vzorek č. 25
příjemný-nepříjemný	5.81	4.2	4.02	4.47
ostrý-tupý	3.75	4.71	4.65	4.23
plný-prázdný	3.25	3.63	3.42	3.33
konsonantní-disonantní	4.93	3.51	3.16	4.1

Tab. 7.5: Aritmetické průměry vzorků č. 3, 7, 18 a 25



Obr. 7.2: Grafy vzorků vzniklých kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu

Vzorek č. 3	1., 2., 4., 7., 8. harmonická složka - 7. - vyšší intenzita
Vzorek č. 7	1., 2., 4., 6., 8. harmonická složka - 6. - vyšší intenzita
Vzorek č. 18	1., 2., 3., 8. harmonická složka - 3. - vyšší intenzita
Vzorek č. 25	1., 2., 4., 5., 8. harmonická složka - 7. - vyšší intenzita

Tab. 7.6: Složení spektra všech vzorků ve skupině vzniklých kombinací vyšších harmonických v prvním pásmu

Z výsledků je patrné, že vzorky této skupiny byly respondenty vnímány spíše negativně. Aritmetický průměr páru příjemný-nepříjemný u tří ze čtyř vzorků sice spadá do neutrálního intervalu, ale i tak můžeme hovořit o vjemu nepříjemnosti při poslechu těchto vzorků, jelikož se průměr držel nad hodnotou 4. U vzorku č. 3 byl však průměr 5.81 což značí, že vzorek byl velmi nepříjemný. U tohoto vzorku bylo také největší procento respondentů (31%), kteří u páru příjemný-nepříjemný zvolili možnost „mimořádně“ nepříjemný. Při pohledu na graf je patrné, že se u tohoto páru u vzorků č. 7 a č. 25 respondenti neshodovali. Nicméně aritmetický průměr obou vzorků (4.2 a 4.47) se více přiklání na stranu vjemu nepříjemnosti. Také se nám potvrdil předpoklad, že vzorek č. 25 se bude zdát jako více nepříjemný než vzorek č. 7. Vzorek č. 18 se podle očekávání zdál z této skupiny vzorků jako nejvíce příjemný.

Dalo by se předpokládat, že disonantní vzorky se zároveň respondentům budou zdát jako nepříjemné. Při pohledu na graf je však patrné, že u vzorků č. 7 a 25 někteří respondenti označovali vzorek jako „trochu“ disonantní a zároveň jako „trochu“ příjemný. Vzorek č. 18 je podle očekávání nejvíce konsonantním vzorkem a vzorek č. 3 nejvíce disonantním vzorkem.

Pár příjemný-nepříjemný můžeme dát do souvislosti s párem ostrý-tupý, kdy se předpokládá, že ostré vzorky se budou zdát zároveň jako více nepříjemné. Vzorek č. 3 splnil předpoklad napůl. Má sice nejvíce označení (18%) jako „mimořádně“ ostrý, ale jeho aritmetický průměr páru ostrý-tupý je pouze 3.75. U tohoto vzorku byla očekávána mimořádná ostrost tzn. průměr kolem hodnot 1 až 2. Zbylé vzorky ze skupiny přesně splnily předpoklad toho, že příjemnější vzorek byl zároveň tupější.

U páru plný-prázdný se u všech vzorků aritmetické průměry značně shodovaly. Podle teoretického předpokladu by se měl zdát nejvíce prázdný vzorek č. 7, který je složen pouze z tonálních složek a není oproti ostatním vzorkům obohacen lichostí. Neliší se nijak značně, ale opravdu se zdál jako nejprázdnější. Všechny ostatní vzorky obsahovaly lichou složku a proto se i zdály plnější. Nejvíce tomu tak bylo u nejnepříjemnějšího vzorku č. 3, kde 20% respondentů zvolilo možnost „mimořádně“ plný.

Při celkovém pohledu na všechny grafy je patrná podobnost mezi vzorky č. 7 a 25. Důvodem je velmi podobné složení spektra. Nicméně podle předpokladu se vzorek č. 25 zdál více nepříjemný, disonantní, ostrý a plný, než vzorek č. 7. To je způsobeno tím, že vzorek č. 25 obsahuje 5. harmonickou, která dodá náznak lichosti a tedy drsnost a barvu. Oproti tomu vzorek č. 7 obsahuje místo 5. harmonické 6. harmonickou, která pouze posílí tonalitu. Naproti sobě stojí vzorek č. 18 s 3. harmonickou a vzorek č. 3 s 7. harmonickou. Největší problém dělalo respondentům ohodnotit vzorek č. 3, kde byl průměr kliknutí na tlačítko přehrát vzorek 3.84. Nejrychleji byli respondenti hotovi se vzorkem č. 25, kde byl průměr 2.71. Zbylé vzorky měly průměr: vzorek č. 7 - 2.96 a vzorek č. 18 - 2.78.

7.3 Skupina vzorků s různou mírou inharmonicit a šumem

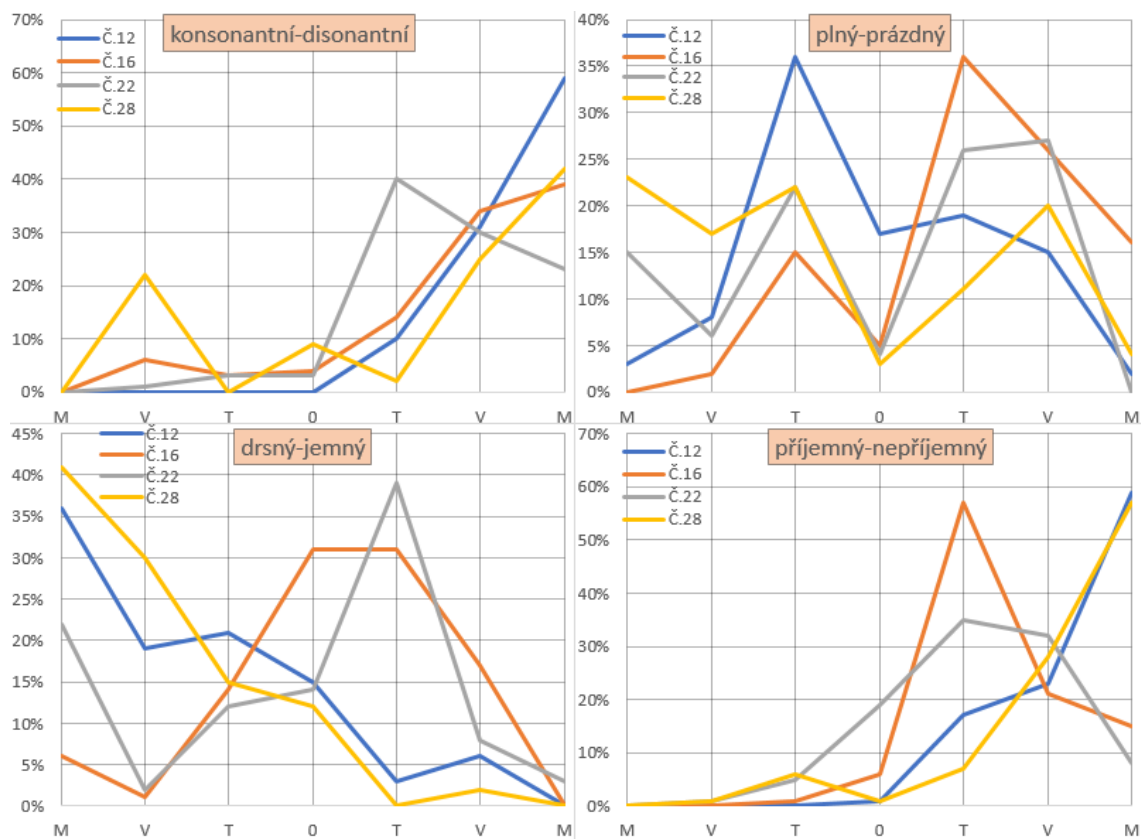
V této skupině se zkoumá vliv inharmonicit a šumu na vjem barvy. Skupina vzorků je podrobně popsána v sekci 5.5.1. V následující tabulce 7.7 jsou výsledky škálování dle Dunna a Kinga a následně jsou vyneseny do grafu 7.3. Vzorky jsou celkem čtyři a jsou vertikálně uspořádány podle pořadí, v jakém se v dotazníku vyskytly tzn. vzorek č. 12, vzorek č. 16, vzorek č. 22 a vzorek č. 28. Výsledky jsou vyneseny do grafu 7.3. V další tabulce 7.8 jsou pak aritmetické průměry vzorků pro jednotlivé škály.

	M(%)	V(%)	T(%)	O(%)	T(%)	V(%)	M(%)	
konsonantní	0	0	0	0	10	31	59	disonantní
	0	6	3	4	14	34	39	
	0	1	3	3	40	30	23	
	0	22	0	9	2	25	42	
plný	3	8	36	17	19	15	2	prázdný
	0	2	15	5	36	26	16	
	15	6	22	4	26	27	0	
	23	17	22	3	11	20	4	
drsný	36	19	21	15	3	6	0	jemný
	6	1	14	31	31	17	0	
	22	2	12	14	39	8	3	
	41	30	15	12	0	2	0	
příjemný	0	0	0	1	17	23	59	nepříjemný
	0	0	1	6	57	21	15	
	0	1	5	19	35	32	8	
	0	1	6	1	7	28	57	

Tab. 7.7: Škálování vzorků č. 12, 16, 22 a 28 (uspořádány pod sebou)

	Vzorek č. 12	Vzorek č. 16	Vzorek č. 22	Vzorek č. 28
konsonantní-disonantní	6.49	5.84	5.64	5.34
plný-prázdný	3.94	5.17	4.01	3.38
drsný-jemný	2.48	4.31	3.82	2.06
příjemný-nepříjemný	6.40	5.43	5.16	6.26

Tab. 7.8: Aritmetické průměry vzorků č. 12, 16, 22 a 28



Obr. 7.3: Grafy vzorků s různou mírou inharmonicit a šumem

Vzorek č. 12	1., 2., 3., 5., 6., 8., 10. harmonická složka - 1., 2., 3. - rozladěná
Vzorek č. 16	1., 2., 4. harmonická složka - 2., 4. - rozladěná
Vzorek č. 22	1., 2., 3., 4. harmonická složka - 2., 4. - rozladěná
Vzorek č. 28	1., 2., 3., 5., 6., 8., 10. harmonická složka - 1., 2., 3. - rozladěná + šum

Tab. 7.9: Složení spektra všech vzorků ve skupině s různou mírou inharmonicit a šumem

Z prvotního pohledu na grafy je hned vidět, že všechny vzorky se respondentům zdály nepříjemné a disonantní. Vzorky č. 12 a 28 měly oba rozladěnou 1., 2. a 3. harmonickou. Vzorek č. 28 navíc obsahoval šum v oblasti těchto harmonických. Skutečně se potvrdilo, že vlivem šumu byl vzorek č. 28 vnímán jako méně disonantní (ar. pr. 5.34) než vzorek č. 12 (ar. pr. 6.49). Průměr vzorku č. 12 je zároveň průměrem, který se z celého dotazníku nejsilněji přiklání ke konkrétnímu pólu. Je tedy patrný silný vliv rozladění fundamentálních složek. Přidáním šumu do vzorku č. 28 se zároveň zvýšil vjem plnosti oproti vzorku č. 12. Vzorek č. 28 byl poměrně často (23%) hodnocen jako „mimořádně“ plný. Na škálách drsný-jemný a příjemný-nepříjemný vykazovaly oba vzorky velmi podobné hodnoty. Oba se zdály jako mimořádně drsné a extrémně nepříjemné. Byly vnímány jako nejnepříjemnější vzorky z celého průzkumu (téměř 60% respondentů je označilo jako „mimořádně“ nepříjemné).

Při celkovém srovnání těchto dvou vzorků je na místě hovořit o velké shodě. Přidáním šumu do vzorku č. 28 a tím zamaskování inharmonicit sice způsobilo vjem větší konsonance, celkově však ale vzorek získal na drsnosti a oba nakonec stejně působily velmi nepříjemným dojmem.

Vzorky č. 16 a 22 měly oba rozladěnou 2. a 4. harmonickou. Cílem bylo zjistit, zda-li pomůže přidaná 3. harmonická (kvinta) celkově lepšímu a konsonantnějšímu vnímání vzorku. U páru konsonantní-disonantní je skutečně patrné, že přidaná 3. harmonická, ačkoliv je to kvinta, skutečně posílila tonální cítění vzorku č. 22. Oba vzorky však podle ar. pr. (5.84 a 5.64) stejně působily disonantním dojmem. Zároveň se oba vzorky opět zdály jako nepříjemné. Co se týče páru plný-prázdný, tak zde byl podle očekávání plnější vzorek č. 22 s přidanou 3. harmonickou. Přidaná 3. harmonická sice zvýšila vjem konsonance, ale zároveň vzorek č. 22 obohatila lichostí, takže se zdál více drsný než vzorek č. 16.

Celkový průměr počtu přehrání vzorků byl podobný. Tato skupina byla co do počtu přehrání jednotlivých vzorků nejméně přehrávanou skupinou z celého průzkumu. Průměr celé skupiny byl 2.39. Nejméně si respondenti přehrávali vzorek č. 12 s průměrem 2.18. Průměry přehrání dalších vzorků byly: vzorek č 16 - 2.51, vzorek č. 22 - 2.40 a vzorek č. 28 - 2.47.

7.4 Skupina vzorků s formantovými oblastmi a rázy

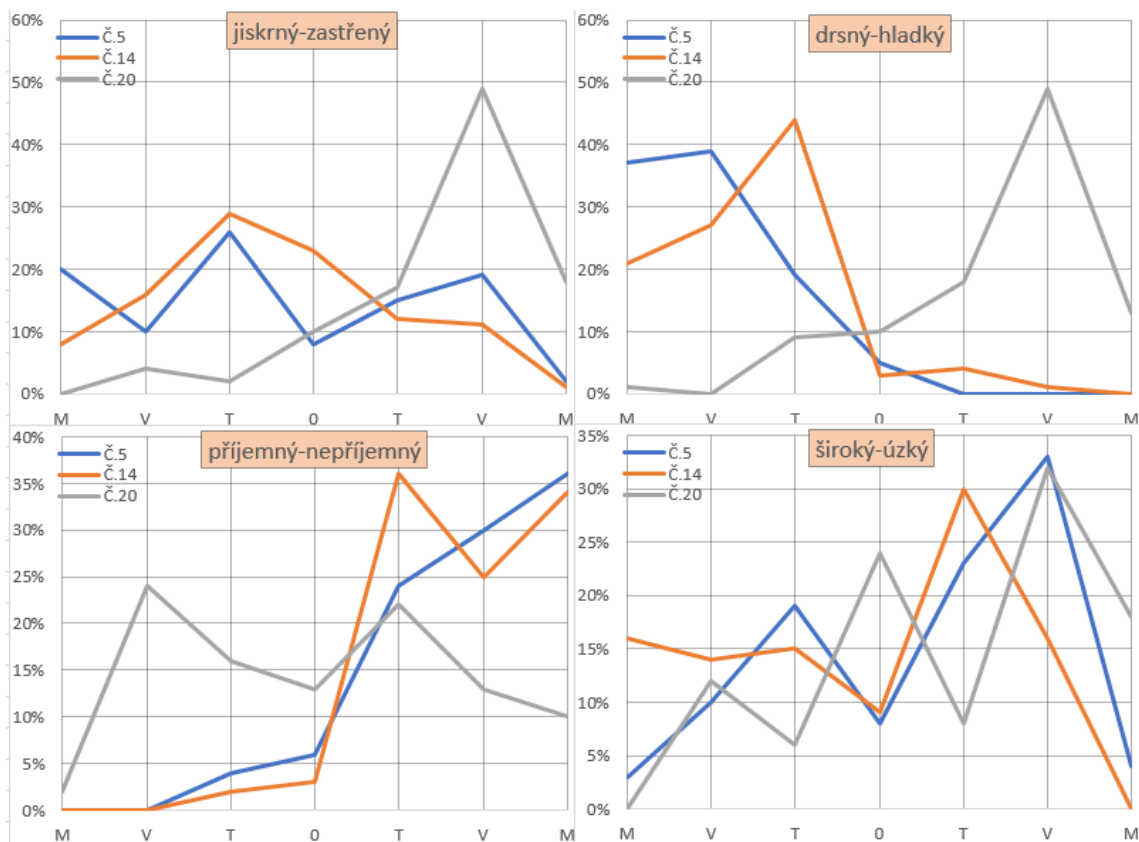
V této skupině se zkoumá vliv rázů a vliv umístění formantů na vjem barvy zvuku. Skupina vzorků je podrobně popsána v sekci 5.5.1. V následující tabulce 7.10 jsou procentuálně vyjádřeny preference respondentů jednotlivých stupňů škály dle škálování Dunna a Kinga. Vzorky jsou celkem tři a jsou vertikálně uspořádány podle pořadí, v jakém se v dotazníku vyskytly tzn. vzorek č. 5, vzorek č. 14 a vzorek č. 20. Výsledky jsou vyneseny do grafu 7.4. V další tabulce 7.11 jsou pak aritmetické průměry vzorků pro jednotlivé škály.

	M(%)	V(%)	T(%)	0(%)	T(%)	V(%)	M(%)	
jiskrný	20	10	26	8	15	19	2	zastřený
	8	16	29	23	12	11	1	
	0	4	2	10	17	49	18	
drsný	37	39	19	5	0	0	0	hladký
	21	27	44	3	4	1	0	
	1	0	9	10	18	49	13	
příjemný	0	0	4	6	24	30	36	nepříjemný
	0	0	2	3	36	25	34	
	2	24	16	13	22	13	10	
široký	3	10	19	8	23	33	4	úzký
	16	14	15	9	30	16	0	
	0	12	6	24	8	32	18	

Tab. 7.10: Škálování vzorků č. 5, 14 a 20 (uspořádány pod sebou)

	Vzorek č. 5	Vzorek č. 14	Vzorek č. 20
jiskrný-zastřený	3.53	3.52	5.59
drsný-hladký	1.92	2.45	5.43
příjemný-nepříjemný	5.88	5.86	4.08
široký-úzký	4.53	3.71	4.96

Tab. 7.11: Aritmetické průměry vzorků č. 5, 14 a 20



Obr. 7.4: Grafy vzorků s formantovými oblastmi a rázy

Vzorek č. 5	1., 2., 4., 8. harmonická složka + formant při dominující 27. harmonické složce
Vzorek č. 14	1., 2., 4., 8. harmonická složka + formant při dominující 32. harmonické složce
Vzorek č. 20	rázy

Tab. 7.12: Složení spektra všech vzorků ve skupině s formantovými oblastmi a rázy

V této skupině se nacházel vzorek č. 20, který byl odlišný oproti všem ostatním. Nebyl prezentován melodií, nýbrž pouze jedním tónem. Cílem bylo zjistit, jaké bude vnímání rázů. Je pochopitelné, že se bude velmi odlišovat od zbylých dvou vzorků, což také potvrzuje pohled na graf. Tento vzorek obsahující velmi znatelné rázy se zdál jako zastřený. Zajímavé je, že v kontextu celého dotazníku se zdál jako hladký a příjemný. Na škále široký-úzký vzorek ukazuje náchylnost spíše k užšímu vnímání.

Na vzorcích č. 5 a 14 se porovnával vliv umístění intenzitního maxima formantů na vjem barvy zvuku. Na škále jiskrný-zastřený oba vzorky vykazují velkou podobnost (ar. průměry 3.53 a 3.52). Můžeme tedy hovořit, že nebyly vnímány ani jako jiskrný ani jako zastřený. Je pravděpodobné, že v tomto případě velká část respondentů nevěděla, co si má pod pojmy jiskrný-zastřený představit, a proto aritmetický průměr vychází přesně na střed. Oba vzorky se zdály jako velmi drsné. Vzorek č. 5 s formantem na dominující 27. harmonické vykazuje ještě více drsnější charakter než vzorek č. 14 s dominující 32. harmonickou složkou. To potvrdilo předpoklad, protože 32. harmonická je celočíselným násobkem fundamentu, 27. nikoliv. Předpoklad páru příjemný-nepříjemný se kupodivu nepotvrdil. Čekalo se, že vzorek č. 5 se bude zdát jako více nepříjemný. Více nepříjemný se sice zdál, ale aritmetické průměry 5.88 a 5.86 nevykazují očekávaný velký rozdíl nepříjemnosti. Nicméně oba vzorky byly vnímány jako velmi nepříjemné. Téměř 40% respondentů označilo oba vzorky jako „mimořádně“ nepříjemné. U páru široký-úzký se dá předpokládat, že vzorek č. 14 se bude zdát jako širší, protože měl celkově širší spektrum. Tento předpoklad se nám potvrdil, a vzorek č. 14 byl vnímán jako širší než vzorek č. 5. Na této škále však docházelo k velkým rozporům. Pár široký-úzký byl párem, kde se často výsledky respondentů lišily.

Vzorek č. 14 dosáhl průměru přehrání 2.27, což je méně, než vzorek č. 5 s průměrem 2.96. Vzorek č. 20 má průměr přehrání 2.93.

7.5 Skupina vzorků klavíru

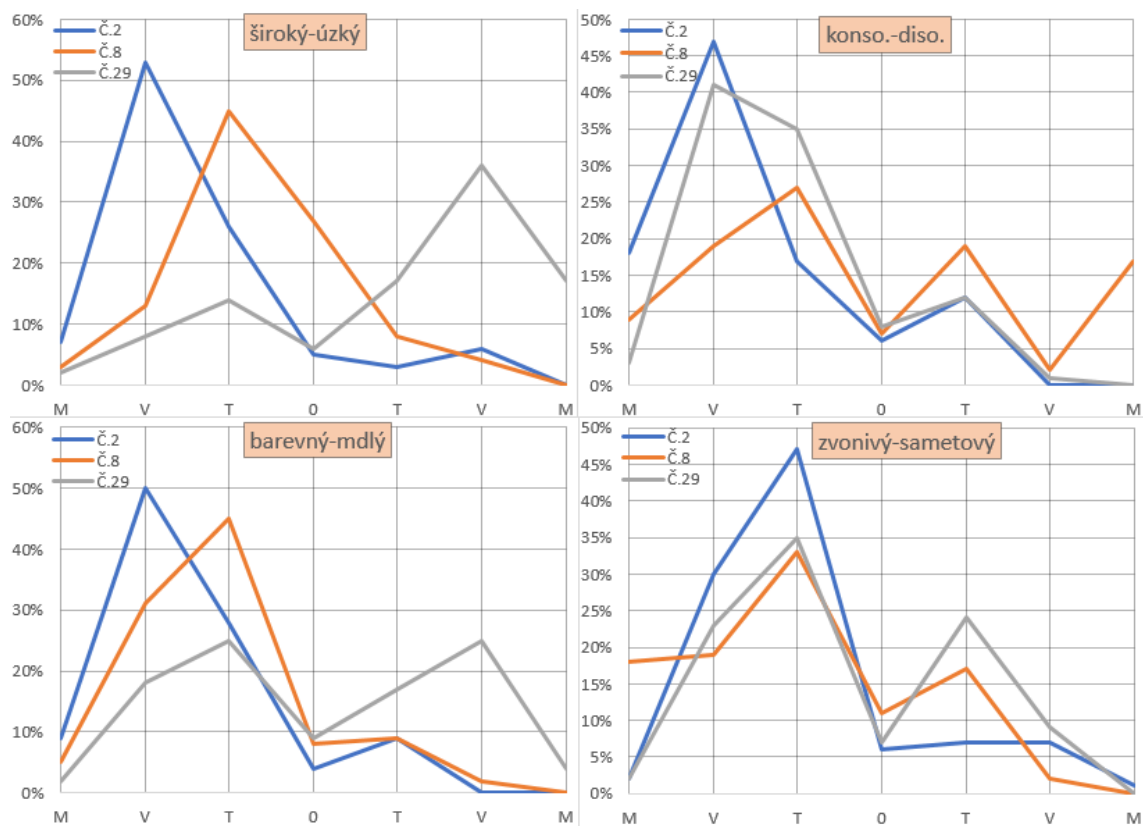
V této skupině se zkoumá upravené spektrum klavíru. Konkrétní úpravy ve spektru jsou popsány v sekci 5.5.1. V následující tabulce 7.13 se nachází výsledky škálování dle Dunna a Kinga. Vzorky jsou celkem tři a jsou vertikálně uspořádány podle pořadí, v jakém se v dotazníku vyskytly tzn. vzorek č. 2, vzorek č. 8 a vzorek č. 29. Výsledky jsou vyneseny do grafu 7.5. V další tabulce 7.14 jsou pak aritmetické průměry vzorků pro jednotlivé škály.

	M(%)	V(%)	T(%)	O(%)	T(%)	V(%)	M(%)	
široký	7	53	26	5	3	6	0	úzký
	3	13	45	27	8	4	0	
	2	8	14	6	17	36	17	
konsonantní	18	47	17	6	12	0	0	disonantní
	9	19	27	7	19	2	17	
	3	41	35	8	12	1	0	
barevný	9	50	28	4	9	0	0	mdlý
	5	31	45	8	9	2	0	
	2	18	25	9	17	25	4	
zvonivý	2	30	47	6	7	7	1	sametový
	18	19	33	11	17	2	0	
	2	23	35	7	24	9	0	

Tab. 7.13: Škálování vzorků č. 2, 8 a 29 (uspořádány pod sebou)

	Vzorek č. 2	Vzorek č. 8	Vzorek č. 29
široký-úzký	2.62	3.36	5.04
konsonantní-disonantní	2.47	3.82	2.88
barevný-mdlý	2.54	2.91	4.12
zvonivý-sametový	3.11	2.96	3.55

Tab. 7.14: Aritmetické průměry vzorků č. 2, 8 a 29



Obr. 7.5: Grafy vzorků klavíru

Vzorek č. 2	původní spektrum klavíru
Vzorek č. 8	klavír s posílenou 7. harmonickou složkou
Vzorek č. 29	klavír bez 1. a 2. harmonické složky

Tab. 7.15: Složení spektra všech vzorků klavíru

V této skupině byl jeden referenční vzorek klavíru (č. 2) a s ním se pak porovnávaly další dva vzorky. Ze škály široký úzký je patrné, že referenční vzorek se zdál respondentům jako nejširší (ar. pr. 2.62). Respondenti se zde značně shodovali (53% respondentů určilo vzorek jako „velmi“ široký). V případě zvýšení intenzity 7. harmonické u vzorku č. 8 se náhle vzorek začal zdát jako užší. Vzorek č. 29 s odebranou 1. a 2. harmonickou se podle očekávání zdál jako velmi úzký.

Dalo by se očekávat, že přirozený zvuk klavíru se respondentům bude zdát jako nejvíce konsonantní. Tomu tak u vzorku č. 2 se svým aritmetickým průměrem 2.47 skutečně bylo. Konsonantním byl hodnocen i vzorek č. 29 bez 1. a 2. harmonické. Odebráním 1. a 2. harmonické se sice odstraní fundament a první oktáva od fundamentu, tonální citění však zůstane nenarušeno. Podle předpokladu se vzorek č. 8 s posílenou 7. harmonickou zdál jako nejvíce disonantním. Očekával se ale ještě větší vliv disonance (ar. pr. více než 4.5). Zde byl však průměr pouze 3.82.

Nejbarevnějším se zdál opět vzorek č. 2. Je to proto, že v jeho spektru nedošlo k žádné změně, tudíž na respondenty působí jako přirozený barevný zvuk klavíru. Přidáním 7. harmonické složky se spektrum změní a tudíž vzorek č. 8 působí mnohem více mdlé. Podle teorie pěkně vyšel vzorek č. 29, kde se při odstranění 1. a 2. harmonické úplně vytratí barva. Zvuk klavíru se pak zdál velmi mdlý.

Z grafu páru zvonivý-sametový je vidět, že zvuk klavíru na některé respondenty působil jako trochu zvonivý, na jiné jako trochu sametový. Nejzvonivěji byl však vnímán vzorek č. 2. Zajímavé je, že co se zvonivosti týče, tak vzorek č. 8 a 29 jsou na tom podobně. Spíše by se dalo očekávat, že vzorek č. 8 s posílenou 7. harmonickou se bude zdát jako více zvonivý. Tento předpoklad se zde však nepotvrdil.

Nejvíce přehrávaným vzorkem, byl vzorek s původním spektrem klavíru tedy vzorek č. 2 s průměrem 3.91. Vzorek č.8 měl průměr přehrávání 3.56 a vzorek č. 29 průměr 2.96.

7.6 Skupina vzorků varhan

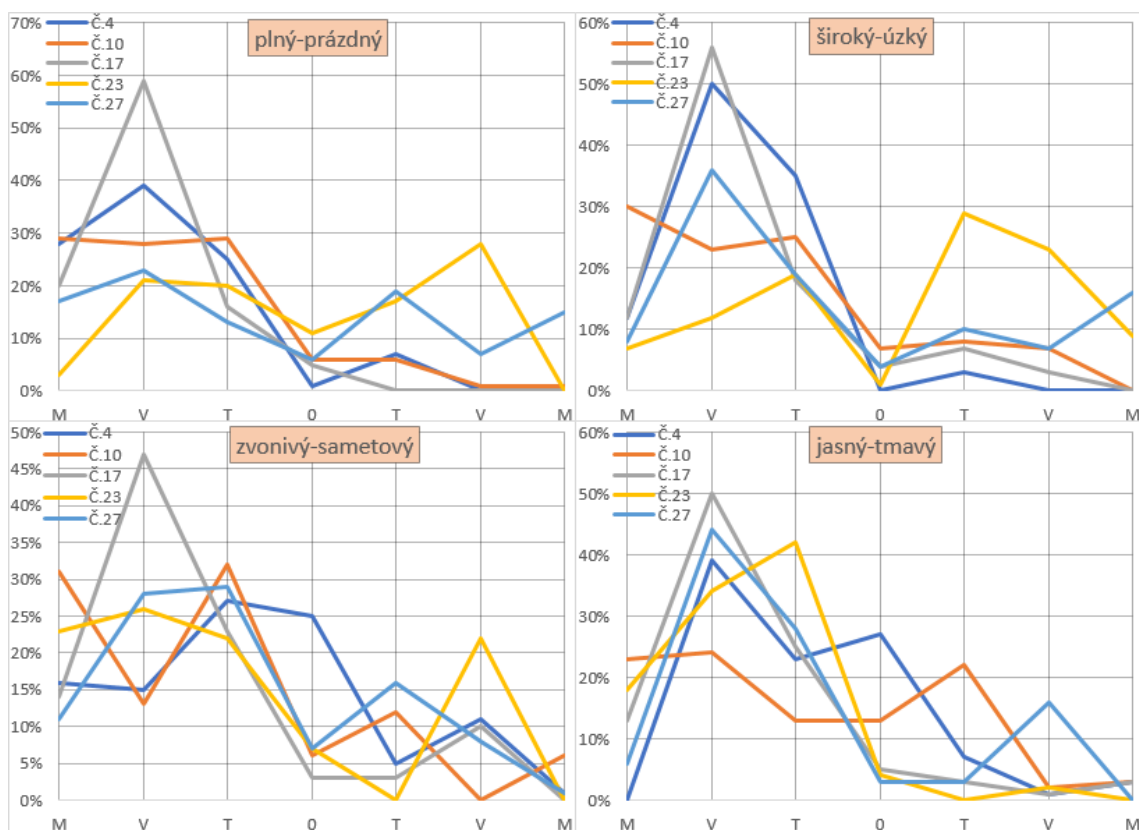
Tato skupina se zaměřuje na spektrum varhan. Skupina vzorků je podrobně popsána v sekci 5.5.1. V následující tabulce 7.16 se nachází výsledky škálování dle Dunna a Kinga. Vzorků je celkem pět a jsou vertikálně uspořádány podle pořadí, v jakém se v dotazníku vyskytly tzn. vzorek č. 4, vzorek č. 10, vzorek č. 17, vzorek č. 23 a vzorek č. 27. Výsledky jsou vyneseny do grafu 7.6. V další tabulce 7.17 jsou pak aritmetické průměry vzorků pro jednotlivé škály.

	M(%)	V(%)	T(%)	0(%)	T(%)	V(%)	M(%)	
plný	28	39	25	1	7	0	0	prázdný
	29	28	29	6	6	1	1	
	20	59	16	5	0	0	0	
	3	21	20	11	17	28	0	
	17	23	13	6	19	7	15	
široký	12	50	35	0	3	0	0	úzký
	30	23	25	7	8	7	0	
	12	56	18	4	7	3	0	
	7	12	19	1	29	23	9	
	8	36	19	4	10	7	16	
zvonivý	16	15	27	25	5	11	1	sametový
	31	13	32	6	12	0	6	
	14	47	23	3	3	10	0	
	23	26	22	7	0	22	0	
	11	28	29	7	16	8	1	
jasný	0	39	23	27	7	1	3	tmavý
	23	24	13	13	22	2	3	
	13	50	25	5	3	1	3	
	18	34	42	4	0	2	0	
	6	44	28	3	3	16	0	

Tab. 7.16: Škálování vzorků č. 4, 10, 17, 23 a 27 (uspořádány pod sebou)

	Vzorek č. 4	Vzorek č. 10	Vzorek č. 17	Vzorek č. 23	Vzorek č. 27
plný-prázdný	2.20	2.39	2.06	4.02	3.68
široký-úzký	2.32	2.61	2.47	4.38	3.57
zvonivý-sametový	3.25	2.79	2.64	3.01	3.17
jasný-tmavý	3.17	3.05	2.50	2.4	3.01

Tab. 7.17: Aritmetické průměry vzorků č. 4, 10, 17, 23 a 27



Obr. 7.6: Grafy vzorků varhan

Vzorek č. 4	původní spektrum varhan
Vzorek č. 10	varhany s posílenou 7., 9., 11., 14. harmonickou složkou
Vzorek č. 17	varhany s posílenými oktáвовými složkami (1, 2, 4, 8, 16, 32)
Vzorek č. 23	varhany bez oktáвовých složek (1, 2, 4, 8, 16, 32)
Vzorek č. 27	varhany bez 1. a 2. harmonické složky

Tab. 7.18: Složení spektra všech vzorků varhan

Tato skupina byla co do počtu vzorků nejrozsáhlejší. Obsahovala celkem pět vzorků varhan. Referenční vzorek byl vzorek č. 4. Na škále plný-prázdný se podle předpokladu jeví jako nejvíce plný vzorek č. 17 s posílenými oktávovými složkami. 59 % respondentů jej označilo jako „velmi“ plný. Podle předpokladu se nejvíce prázdné zdály vzorky č. 23 a 27. Jak se očekávalo, tak nejprázdnější byl vzorek č. 23, kterému byly odebrány oktávové složky. Vzorek č. 23 i 27 (bez 1. a 2. harmonické) sice vykazovaly nejprázdnější charakter, ale v rámci celého průzkumu dosahovaly průměrů (4.02 a 3.68), což se příliš k pólu prázdný nepřiklání. To je způsobeno velmi barevným spektrem varhan oproti ostatním zkoumaným vzorkům.

V páru široký-úzký se stejně jako u vzorků klavíru jako nejširší zdál referenční vzorek č. 4. Téměř stejně široký se ale zdál i vzorek č. 17 s posílenými oktávovými složkami. Zajímavé tedy je, že i přesto, že vzorek č. 17 měl posílené oktávové složky, tak celkový aritmetický tohoto vzorku (2.47) se méně přiklání k vjemu plnosti, než referenční vzorek č. 4 s průměrem 2.32. Jako nejužší byl podle předpokladu vzorek č. 23. Vzorek č. 10 (posílená 7., 9., 11. a 14. harmonická) byl zase nejčastěji (30%) ohodnocen respondenty jako „mimořádně“ široký. Nicméně podle ar. pr. je vzorek v rámci této skupiny až třetí nejširší.

Na škále zvonivý-sametový se jako nejzvonivější zdál vzorek č. 17 a až poté vzorek č. 10. Předpokladem bylo, že se více zvonivě měl zdát vzorek č. 10. Ten byl sice nejvícekrát (31%) označen respondenty jako „mimořádně“ zvonivý. Celkový ar. pr. (2.79) se ale přiklání na stranu zvonivosti méně, než u vzorku č. 17, kde byl ar. pr. 2.64. Zbylé vzorky byly na této škále velmi podobně ohodnoceny. Spíše se přiklíněly na stranu zvonivého charakteru.

Při pohledu na graf jasný-tmavý je hned vidět, že se všechny vzorky klonily spíše ke vjemu jasného zvuku. Oktávové složky opět pomohly k vjemu největší jasnosti. Je tedy patrné, že posílením oktávových složek se kromě předpokládané plnosti posílila i zvonivost, jasnost ale také se zdál vzorek jako více široký. Přesný opak platí pochopitelně u vzorku, jemuž byly oktávové složky odebrány. Rovněž jako u skupiny klavíru byl nejčastěji přehrávaný referenční vzorek č. 4. Průměry přehrávání zbylých vzorků byly následující: vzorek č. 10 - 2.80, vzorek č. 17 - 2.29, vzorek č. 23 - 2.42 a vzorek č. 27 - 2.44.

7.7 Skupina vzorků kytary

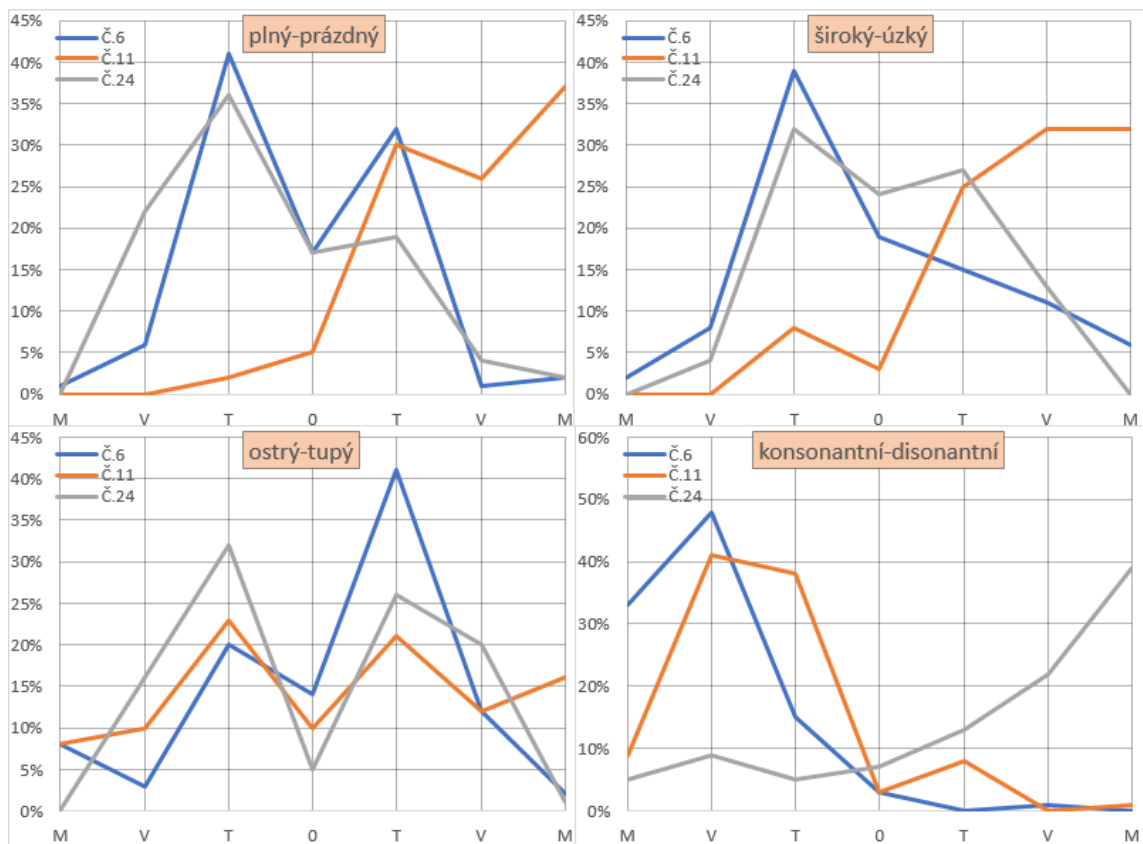
V této skupině se zkoumá upravené spektrum kytary. Konkrétní úpravy ve spektru jsou popsány v sekci 5.5.1. V následující tabulce 7.19 se nachází výsledky škálování dle Dunna a Kinga. Vzorky jsou celkem tři a jsou vertikálně uspořádány podle pořadí, v jakém se v dotazníku vyskytly tzn. vzorek č. 6, vzorek č. 11 a vzorek č. 24. Výsledky jsou vyneseny do grafu 7.7. V další tabulce 7.20 jsou pak aritmetické průměry vzorků pro jednotlivé škály.

	M(%)	V(%)	T(%)	0(%)	T(%)	V(%)	M(%)	
plný	1	6	41	17	32	1	2	prázdný
	0	0	2	5	30	26	37	
	0	22	36	17	19	4	2	
široký	2	8	39	19	15	11	6	úzký
	0	0	8	3	25	32	32	
	0	4	32	24	27	13	0	
ostrý	8	3	20	14	41	12	2	tupý
	8	10	23	10	21	12	16	
	0	16	32	5	26	20	1	
konsonantní	33	48	15	3	0	1	0	disonantní
	9	41	38	3	8	0	1	
	5	9	5	7	13	22	39	

Tab. 7.19: Škálování vzorků č. 6, 11 a 24 (uspořádány pod sebou)

	Vzorek č. 6	Vzorek č. 11	Vzorek č. 24
plný-prázdný	3.84	5.91	3.53
široký-úzký	3.94	5.77	4.13
ostrý-tupý	4.21	4.26	4.05
konsonantní-disonantní	1.92	2.64	5.36

Tab. 7.20: Aritmetické průměry vzorků č. 6, 11 a 24



Obr. 7.7: Grafy vzorků kytary

Vzorek č. 6	původní spektrum kytary
Vzorek č. 11	kytara bez 1. a 2. harmonické složky
Vzorek č. 24	kytara s rozladěnou 3. harmonickou složkou

Tab. 7.21: Složení spektra všech vzorků kytary

Referenční vzorek kytar byl vzorek č. 6. Zajímavé je, že vzorek č. 24, který má rozladěnou 3. harmonickou, se jeví jako plnější, než referenční vzorek č. 6. Podle předpokladu byl nejprázdnějším vzorkem zvolen vzorek č. 11, kterému byla odebrána 1. a 2. harmonická. Jeho průměr dosáhl hodnoty 5.91.

Tento vzorek se rovněž zdál jako nejužší. Opět se jako v případě varhan a klavíru ukázalo, že nejširší byl vnímán původní nezměněný vzorek. Dalo by se očekávat, že plnější vzorek by se měl zdát také jako širší. V tomto výzkumu tomu tak ale nebylo. Referenční vzorek č. 6 se zdál sice méně plný než vzorek č. 24, byl však širší.

Co se týče ostrosti a tuposti tak respondenti se sice neshodovali při svých odpovědích, ale výsledné aritmetické průměry si jsou velmi podobné (4.21, 4.26 a 4.05).

Škála konsonantní-disonantní přesně splnila předpoklad. Vzorek č. 6 se zdál jako nejkonsonantnější. Po něm následoval vzorek č. 11. Tomu sice nebyla přidána žádná disonance, ale odebráním 1. a 2. harmonické došlo k nižšímu tonálnímu cítění. Nejvíce disonantní byl vzorek č. 24, který obsahoval rozladěnou 3. harmonickou. Jeho aritmetický průměr byl 5.36.

Zajímavé je, že vzorky kytary byly celkově respondenty přehrávány vícekrát. Průměr přehrání vzorku č. 6 byl 3.51, vzorku č. 11 3.22 a vzorku č. 24 3.13.

7.8 Skupina vzorků trombónu

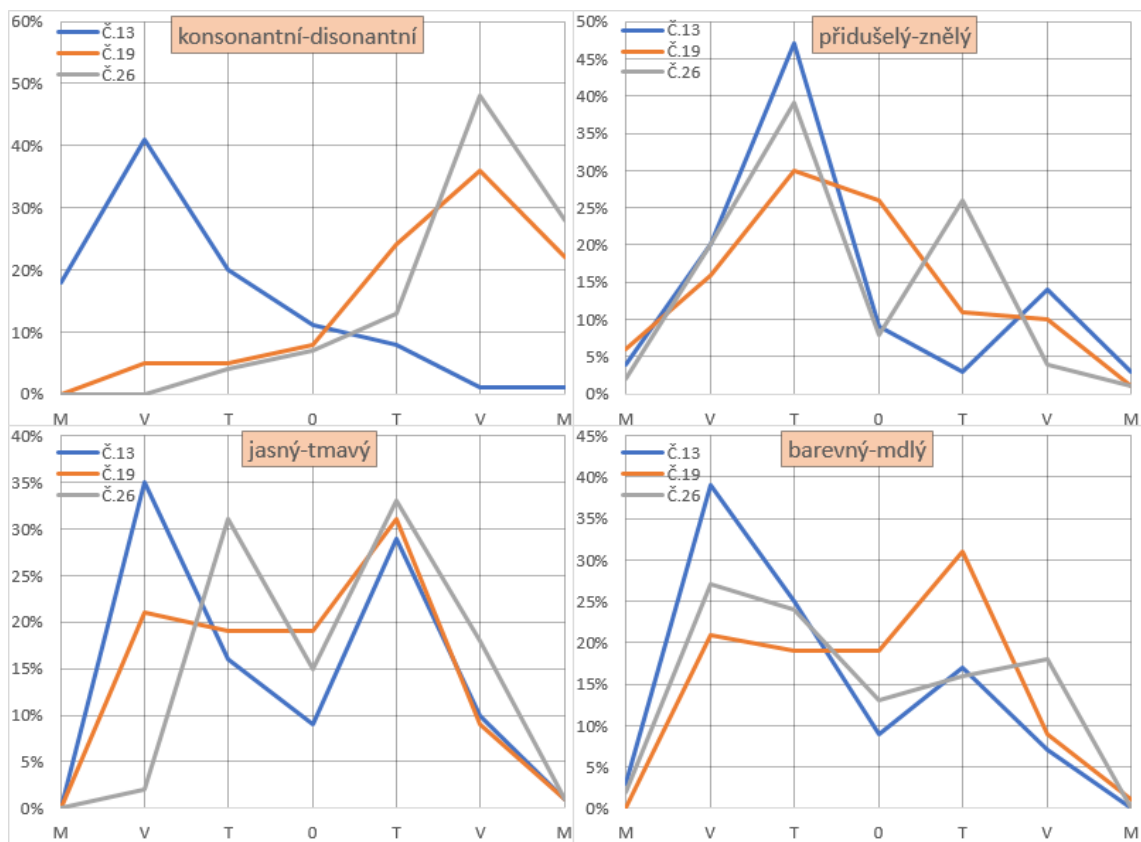
V této skupině se zkoumá upravené spektrum trombónu. Konkrétní úpravy ve spektru jsou popsány v sekci 5.5.1. V následující tabulce 7.22 se nachází výsledky škálování dle Dunna a Kinga. Vzorky jsou celkem tři a jsou vertikálně uspořádány podle pořadí, v jakém se v dotazníku vyskytly tzn. vzorek č. 13, vzorek č. 19 a vzorek č. 26. Výsledky jsou vyneseny do grafu 7.8. V další tabulce 7.23 jsou pak aritmetické průměry vzorků pro jednotlivé škály.

	M(%)	V(%)	T(%)	O(%)	T(%)	V(%)	M(%)	
konsonantní	18	41	20	11	8	1	1	disonantní
	0	5	5	8	24	36	22	
	0	0	4	7	13	48	28	
přidušelý	4	20	47	9	3	14	3	znělý
	6	16	30	26	11	10	1	
	2	20	39	8	26	4	1	
jasný	0	35	16	9	29	10	1	tmavý
	0	21	19	19	31	9	1	
	0	2	31	15	33	18	1	
barevný	3	39	25	9	17	7	0	mdlý
	0	16	11	7	20	29	17	
	2	27	24	13	16	18	0	

Tab. 7.22: Škálování vzorků č. 13, 19 a 26 (uspořádány pod sebou)

	Vzorek č. 13	Vzorek č. 19	Vzorek č. 26
konsonantní-disonantní	2.57	5.47	5.89
přidušelý-znělý	3.41	3.54	3.52
jasný-tmavý	3.66	3.91	4.37
barevný-mdlý	3.19	4.86	3.68

Tab. 7.23: Aritmetické průměry vzorků č. 13, 19 a 26



Obr. 7.8: Grafy vzorků trombónu

Vzorek č. 13	původní spektrum trombónu
Vzorek č. 19	trombon s rozladěnou 1., 2., 4., 8. harmonickou složkou
Vzorek č. 26	trombon s rozladěnou 3., 5., 6., 7. harmonickou složkou

Tab. 7.24: Složení spektra všech vzorků trombónu

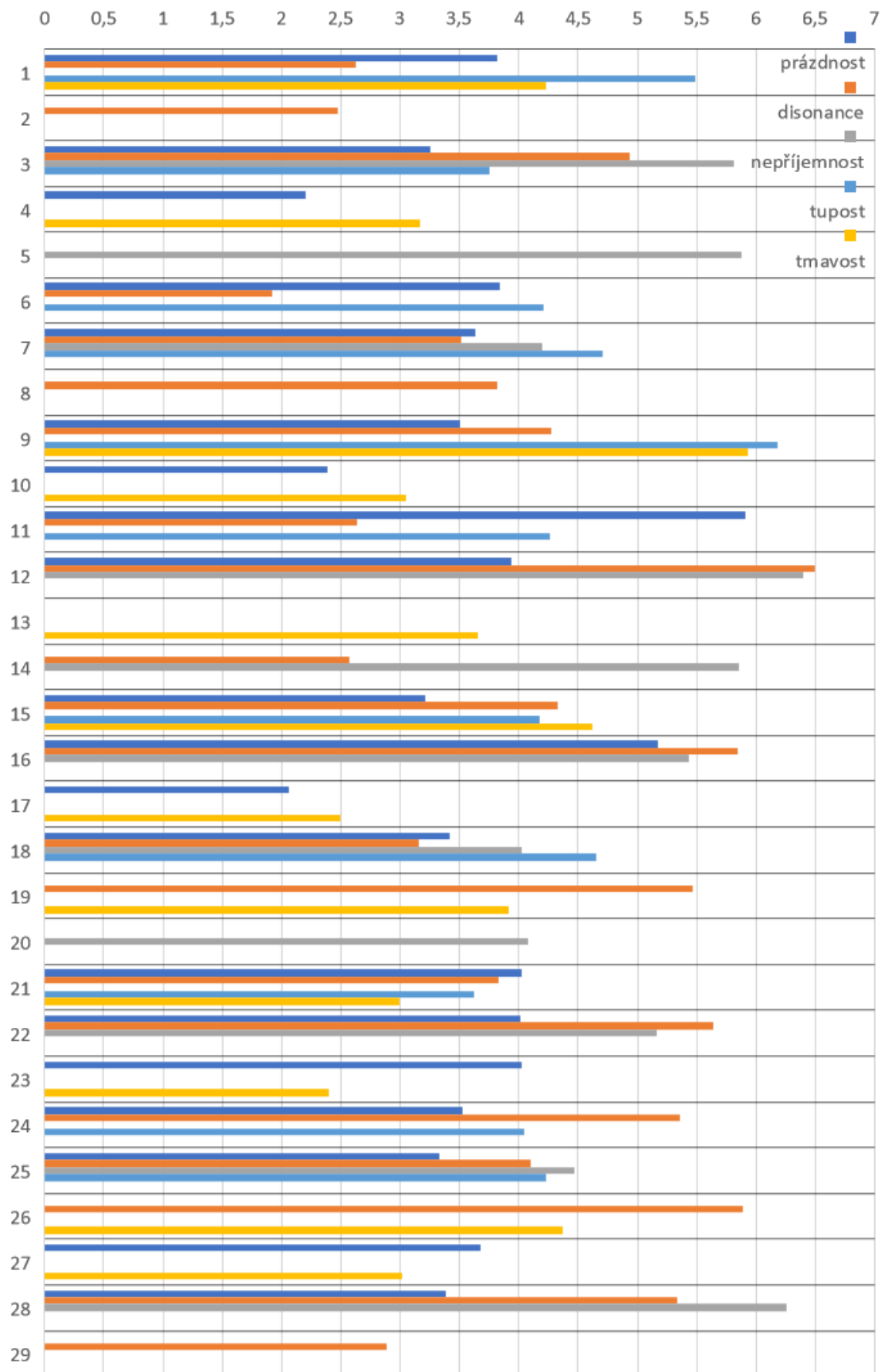
V této skupině se především zkoumalo, jaké složení prvního pásma spektra bude působit disonantnějším dojmem. Vzorek č. 13 byl opět referenčním vzorkem a obsahuje původní složky trombónu. Vzorek č. 19 se zdá jako více konsonantní oproti vzorku č. 26. Je tedy patrné, že v případě rozladění lichých složek dojde ke vjemu větší disonance než při rozladění sudých složek. Nejvíce konsonantním byl vzorek č. 13, u kterého nedošlo k žádnému přidání inharmonicit.

Při pohledu na graf přidušely-zněly si lze povšimnout, že velká část respondentů se u všech vzorků přiklání k hodnocení jako „trochu“ přidušely. Nejvíce přidušely byl referenční vzorek č. 13. Všechny vzorky měly ale velmi podobné průměry (3.41, 3.54 a 3.52). Na této škále je patrné, že si respondenti nebyli moc jisti s termíny a tudíž vzorky hodnotili spíše neutrálně.

U páru jasný-tmavý je při pohledu na graf zřejmé, že se respondenti příliš neshodovali. Podle aritmetických průměrů je však patrné, že nejjasnější vzorek byl vzorek č. 13 s průměrem 3.66 a nejtmavší byl vzorek č. 26 s průměrem 4.37. Jako barevný se znovu stejně jako v případě všech vzorků hudebních nástrojů nejvíce barevně jeví referenční vzorek č. 13 s původním spektrem trombónu. Vzorky trombónu byly celkově přehrávány méně než vzorky kytary. Vzorek č. 13 dosahuje průměru přehrávání 3.02, vzorek č. 19 - 2.82 a vzorek č. 26 - 2.64.

7.9 Srovnání škál všech vzorků

Na následujícím sloupcovém grafu jsou srovnány nejčastěji používané škály: plný/-prázdný, konsonantní/disonantní, příjemný/nepříjemný, ostrý/tupý a jasný/tmavý. Na ose x jsou vyneseny aritmetické průměry těchto páru pro všechny vzorky. Legendy jsou proto vždy druhý pojem z páru tak, aby grafické zobrazení vizuálně odpovídalo pojmu. Ne každý vzorek byl ohodnocen těmito škálami, a tak se stává, že u těchto vzorků jsou v grafu pouze některé sloupce.



Obr. 7.9: Porovnání nejčastějších škál všech vzorků

7.10 Rozpory při výzkumu

Na závěr je přiložena tabulka ukazující ohodnocené škály, u kterých se respondenti nejméně shodovali.

Sedmistupňová škála byla rozdělena na dvě části, přičemž prostřední neutrální termín nebyl brán v potaz. Jednotlivým termínům byly přiřazené hodnoty, které určovaly jejich váhu: počet ohodnocení termínu „mimořádně“ byl vynásoben číslem 3, „velmi“ číslem 2 a „trochu“ číslem 1. Tyto výsledky se pro každou stranu sečetly. Dostali jsme pak dvě čísla, kde každé z nich ukazovalo míru náklonnosti k jednomu resp. druhému pólu. Tyto čísla jsme pak od sebe odečetli a vypočetli absolutní hodnotu tohoto rozdílu. Velký rozdíl znamenal, že se respondenti přikláněli k jednomu z pólů. Tzn. čím menší rozdíl tedy byl, tím více se respondenti při hodnocení škály neshodovali.

Celkem se v průzkumu hodnotilo 116 škál. V následující tabulce 7.25 je vypsáno devět vzorků a jejich škála, u které došlo při hodnocení k největším rozporům mezi respondenty. Výsledky jsou seřazeny od nejrozpornějšího hodnocení.

číslo vzorku	škála	rozdíl
Vzorek č. 22	plný-prázdný	0.01
Vzorek č. 18	příjemný-nepříjemný	0.02
Vzorek č. 21	plný-prázdný	0.02
Vzorek č. 23	plný-prázdný	0.02
Vzorek č. 24	ostrý-tupý	0.05
Vzorek č. 6	široký-úzký	0.06
Vzorek č. 12	plný-prázdný	0.06
Vzorek č. 20	příjemný-nepříjemný	0.08
Vzorek č. 19	jasný-tmavý	0.09

Tab. 7.25: Vzorky a jejich škály s největší mírou rozptylu výsledků

U těchto škál devíti vzorků se respondenti shodovali nejméně. Rozdíly dvou škál byly menší než 0.1 a tudíž můžeme tvrdit, že odpovědi respondentů byly téměř 50 na 50 a nebyla zde žádná náklonnost k jednomu z pólů.

8 Závěr

Bakalářská práce měla za úkol zkoumat vliv jednotlivých harmonických složek ve spektru na vjem barvy zvuku. Před samotným průzkumem však bylo potřeba provést teoretický rozbor, aby čtenáři bylo vysvětleno několik témat potřebných k pochopení výsledků průzkumu.

Nejprve tedy byly popsány základní teoretické poznatky ohledně psychoakustiky, barvy zvuku a signálů. Stěžejní část práce je zkoumání barvy zvuku, tudíž je tato problematika popsána nejpodrobněji. Velký důraz byl také kladen na spektrum tónu a na rozdílový mechanismus tónů.

Před samotným výzkumem bylo nutné popsat i samotnou metodu sémantického diferenciálu, jež byla při výzkumu využita. Dále pak způsob, jakým probíhal sběr výsledků skrze aplikaci s dotazníkem.

Bohužel z důvodu koronavirové krize nebylo možné, abych se při sběru výsledků setkal se všemi respondenty osobně a zajistil jim stejné podmínky tzn. stejný notebook a sluchátka. Nezbyvalo nic jiného, než všem respondentům rozeslat aplikaci přes internet. Často jsem se setkával s neochotou lidí průzkum udělat. Dále se objevilo několik problémů s aplikací, a nebo s nepochopením způsobu ohodnocení. Navíc respondenti při výzkumu neměli ideální shodné podmínky pro poslechový test. Musím však říct, že po shromáždění výsledků a jejich následnému „dávání dohromady“, jsem byl příjemně překvapen. Výsledky poměrně dobře odpovídaly teoretickým předpokladům.

K výzkumu jsem oslovoval pouze respondenty z řad hudebníků, zvukařů, studentů hudebních školy a oboru Audio inženýrství. I přesto, že se jednalo o lidi, kteří určitě záležitosti spojené s barvou zvuku řešili, často se stávalo, že nerozuměli pojmovým párům a během průzkumu jsem tak musel několik z nich vysvětlovat (např. jasný-tmavý, jiskrný-zastřený).

I přes náročný průběh při výzkumu se dá říct, že většina předpokladů byla splněna. Poměrně velká neshoda mezi respondenty byla u skupiny sudých a lichých vzorků. To mě docela překvapilo. Důvodem byl ale fakt, že v této skupině se nacházel vzorek č. 1. Ten je nejnáchylnější na přesné ohodnocení. Respondenti se poprvé setkají s dotazníkem a v podstatě zjišťují co mají dělat. Bylo tedy i pochopitelné, že si respondenti tento vzorek přehrávali nejčastěji (průměr přehrávání byl 5.16). Naopak nejméně přehrávaným byl vzorek č. 12 (průměr přehrávání byl 2.18) ze skupiny vzorků s různou mírou inharmonicit a šumem. Zde je na místě se domnívat, že si jej respondenti možná i nechtěli vícekrát přehrát kvůli velmi silnému vjemu disonance (pár konsonantní-disonantní měl aritmetický průměr 6.49 - jedná se o velmi silný vjem disonance). Celkově tato skupina byla nejméně přehrávanou. Průměr přehrávání jednoho vzorku byl 2.39. Je velmi nepravděpodobné, že by si respondenti tuto sku-

pinu přehrávali nejméně, protože by se jim zdála jako nejsnadnější na ohodnocení. Spíše je svým velmi nepříjemným charakterem odpudila od dalšího přehrání. Celkově nejpřehrávanější skupinou byla skupina vzorků vzniklých kombinací vyšších harmonických složek v prvním pásmu s průměrem přehrání 3.47 na vzorek. Z toho lze usuzovat, že u uměle vymodelovaných vzorků se mnohem hůře ohodnocovaly jednotlivé barvy, než u zvuků hudebních nástrojů.

Další zajímavý fakt bylo, že páry příjemný-nepříjemný a ostrý-tupý spolu často nesouvisely. Předpokladem bylo, že vzorky, které se budou zdát jako ostré, se budou zároveň jevit jako nepříjemné. Výsledky však ukazují na fakt, že respondenti často ohodnotili vzorek jako ostrý a zároveň jako příjemný (vzorky č. 7, 25). Naopak pár drsný-jemný koreloval s párem příjemný-nepříjemný, kdy se drsný vzorek zdál jako nepříjemný.

Dalo by se předpokládat, že přidáním nebo posílením harmonických složek ve spektru reálných hudebních nástrojů se vzorek bude zdát více širší. Průzkum ale dokázal, že nejširší se zdálo vždy spektrum nástroje, u něhož nedošlo k žádnému přidání či posílení harmonické.

Celkově práce obsahuje osm skupin. Výsledky byly porovnány a byl vynesena verdikt, zda-li byl splněn předpoklad či nikoliv.

Práce by se dala rozšířit o křížové srovnání každého vzorku, kdy každý vzorek by byl prezentován nejprve melodií a poté dále v dotazníku i tónem. Dalo by se pak zhodnotit, zda odchylka výsledků tónu a melodie není příliš velká a tedy respondenti nevnímali vzorek jednotně. V mé práci s 29. vzorky by to ale znamenalo, že by respondenti museli hodnotit 58 vzorků. Spíše jsem se tedy zaměřil na to, abych se v mém výzkumu mohl zabývat větším množstvím vzorků a skupin. Na čem by se ale určitě dalo zapracovat, jsou pojmové páry. V podobných výzkumech bych se určitě nebránil škály ještě více zjednodušit, aby se respondenti místo přemýšlení, co která škála znamená, více soustředili na samotný poslech vzorků.

Literatura

- [1] MELKA, A. *Základy experimentální psychoakustiky*. 1. vydání. V Praze: Akademie múzických umění, 2005. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. 328 s. ISBN 80-7331-043-0
- [2] SYROVÝ, V.: *Hudební akustika*. 2. doplněné vydání. V Praze: Akademie múzických umění. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. 440 s. 2013. ISBN 978-80-7331-297-8
- [3] *ČSN 01 1600: Akustika – Terminologie*.
- [4] *ČSN IEC 50(801): Mezinárodní elektrotechnický slovník*. Kapitola 801: Akustika a elektroakustika.
- [5] LETOWSKI, t.: *Timber, tone color, and sound quality: concepts and definitions*. Archives of acoustics 17 (1992) Dostupné z URL: https://www.researchgate.net/publication/288929521_Timbre_tone_color_and_sound_quality_Concepts_and_definitions.
- [6] BLÁHA, M., LÉBL, V.: *Objektivní a subjektivní problematika zvukové barvy*. Hudební věda 11 (1974), s. 211–249.
- [7] REKTORYS, K.: *Přehled užití matematiky*. Prometheus, Praha 2002. ISBN 80-7196-180-9.
- [8] SMÉKAL, Z.: *Analýza signálů a soustav-BASS*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. ISBN 978-80-214-4716-5.
- [9] *Vlastnosti Fourierových řad*. [Online]. [cit. 2019-12-8] Dostupné z URL: <http://math.feld.cvut.cz/mt/txte/3/txc3ea3g.htm>.
- [10] RYNDOVÁ, R.: *Otázka historických ladění při současné interpretační praxi hry na zobcové flétny*. [online]. Brno, 2009. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z URL: <https://theses.cz/id/9qdd2f/>. Bakalářská práce. Filozofická fakulta Masarykovy univerzity, Katedra hudební vědy. Vedoucí práce: MgA. Eduard Tomašík
- [11] GEIST, B.: *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, 2005. ISBN isbn80-86253-31-7.
- [12] *Zvukové vlny a kmity: Přednáška č.1* [online]. neznámé: neznámé [cit. 2019-12-14]. Dostupné z URL:

<http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/page95/files/I_zvukove_vlny.pdf>.

- [13] *Zvukové podněty a vjemy*. [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z URL: <<http://www.traced-ideas.cz/music/perception.html>>.
- [14] Štěpánek, J., Moravec, O.: *Barva hudebního zvuku a její slovní popis*. Akademie múzických umění v Praze, Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU, 2005. ISBN 80-7331-031-7.

Seznam příloh

Příloha 1 - Aplikace s dotazníkem se všemi vzorky je uložena na přiloženém CD.