



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

EXPERIMENTÁLNÍ HARDWAROVÝ HUDEBNÍ NÁSTROJ, DEMONSTRUJÍCÍ MOŽNOSTI SONIFIKACE SVĚTLA

EXPERIMENTAL HARDWARE MUSICAL INSTRUMENT DEMONSTRATING POSSIBLE MEANS OF
COLOUR SONIFICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Rezek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Václav Rezek

ID: 186565

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální hardwarový hudební nástroj, demonstrující možnosti sonifikace světla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a realizovat experimentální hardwarový syntetizér; experimentálnost nástroje spočívá v demonstraci paralel a rozdílů ve vnímání spektrálních barev a jim odpovídajících transponovaných tónů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GUŠTAR, M. Elektrofony II. Uvnitř, Praha, 2008. ISBN 978-80-239-8447-7.

[2] FORRÓ D. Svět MIDI. Grada, Praha, 1997. 375s. ISBN 80-7169-412-6.

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

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

Cílem práce je návrh a konstrukce experimentálního hudebního nástroje *SuperDuperRainbowThing*, jehož experimentálnost spočívá v sonifikaci barevného spektra. Hlavní hardwarová část nástroje je tvořena mikrokontrolerem Arduino a počítačem Raspberry Pi. Část softwarová, která s hardwarem komunikuje pomocí standardu MIDI v prostředí Pure Data a jazyce Python. Nástroj v reálném čase tvoří zvukový výstup na základě barvy, kterou hráč nastavuje.

Klíčová slova

Světlo, barva, syntezátor, experimentální hudba, multiplexer, Linux, Arduino, Pure Data, Raspberry Pi, RGB, RYB, MIDI

Abstract

The goal of this thesis was to design and build an experimental musical instrument *SuperDuperRainbowThing*. The experiment nature of which lies in sonification of the colour spectrum. The hardware is built using Arduino microcontroller and a single board computer Raspberry Pi. Software communicates with the hardware via a MIDI protocol and is written in Python programming language and patched in Pure Data graphical environment. The instrument creates a sound output based upon colour selected by the user in real time.

Klíčová slova

Light, colour, synthesizer, experimental music, multiplexer, Linux, Arduino, Pure Data, Raspberry Pi, RGB, RYB, MIDI

REZEK, Václav. *Experimentální hardwarový hudební nástroj, demonstrující možnosti sonifikace světla* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/115326>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Dan Dlouhý.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou (bakalářskou) práci na téma *Experimentální hardwarový hudební nástroj, demonstrující možnosti sonifikace světla* 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 27. května 2019

.....

podpis autora

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Danu Dlouhému. Ph.D za hodnotnou odbornou a metodickou pomoc při návrhu zařízení, za podnětné připomínky ke zpracování práce a za čas věnovaný konzultacím všech částí práce. Nakonec bych rád kolektivně poděkoval celé internetové komunitě. Nejednou mne příspěvky na internetových fórech vyvedly ze slepých uliček.

V Brně dne: 27. května 2019

.....

podpis autora

Obsah

1. Úvod	8
2. Teoretický úvod	9
2.1. Barevné spektrum	9
2.2. Historie zkoumání podstaty barev	9
2.3. Barvené vnímání	10
2.3.1. Zrakové ústrojí	10
2.4. Barevný kruh	11
2.4.1. Isaac Newton	12
2.4.2. Johann Wolfgang von Goethe	12
2.4.3. Model RYB	13
2.5. Popis a identifikace barev	14
2.5.1. Spektrální barvy	14
2.5.2. Barevné modely	14
2.5.3. Gamut	15
2.5.4. CIELAB	15
2.5.5. RGB	16
2.5.6. CMY	18
2.5.7. HSV/HSL	18
2.6. Vnímání zvuku	19
2.6.1. Sluchové ústrojí	19
2.7. Ladění	20
2.7.1. Harmonická řada	20
2.7.2. Druhy ladění	20
2.8. Stupnice	21
2.9. Propojení smyslů	22
2.10. Synestézie	23
2.11. Vizuálně-zvuková multimedialita v umění	26
2.11.1. Výtvarné umění	26
2.11.2. Hudba	27

2.12. Sonifikace	28
2.12.1. vOICe	28
2.12.2. Synaestheatre	29
2.12.3. Hear the Rainbow	29
2.12.4. Neil Harbisson	29
3. Návrh zařízení	31
3.1. Přiblížení principu nástroje	31
3.2. Popis sonifikace	32
3.3. Využité technologie	33
3.3.1. Arduinio	33
3.3.2. PWM	34
3.3.3. Raspberry Pi	34
3.3.4. Pure Data	35
3.3.5. MIDI	35
3.3.6. DMA	36
4. Realizace nástroje	37
4.1. Základní schéma	37
4.2. Hardwarová část	38
4.2.1. Multiplexer	38
4.2.2. Potenciometry	40
4.2.3. Tlačítka a přepínače	40
4.2.4. Arduino	40
4.2.5. RGB LED	42
4.2.6. Raspberry Pi	43
4.2.7. Další propojení s Pure Data	44
4.3. Softwarová část	45
4.3.1. Volba tónů	45
4.3.2. Přidělení RGB hodnot frekvencím	46
4.3.3. Raspberry Pi	47
4.3.4. Pure Data	48
5. Praktické využití nástroje	53
6. Závěr	55
Seznam literatury	57
Obrázky	59

<i>Další zdroje</i>	60
<i>Seznam obrázků</i>	62
<i>Příloha 1 - Tabulky</i>	63
<i>Příloha 2 - Pure Data patch</i>	68
<i>Příloha 3 - Python script</i>	73
<i>Příloha 4 - Finální podoba nástroje</i>	74

1. ÚVOD

Multimedialita je součástí hudebního projevu již odedávna, nicméně technologický pokrok 20. a 21. století se zasloužil o velký rozkvět alternativních přístupů k produkci a přijímání zvukového média. Poznatky v oblastech lidské fyziologie a psychologie také přispěly velkou měrou k rozvoji hudby samotné a samozřejmě i k tomu, jak přijímáme informace. Jednou z metod experimentální hudby je tvorba kompozic na základě jevů, které nejsou přímo spojené s hudbou. Ať už jde o využití fyziologických jevů, které ve své tvorbě používá například David Rosenboom¹, nebo o zhudebnění přírodních jevů nebo náhodných dějů.

V této bakalářské práci jsem se zabýval návrhem a realizací hudebního nástroje, který si klade za cíl umožnit vytvářet hudbu nebo zvukové kompozice založené na charakteru lidského vnímání barvy. Barevná harmonie je podobně jako kompozice významnou součástí výtvarného umění a má také daná pravidla, jejichž dodržování nebo porušování ovlivňuje konečné vyznění díla. Podobně jako u harmonie hudební, lze najít fyzikální i psychologické důvody pro určité vztahy vnímáme určitým způsobem. A tento hudební nástroj si klade za cíl demonstrovat do jaké míry jsou tyto vztahy zaměnitelné.

Princip nástroje spočívá v sonifikaci barevného spektra přímým převodem frekvencí spektrálních barev na frekvence, které je člověk schopen vnímat uchem. Frekvence oscilátoru nástroje odpovídá transponované frekvenci v barevném spektru. Podobný princip využívá zařízení Eyeborg Neila Harbissona, které ovšem má za cíl rozšíření smyslového vnímání nositele. Barevné spektrum je tedy převedeno na stupnici tónů ve slyšitelné oktávě, ze kterých je hráč schopen tvořit zvukové kompozice.

Hlavní částí nástroje je hardwarový ovladač zpracovávající vstup hráče pomocí ovládacích prvků, které mikrokontroler Arduino převádí na MIDI zprávy a počítač Raspberry Pi převede na barevné světlo. Softwarová část je realizována v grafickém programovacím prostředí Pure Data.

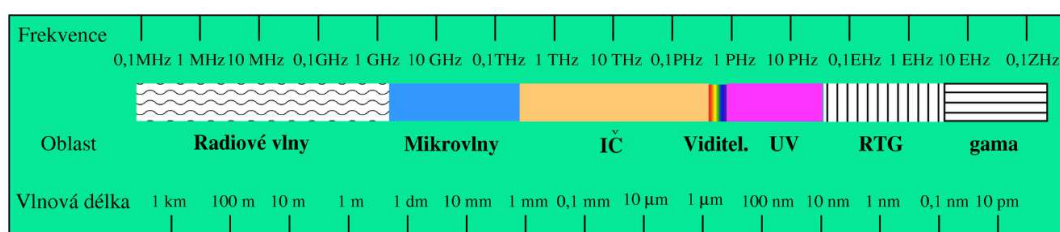
Teoretický úvod práce se zabývá podstatou lidského vnímání barev a zvuku. V dalších kapitolách je popsán návrh a realizace nástroje, a popsáno jeho reálné použití.

¹David Rosenboom (1947-) americký multiinstrumentalista, skladatel a pedagog

2. TEORETICKÝ ÚVOD

2.1. Barevné spektrum

Světlem je nazývaná malá část spektra elektromagnetického záření, vůči němuž si vytvořilo citlivost lidské zrakové ústrojí [1]. Tato část spektra je přibližně ohraničena hodnotami vlnových délek 380nm – 780nm. Záření o vlnových délkách bezprostředně nižších se nazývá ultrafialovým zářením a záření o hodnotách bezprostředně vyšších zářením infračerveným.



Obr. 2-1 Vizualizace částí spekter elektromagnetického záření

Z této vizualizace (obr. 2-1) je zřejmé, že spektrum záření, které je člověk schopen rozeznat je skutečně velmi úzké ve srovnání s obrovským rozsahem spektra elektromagnetického záření. Z evolučního hlediska ale toto „omezení“ dává smysl; lidé nepotřebují k přežití vnímat širší spektrum než to, které vnímat umí. Náš zrak se vyvinul zejména pro orientaci v prostoru, hledání potravy a ochranu před jedovatými nebo agresivními živočichy.

2.2. Historie zkoumání podstaty barev

Již od nepaměti se lidé zabývali podstatou světla a barev. Již od antiky bylo známo, že bílé světlo se potom, co projde skleněným hranolem, rozdělí na mnohobarevnou duhu, ale podstata tohoto jevu popsána nebyla. Aristoteles² tvrdil, že barevné spektrum vznikající při průchodu světla hranolem je způsobeno „znečištěním“ jinak čistého bílého světla. Toto vysvětlení bylo bráno jako nevyvratitelný fakt, dokud Isaac Newton nevydal svou práci o optice³, kde popsal pokus, při kterém dokázal opak. Tento pokus spočíval v rozdělení bílého světla za pomoci hranolu na barevné spektrum a sjednocení spektra zpět do na bílé světlo za pomoci hranolu druhého. Tímto pokusem Newton dokázal, že světlo není hranolem znečištěno, ale skládá z více barevných součástí, jejichž kombinací bílé světlo vzniká.

Dlouhou dobu se vědecká společnost přela o podstatu světla; zdali je světlo tvořeno vlněním nebo částicemi. James Clark Maxwell ve své práci *Dynamická teorie*

² Řecký filozof (*384 př.n.l. +322 př.n.l.)

³ Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light, 1704

*elektromagnetického pole*⁴ dospěl k závěru, že světlo je elektromagnetické podstaty. Heinrich Hertz tuto teorii experimentálně prokázal [2]. Zároveň se Hertz podílel na objevu tzv. fotoelektrického jevu. Jedná se o fyzikální jev, při kterém se z látky, na níž působí záření, uvolňují volné elektrony. Hertz pozoroval, že tento jev je závislý na barvě viditelného světla, kterým na látku působí, více než na intenzitě světla [2]. Tento jev se podařilo vysvětlit až Albertu Einsteinovi v jeho práci *O heuristickém hledisku dotýkající se vznikem a přeměnou světla*⁵. V tomto článku se věnoval vysvětlení fotoelektrického jevu a přišel s myšlenkou tzv. světelných kvant. Podle jeho teorie tato světelná kvanta mají energii závislou na frekvenci, se kterou kmitají, a s touto energií souvisí i energie elektronů, které jsou zářením z látky tzv. „vyražené“. A to podle rovnice,

$$hf = W_v + E_k \quad (1)$$

kde h je Planckova konstanta ($h = 6,626\,070\,040(81) \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), f je frekvence dopadajícího kvanta (fotonu), W_v výstupní práce a E_k kinetická energie vyraženého elektronu [3]. Za tuto práci Albert Einstein dostal Nobelovu cenu a spolu s dalšími pracemi, které publikoval se stala základem kvantové mechaniky. Důležité pro nás ale je, že na základě této teorie je podstata světla dvojí: částicová (korpuskulární) a vlnová. Tedy v různých situacích se světlo chová buď jako proud částic nebo jako vlnění. Různé vlastnosti potom toto záření má v závislosti na frekvenci, se kterou částice kmitají. A když se vrátíme k větě citované na začátku kapitoly, je jasné, že lidský organismus si vypěstoval vlastnost rozeznávat jednotlivé frekvence v určité části elektromagnetického záření a vnímá je jako barvy.

2.3. Barvené vnímání

V rámci viditelného spektra se zrak živých organismů (člověka nevyjímaje) vyvinul tak, aby rozeznával i užší části tohoto spektra, která označujeme jako barvy. Odpověď na otázku: „Co je to barva?“ není v žádném případě přímočará a je úzce spjata s tím, jak lidské tělo vnímá a zpracovává viditelnou realitu.

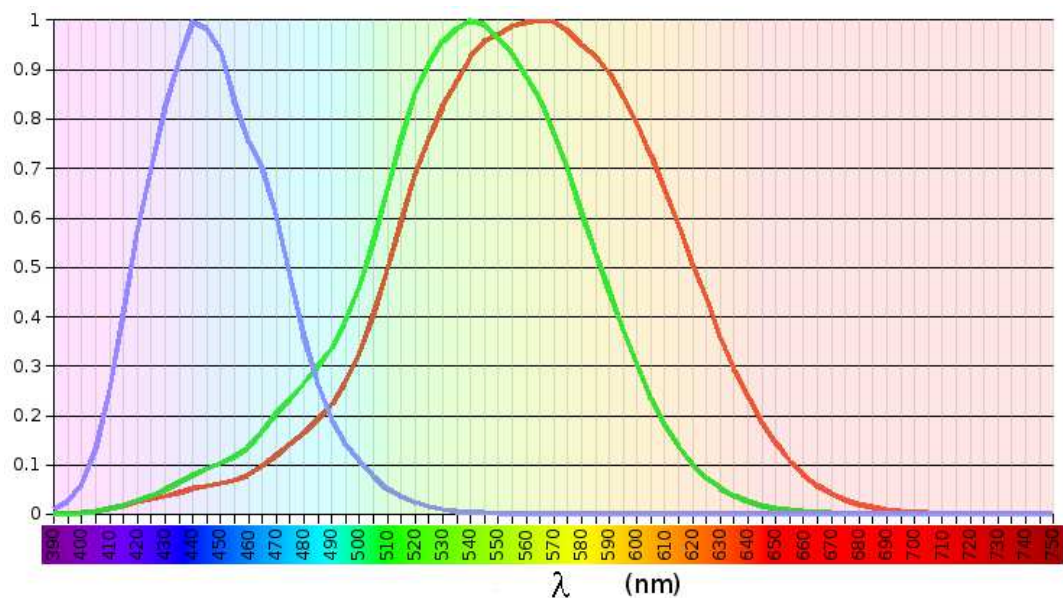
2.3.1. Zrakové ústrojí

Lidské zrakové ústrojí se (obvykle) skládá ze dvou očí, která fungují jako senzory přicházejícího světla a převádí je na elektrický signál, který je pak zpracován v části mozku, která se nazývá týlní lalok. Z vnějšího světa přicházející světlo přichází do oční bulvy skrze čočku, jejíž ohnisková vzdálenost je regulovaná svaly po jejím obvodu. Duhovka oka funguje jako mechanická clona, která reguluje množství světla, které čočkou prochází. Světlo pak dopadá na sítnici, což je vnitřní vrstva oka

⁴ A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field (1865)

⁵ Albert Einstein: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. In: Annalen der Physik. Band 322, 1905

citlivá na světlo. Pod ní se nachází ještě jedna vrstva, obsahující tmavý pigment, který slouží zejména k pohlcení světla, které na sítnici dopadá a tím zabraňuje odrazům uvnitř oční bulvy. Hlavními složkami sítnice, na kterých, kromě jiného, závisí naše schopnost rozeznávat barvy jsou tyčinky a čípky. Jde o světlocitlivé buňky rozprostřené po povrchu sítnice v husté síti. Tyčinky a čípky obsahují světlocitlivý pigment, který se při dopadu světla rozloží a uvolní energii, která se pak ve formě náboje přenáší do mozku pomocí nervů. Funkce tyčinek je zaměřena zejména k určování množství světla, které do oka vchází, takže informace, kterou mozek zpracovává je, jak moc je vstupní vjem světlý či tmavý. Vychází to z toho, že pigment obsažený v tyčinkách – rhodopsin – je citlivý rovnoměrně na většinu viditelného spektra. Čípky se dělí na tři skupiny podle jejich chemického složení, kterým se v této práci nebudu zabývat. Důležité ale je, jak je toto složení rozděluje podle funkce. Každá z těchto tří skupin je totiž citlivá na konkrétní část spektra světla. Konkrétně intervaly 400nm – 500nm, 500nm – 600nm a 600nm – 700nm.



Obr. 2-2: Spektrální citlivost čípků

Na grafu (obr. 2-2) lze vidět relativní citlivost tří skupin čípků. Lze vyčíst, že skupiny čípků jsou citlivé na modrou, zelenou a červenou část spektra. Čípky tedy fungují jako kmitočtové filtry, které izolují určitou část spektra a mozek pak interpretuje tyto informace a vytváří vjem barvy. Tento vjem je tvořen kombinací tří kmitočtových oblastí. Tyto oblasti vnímáme jako barvy, které se nazývají barvami základními, tj. barvy, které nelze rozložit na součet jiných barev [20].

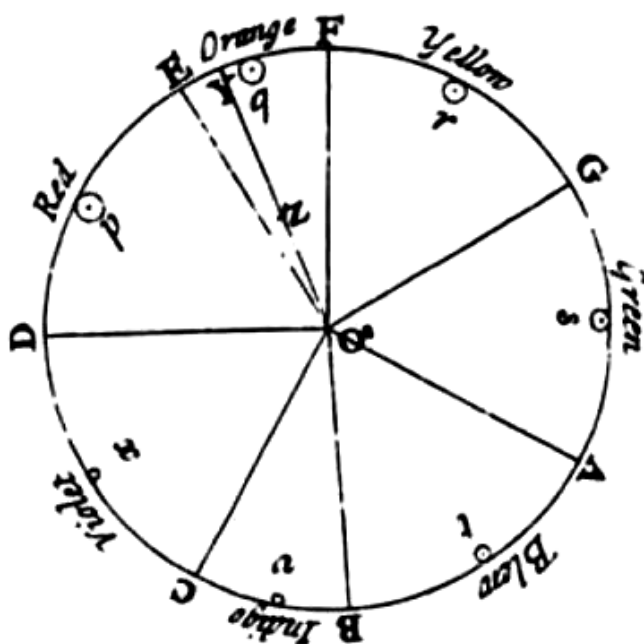
2.4. Barevný kruh

Barevným kruhem myslíme uspořádání barev a odstínů do formy kruhu. Obvykle se využívá pro zobrazení vztahů mezi barvami (rozdělení na tzv. primární,

sekundární, terciální barvy). Existuje více různých barevných kruhů, vytvořených na základě různých vztahů.

2.4.1. Isaac Newton

Isaac Newton ve své práci o optice⁶ vytvořil barevný kruh, kde přirovnává jednotlivé barvy tónům hudební stupnice. Rozdělení vychází z jeho poznatků o složení světla pomocí skleněného hranolu. A rozděluje toto barevné spektrum na sedm barev. Nicméně přidělení tónů k barvám úplně neodpovídá skutečnosti (popsáno dále).



Obr. 2-3: Barevný kruh podle Isaaca Newtona

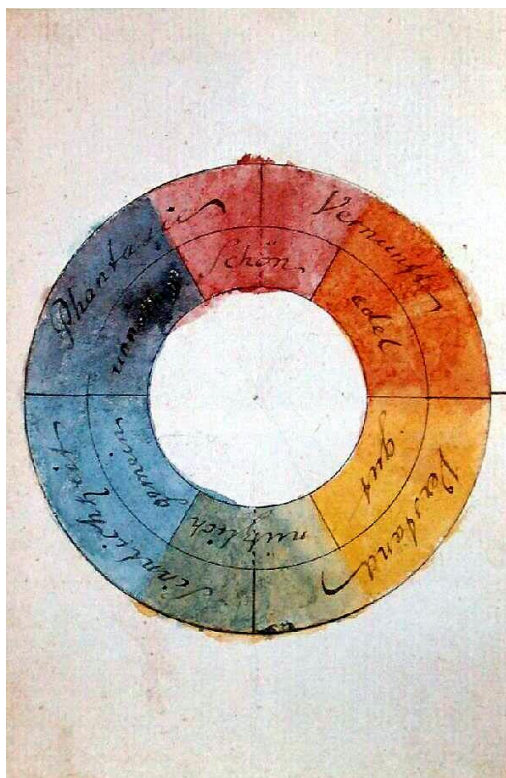
2.4.2. Johann Wolfgang von Goethe

Znám mimo jiné i pro básnickou a prozaickou tvorbu, J.W. Goethe se věnoval i filozofii. V práci *Teorie barev*⁷ se zabýval rozkladem a vytvářením barev. Poukázal na chyby v Newtonově pokusu s hranolem. Zjistil totiž, že složení spektra, které je hranolem tvořeno se mění v závislosti na vzdálenosti od hranolu. Došel k přesvědčení, že existují pouze dvě základní barvy, a to žlutá a modrá. Jeho poznatky a interpretace nejsou dnes považovány za správné, nicméně jeho rozřazení barev do symetrického kruhu o šesti barvách přineslo důležité poznatky (viz. Obr. 2-4), spíše

⁶ Isaac Newton, *Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light. Also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures*

⁷ GOETHE, Johann Wolfgang von. *Zur Farbenlehre*. Tübingen : J.G. Cotta'schen Buchhandlung, 1810.

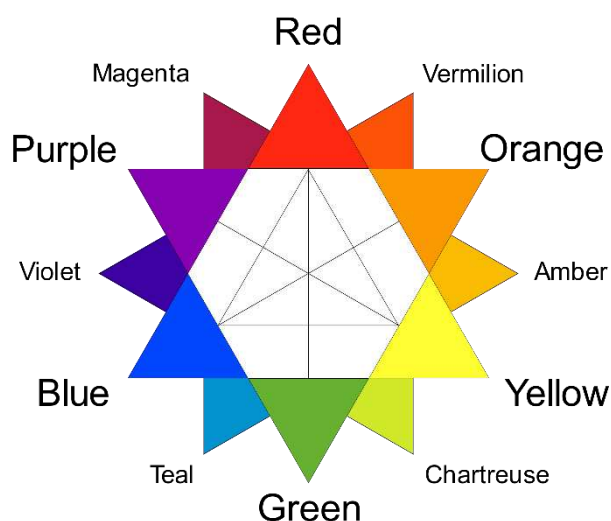
než pro poznání podstaty barev jako takových, pro poznání našeho vnímání barev. Z Goetheho barevného kruhu vychází umělci i dnes při práci s barvami a hledání tzv. komplementárních barev [4].



Obr. 2-4: Goetheho symetrický barevný kruh

2.4.3. Model RYB

Barevný model RYB (název odvozen od základních barev modelu: červené, žluté, modré) je model, který, spíše než z fyziologického původu barev, vychází z psychologických účinků barev. Konkrétně lze v tomto modelu pozorovat vztahy barev vůči sobě. Většinou je tento model znázorněn jako kruh odstínů. Například barvy ležící na protilehlých bodech kruhu jsou nazývány barvami komplementárními, jelikož jsou vzájemně nejkontrastnější.



Obr. 2-5: Znáznornění modelu RYB do formy hvězdice

Na obrázku (Obr. 2-5) můžeme tento jev pozorovat. Například barvy červená a zelená nebo modrá a oranžová. Tento model je díky informativním vlastnostem využíván zejména v malbě, kde slouží jako pomůcka při výběru barevných kombinací [5].

2.5. Popis a identifikace barev

2.5.1. Spektrální barvy

Vjem barvy je dán vlnovou délkou (případně kmitočtem) záření přicházejícího do oka. Barvy jsou tedy tvořeny konkrétní skladbou spektra tohoto záření. Většina barev se skládá ze složitějšího spektra frekvencí, nicméně existuje výjimka v případě tzv. spektrálních barev kdy jde o spektrum naopak velmi jednoduché.

Spektrální barvy jsou barvy tvořeny zářením s jednou konkrétní frekvencí nebo velmi úzkým spektrem.

2.5.2. Barevné modely

Barevným modelem se označují souřadné systémy zachycující odstíny barev, které člověk rozeznává. Kvůli různým technickým nebo uživatelským požadavkům existuje více různých barevných prostorů, které se liší buď fundamentálními vlastnostmi souřadného systému nebo jen velikostí a definicí jednotlivých os. Množina barev, kterou tento model zobrazuje se pak nazývá barevným prostorem.

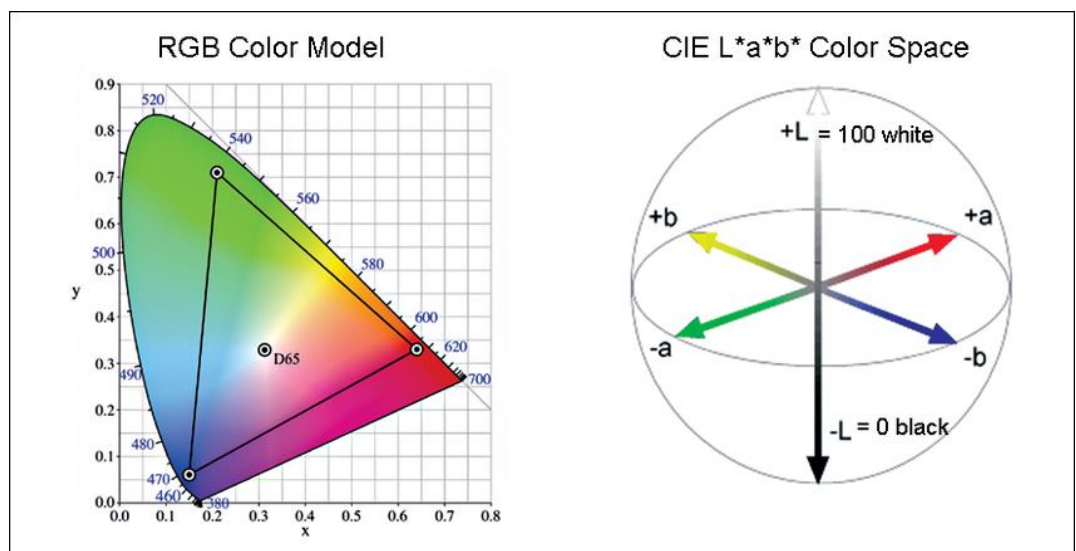
2.5.3. Gamut

V kontextu reprodukce barev se jako gamut označuje sada barev, kterou je zařízení schopno s velkou přesností reprodukovat. Jedná se o podmnožinu barev rozsáhlejšího barevného prostoru.

2.5.4. CIELAB

Na základě kolorimetrického měření lidského zraku vytvořila v roce 1931 Commission Internationale De l'Eclairage (Mezinárodní komise pro osvětlení – CIE) souřadný systém CIEXYZ, který sloužil k popsání barev, které průměrně člověk vnímá. Na základě tohoto systému pak byl v roce 1976 vytvořen systém CIELAB (viz Obr. 2-6). Jde o barevný prostor, který obsahuje všechny barvy, které člověk obvykle vnímá.

Pro popis barvy tento systém používá tři osy: L, která popisuje veličinu luminance, a kolmé osy a a b; ty popisují barevný odstín bodu ve směru červeno zeleném (a) a modro žlutém (b) [6].



Obr. 2-6: Grafické znázornění CIELAB barevného prostoru v ploše s vyznačeným gamutem RGB prostoru (vlevo) a v trojrozměrném prostoru (vpravo).

Hodnota veličiny luminance nabývá hodnot 0 % - 100 % a vyjadřuje světlost barevného bodu, kdy nejnižší hodnota vyjadřuje čistě černou barvu a nejvyšší čistě bílou. Hodnoty veličin a a b nabývají hodnot kolem nuly a nejvyšší hodnota není definovaná, nicméně je v tomto souřadném systému definován prostor, ve kterém se nacházejí barvy, které člověk rozeznává.

Na obrázku (Obr. 2-6) lze také vidět ohraničení CIELAB prostoru. A to čarou tvaru podkovy shora, na které leží souřadnice barevných bodů spektrálních barev, a linií fialových odstínů, která propojuje barevné body o nejnižší a nejvyšší vlnové délce.

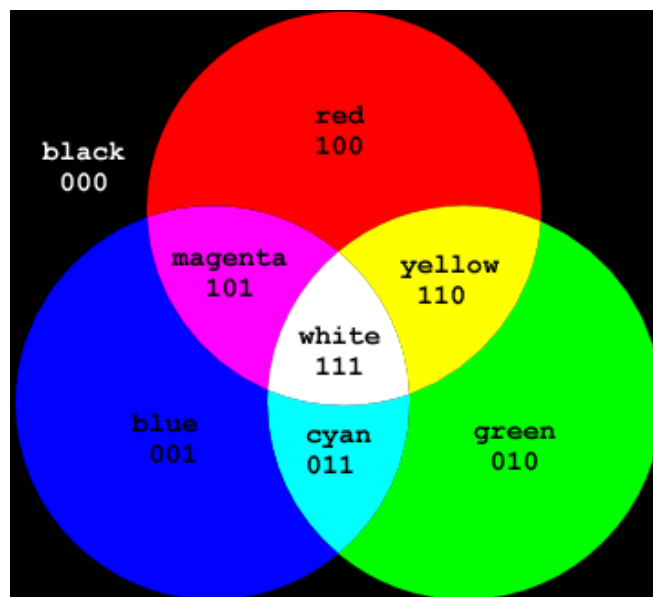
Výhoda tohoto systému je ta, že není závislý na zobrazovacím zařízení, takže je používán pro převod mezi barevnými systémy. Zejména pro různé RGB systémy, které jsou z tohoto barevného prostoru odvozeny.

2.5.5. RGB

Jak bylo popsáno výše, barvy jsou tvořeny kombinací základních barev a na tomto principu stojí i široce používaný systém RGB a jeho mnohé varianty.

Jedná se o systém aditivní, tj. barvy jsou tvořeny sčítáním základních barev. Tyto základní barvy jsou červená, zelená a modrá (v angličtině red, green, blue – odtud název systému: RGB).

Tento aditivní systém spočívá ve sčítání světelných zdrojů. Jak je vidět na obrázku (Obr. 2-7), zjednodušeně se dá říct, že se barevné světlo přičítá k černému pozadí.



Obr. 2-7: Znárodnění principu aditivního barevného modelu RGB (barvy červená, zelená a modrá nabývají hodnot od nuly do jedné).

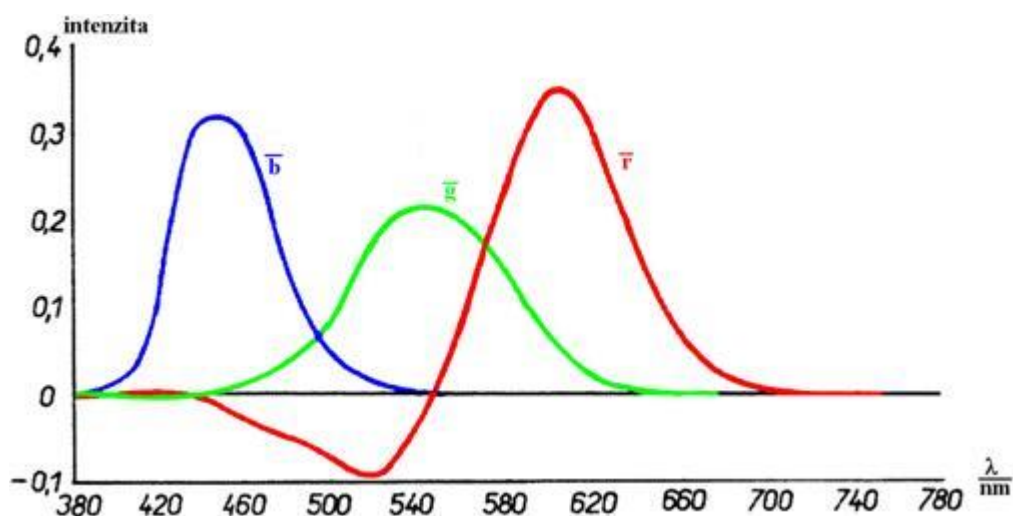
Vlnové délky základních barev jsou Mezinárodní komisí pro osvětlení (CIE) definovány takto:

Červená (Red) – 780,0 nm,

Zelená (Green) – 546,1 nm,

Modrá (Blue) – 435,8 nm [7].

Mísení těchto základních barev je uskutečňováno za pomoci váhového součtu, kdy hodnoty jednotlivých váhových činitelů (tzv. trichromatických spektrálních činitelů) vychází z kolorimetrických měření (viz. Obr. 2-8) a jsou určeny tak, aby bylo možné získat příslušné barvy ve viditelném spektru [7].



Obr. 2-8: Průběhy trichromatických činitelů

Na obrázku 2-8 je patrné, že ne všechny barvy lze vytvořit mísením základních barev, jelikož znázorněné koeficienty nabývají i záporných hodnot (zejména u červené barvy) [7]. To způsobuje problém, že barvy v intervalu vlnových délek přibližně od 436 nm do 546 nm nelze v modelu RGB zobrazit. Jedná se zejména o určité odstíny zelené a modré [7].

Za použití těchto koeficientů platí, že pro kladné koeficienty se výsledná barva c rovná

$$c = rR + gG + bB \quad (2)$$

V případě koeficientů záporných je potřeba připočíst k barvě červenou složku

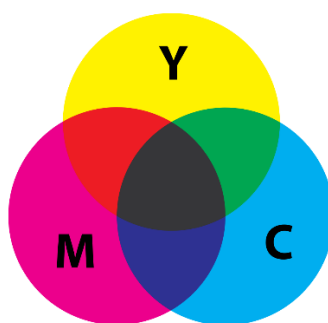
$$c + rR = gG + bB \quad (3)$$

Z těchto vztahů vyplývá, že při smíchání dvou barev, je výsledná barva rovna součtu jednotlivých složek [7].

RGB barevný prostor není jen jeden. Pro konkrétní zobrazovací zařízení a aplikace bylo vytvořeno několik různých RGB prostorů, které se liší zejména rozsahem a definicí základních barev. Patří mezi ně sRGB, Adobe RGB nebo velmi obsáhlý Wide gamut RGB.

2.5.6. CMY

Dalším široce používaným modelem je model CMY (nebo známá varianta CMYK), kdy písmena CMY odkazují na základní barvy modelu: modrozelená (cyan), purpurová (magenta) a žlutá (yellow). U modelu CMYK je přidána navíc barva černá (black/key). Na rozdíl od modelu RGB je tento model založen na subtraktivní syntéze barev, tj. barvy jsou odečítány od bílého pozadí/světla [7]. Barevný pigment nebo jiný nositel barvy blokuje určité části bílého světla a tím se vytváří vjem barvy. Je používán zejména pro tisk, barevné filtry a podobné, zkratka pro zabarvení světla nebo pro vytvoření vjemu barvy bez vlastního zdroje světla. Na rozdíl od RGB, při kombinaci všech tří základních barev o maximální hodnotě je vytvořena barva černá (viz. Obr. 2-9).



Obr. 2-9: Subtraktivní model CMY

V tiskárnách se velmi často používá zmíněná varianta CMYK, která obsahuje i černou barvu z důvodu úspory barevných inkoustů [3].

2.5.7. HSV/HSL

Barevné modely často využívané při sonifikaci barev jsou HSV a HSL. Tvorba konkrétního odstínu v tomto barevném modelu nevychází z kombinace primárních barev. Tři složky modelu HSV jsou barevný tón (hue), sytost (saturation) a hodnota jasu (value). Model HSL má místo složky value, složku lightness (světlost). Základní geometrická reprezentace tohoto modelu je šestiboký jehlan, kde výšce odpovídá hodnota světlosti (0–1), vzdálenosti od osy jehlanu odpovídá sytosti (nabývá hodnot 0 – 1 nebo 0% – 100%), a barevný tón je dán úhlem (0° – 360°) [7]. Modely HSV a HSL jsou navrženy pro jednodušší práci s barevnými odstíny. Primární barvy aditivního i subtraktivního modelu (červená, modrá, zelená, modrozelená, purpurová a žlutá) jsou v modelu obsaženy – jsou rovnoměrně rozmístěny na vrcholech šestistěny, takže veškeré barevné tóny je možné najít na obvodu šestistěny (nebo válce, jak je obvykle tento model zobrazován) a dále aplikovat míru sytosti a bílou, či černou složku.

Pro sonifikaci je tento model využíván zejména proto, že barevný tón je definován pouze jednou hodnotou a je tedy jednodušší přidělovat zvukové vlastnosti jednotlivým odstínům.

2.6. Vnímání zvuku

Profesor Václav Syrový popsal zvuk jako: *sluchem vnímaný kmitavý pohyb hmoty, kterou nejčastěji představují částice vzduchu nacházející se v bezprostřední blízkosti ucha.*^[8] Jde tedy o mechanické vlnění, které se šíří hmotou a které poté náš mozek interpretuje jako vjem zvuku. Pro hledání paralel mezi smyslem sluchu a zraku je nutné znát alespoň základní fyzikální a fyziologické principy obou.

2.6.1. Sluchové ústrojí

Sluchové ústrojí lidského těla slouží k převodu mechanického vlnění vně těla na elektrochemický signál, který pak mozek může interpretovat jako zvukový vjem. Řetěz orgánů, které k tomuto slouží se nazývá zvuková dráha [8].

Z vnějšího světa je do těla kmitání přeneseno pomocí vnějšího ucha, které se skládá z boltece a zvukovodu. Boltec má zejména význam pro určování směru zvuku. Tento účinek je znatelný hlavně při frekvencích nad 500 Hz. K tomu napomáhá akustický stín hlavy i zbytku těla.

Zvukovod je pak trubice uvnitř hlavy, která je zakončena *bubínkem*, což je blána uzavírající zvukovod, která přenáší mechanické vlnění vzduchu dál do středního ucha. Akusticky se jeho chování dá přirovnat k trubici na jedné straně uzavřené. Jeho rezonanční charakteristika je relativně plochá, i když frekvence kolem 3kHz až 4kHz jsou zvýrazněné, což je velmi důležité zejména pro porozumění lidské řeči [8].

Střední ucho se pak nachází za *bubínkem*, ten je rozechvíván vlněním vzduchu a přenáší toto vlnění dále na soustavu drobných kůstek: *kladívko*, *kovadlinku* a *třmínek*. *Kladívko* je k *bubínku* přirostlé a napojené na *kovadlinku*, který je pak dále napojený na *třmínek*. *Třmínek* je pak přirostlý na *oválné okénko*. Střední ucho má funkci zejména převodní. Převádí kmitání bubínku dále na kmitání kapaliny uvnitř vnitřního ucha. Další funkcí středního ucha je pak funkce ochranná. Třmínkový a bubínkový sval ovlivňují pohyb těchto dvou orgánů a při silných podnětech se stahují a tím chrání sluch před poškozením silnými podněty.

Vnitřní ucho pak má funkci řízení rovnováhy a dalšího zpracování zvuku. Zvuk je převáděn na nervový signál v orgánu, zvaném *kochlea*, což je orgán ve tvaru hlemýždě se zužující se dutinou plnou kapaliny, která přenáší vibrace blány oválného okénka. Toto vlnění je pak uvnitř *kochley* převáděno elektrochemickou reakcí na nervový vzruch, který je pak přenesen do mozku, kde se tvoří vjem zvuku.

2.7. Ladění

Jedním z pilířů hudebního vnímání je samozřejmě rozeznávání výšky tónů. Ta přímo souvisí s hodnotou veličiny frekvence f , tj. při vyšší frekvenci zvuku se vytváří dojem vyššího tónu než u zvuku o frekvenci nižší. Vjem výšky tónu ovšem lidé nevnímají lineárně, ale exponenciálně (důležitý je poměr mezi vnímanými frekvencemi). Například když slyšíme dva tóny po sobě, z nichž jeden má frekvenci dvakrát vyšší, vnímáme tento interval jako oktávu [9]. Proto i ladící systémy neppracují s rozdílem frekvencí, ale s jejich relativním poměrem (podílem).

2.7.1. Harmonická řada

Dalším důležitým pojmem je harmonická řada, což je přirozené uspořádání frekvencí. Harmonická řada se skládá z frekvencí, které jsou celočíselnými násobky frekvence základní (tzv. *fundamentu* nebo *první harmonické*). Tento jev se dá pozorovat například u dechových nástrojů (např. fujary), které při silnějším zahrání tónu takříkajíc „přeskočí“ na vyšší tón, který je ve zpravidla jedním z dalších v harmonické řadě. Tento jev je pro hudbu velmi důležitý, protože z něj vychází naše citění melodické i harmonické [8].

2.7.2. Druhy ladění

Ladění se dá obecně označit jako diskrétní uspořádání frekvencí pro účel hraní na hudební nástroj. Existuje více druhů ladění, které vycházejí z různých principů, případně byly vytvořeny za konkrétním účelem.

Pythagorejské ladění

Jedním z nejstarších ladících soustav je tzv. Pythagorejské ladění. Pythagorejské ladění je úzce spjato se strunnými nástroji. Konkrétně pak s nástrojem zvaným monochord. Jde o strunný nástroj s jednou strunou, který kromě jiného sloužil i k experimentům s laděním a harmonickou řadou. Základním principem Pythagorejského ladění je skládání intervalu kvinty nad a pod základním tónem. Interval kvinty odpovídá poměru frekvencí 3:2 nebo když tón o kvintu snížíme, pak 2:3. V tomto ladění má oktáva velikost 1200 centů⁸. Čistě v tomto ladění zní zejména oktávy, kvinty a jejich inverze a ekvivalenty (kvarty, undecimy a duodecimy) [9]. Nevýhodou se pak stávají menší intervaly. V tomto ladění je totiž interval velké sekundy a zvětšené primy (tj. tóny enharmonicky ekvivalentní) interval odlišný a liší se o přibližně 24 centů. Tento rozdíl se nazývá Pythagorejským koma. Toto ladění bylo založeno zejména na melodické intonaci. Jak v antické hudbě, tak v pozdější křesťanské liturgii nebyl kladen důraz na harmonii. Pro potřeby hraní souzvuků a také tvorby akordů byly vytvořeny ladící systémy až mnohem později

⁸ Cent je jednotka intonace vycházející z Ellisova dělení [4].

a dnes se používá tzv. temperované ladění [8]. Kromě přirozeného a rovnoměrně temperovaného dvanáctitónového se ještě používalo ladění středotónové

Rovnoměrně temperované ladění

Dvanáctitónové rovnoměrně temperované ladění (12-TET) je ladící systém, kde rozdíl mezi půltóny je vždy 100 centů. Jde o systém, který není úplně ideálním ladícím systémem, protože neodpovídá tomu, jak člověk vnímá tóny. Přirozeně člověk v drobných roztaženích intervalů cítí určité napětí, které je pro hudební přednes a poslech důležité [8]. Zároveň také, na rozdíl od přirozeného ladění (čistého nebo zmíněné pythagorejského), není založeno na intervalech vyjádřených malými celými čísly (kvinta 3:2, kvarta 4:3 apod.), což některé intervaly (zejména septimu) činí méně libozvučnými. To je dáno tím, že v případě jednoduchých celočíselných poměrů člověk nevnímá zázněje, ale u složitějších poměrů menších intervalů (malé, velké septimy, malé, velké sekundy) člověk tyto zázněje, tvořené malým rozdílem současně znějících frekvencí, vnímá jako „rozladěné.“

Jde ale na druhou stranu o jasně daný ladící systém, který slouží jako základ moderního ladění a s drobnými odchylkami při reálném ladění v konkrétních aplikacích se počítá pro dosažení větší osobitosti nástroje.

Zpět k principu tohoto ladění. Jelikož je oktáva dělená na 1200 centů a jeden půltón má velikost 100 centů, dá se koeficient pro rozdíl jednoho centu určit z rovnice [8]

$$\sqrt[1200]{2} = 1.00057779 \quad (4)$$

Na základě tohoto principu byla vytvořena i rovnoměrně temperovaná tzv. mikrotonálních ladění, což jsou ladící systémy, které pracují s intervaly menšími než jeden půltón.

2.8. Stupnice

Stupnice je množina tónů seřazena podle určitého pravidla. V moderní západní hudbě jsou využívány osmitónové stupnice dur nebo moll, které vychází z dvanáctitónového ladění. Jedná se o tzv. diatonické stupnice, tj. jednotlivé tóny stupnice jsou od sebe vzdáleny celý tón nebo půltón. Příkladem durové stupnice může být stupnice C dur, která se skládá z tónů: *c d e f g a h*, kdy mezi tóny *e a f*, a *h a c* je vzdálenost jednoho půltónu, zatímco mezi ostatními je vzdálenost celého tónu (dvou půltónů). Obecně se dá říci, že u durové stupnice je mezi třetím a čtvrtým, a sedmým a osmým stupněm vzdálenost půltónu. Základní stupnice mollové pak jsou odvozeny od stupnic durových k nim paralelních (např. ke stupnici C dur je paralelní stupnice a moll). Na příkladu stupnice a moll *a h c d e f g* je vidět, že tyto paralelní stupnice obsahují stejné tóny, ale pořadí, ve kterém jsou seřazeny je jiné (začíná od jiného tónu), což je důležité zejména pro kompozici a vytváření a rozvádění napětí v melodii či harmonii.

Moderní tzv. dur/mollový systém je odvozen od staršího systému *církevních modů*, což byl systém stupnic používaný od středověku v křesťanské liturgii, a který vycházel ze starších stupnic řeckých, které vycházely z pythagorejského kvintového ladění. Tyto *mody* byly používány zejména pro vedení melodie, využívání akordů se v hudbě objevilo až mnohem později [9]. Názvy jednotlivých modů označují, spíše než konkrétní sadu tónů, sadu intervalů, ze kterých je stupnice tvořena od libovolné primy (prvního tónu stupnice). Tyto mody jsou dnes stále využívány, ale spíše jako varianty vedení melodie v rámci dur/mollového systému, a to zejména pro jejich výraznou osobitost.

V evropské hudbě se vyskytují i další druhy stupnic, které byly vytvořeny na základě experimentů s hudební tonalitou nebo byly převzaty z neevropských hudebních kultur. Patří mezi ně stupnice pentatonické, které se vyvinuly nezávisle v různých kulturách a hojně jsou využívány i v západní hudbě. Jde o stupnice, které v oktávě obsahují pět tónů (na rozdíl od církevních modů, které obsahují na oktávu tónů sedm). Pentatonické stupnice jsou základním kamenem Blues, Jazzu, Country a tradiční hudby mnoha národů. V základu se dělí na hemitonické a anhemitonické podle toho, zda obsahují půltón či nikoli.

V jazzu, ale i v umělé západní hudbě (zejména na začátku 20. století), často používané celotónové stupnice jsou tvořené pouze intervaly velké sekundy. Důvodem k jejich používání je hlavně vlastnost neurčitosti a nejasné tonality. Podobnou vlastnost má i dvanáctitónová stupnice chromatická, kde nejmenším intervalem mezi dvěma tóny je malá sekunda.

Na závěr je nutné zmínit, že v neevropských hudebních tradicích existuje velké množství různých stupnic různých druhů. Například v tradici národů blízkého východu je využíván systém stupnic Maqam⁹.

2.9. Propojení smyslů

Snaha o hledání paralel mezi vjemy a smysly není nic nového. Už samotný náš mozek hledá ve smysly vnímatelné realitě pravidelné vzorce nebo si vnímanou realitu upravuje tak, aby se podobala tomu, co již zná.

Dobrým příkladem je jev zvaný pareidolie. Jedná se o jev, kdy je nezřetelný nebo úplně náhodný podnět v mozku přetvořen na smysluplný obraz. Snad všichni se někdy dívali na mraky a hledali v nich obrysy zvířat a věcí. Nebo známá „tvář z Marsu“ (viz. Obr. 2-10), která ukazuje, jak přirozené je pro člověka vidět lidskou tvář i tam, kde není [10].

⁹ Maqam jsou sedmitónové stupnice vycházející z 24 tónového ladění využívané v tradiční arabské hudbě [28].



Obr. 2-10: Slavná "tvář z Marsu". Snímek sondy Viking 1 z roku 1976(vpravo dole) a snímek sondy Mars Global Surveyor z roku 2001.

Existuje samozřejmě i pareidolie akustická, kdy v nepravidelném ruchu slyšíme lidské hlasy nebo ve zpěvu ptáků slyšíme slova; od malička se děti učí, že křepelka volá: „pět peněz.“ Stejně jako se „tvář z Marsu“ stala palivem pro konspirační teorie, tak ani mnoho populárních hudebníků (Beatles, Led Zeppelin a další) nebylo ušetřeno teorií o jejich spolku se silami pekelnými založenými na základě falešného vjemu lidí, kteří si jejich skladby pustili pozpátku a slyšeli vzdáleně srozumitelná slova.

Lidský mozek má rád vzorce a rád světu rozumí, proto si vytváří spojitosti i tam, kde žádné být nemusí, což nás vede k dalšímu jevu, který na rozdíl od pareidolie spojitosti vytváří i mezi smysly samotnými: Synestézie.

2.10. Synestézie

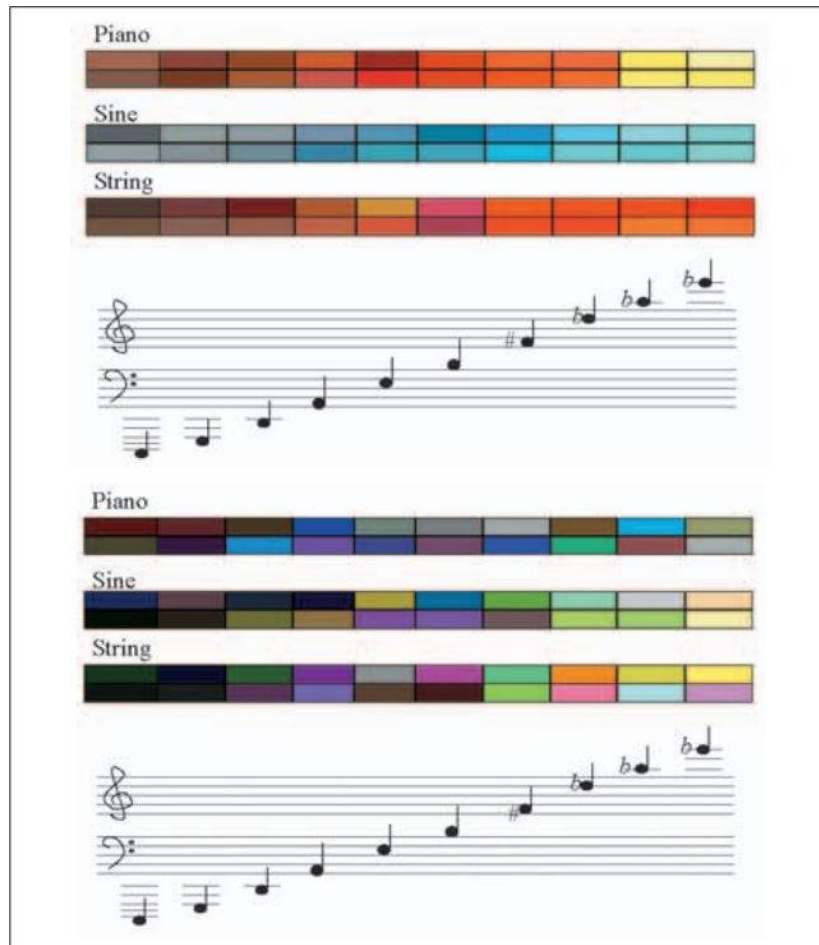
Synestézie je jev, projevující se propojením smyslových vjemů. Přesněji řečeno: při určitém sensorickém vjemu se automaticky vytvoří jiný sensorický vjem (např. člověk samovolně přiřazuje číslům nebo písmenům barvy nebo pozici v prostoru). Důležité je, že u synestetiků je tento vjem pravidelný a stálý. Odborná veřejnost se tomuto jevu věnuje jen relativně krátce, a proto o tomto jevu koluje mnoho mýtů a zejména mnohá média zaměřená na alternativní medicínu a ezoteriku popisují tento jev jako jakousi superschopnost, kterou oplývají léčitelé a lidé na vyšší rovině vnímání [11]. Nicméně odborná veřejnost tento jev popisuje a stále hledá jasně prokazatelnou teorii o tom, co tento jev způsobuje [12]. Tento jev se rozděluje do několika kategorií zejména podle smyslů či prožitků, které jsou propojeny. Je ale

důležité podotknout, že i mezi synestéty, kteří spadají do stejné kategorie bývá prožitok odlišný.

Synestézie se může projevovat například jako propojení již zmíněných zrakových vjemů (symbol s barvou nebo pozicí v prostoru) nebo jako propojení více smyslů, kdy například forma synestézie: chromastézie je charakterizována propojením sluchového vjemu a pocitu vjemu barvy. Existují synestetici, kteří prožívají hmatově-sluchovou synestézii, nebo si personifikují (přirazují lidské vlastnosti) různým vjemům (např. veselá trojka). Dlouhou dobu se odborná veřejnost domnívala, že tento jev je psychopatogenní nebo se jedná o vzpomínky z dětství, nicméně existují výpovědi, které mluví o dědičnosti tohoto fenoménu, a i další fakta nasvědčují tomu, že nejde ani o vzpomínky, ani projev mentálního onemocnění, a dokonce se projevuje i dědičnost tohoto jevu [12].

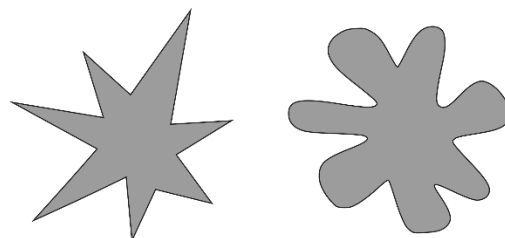
Tento jev zmiňují, protože se jedná o způsob, jakým se lidský mozek snaží vytvářet spojitost mezi vjemy. Ač se nejedná o jev, který by byl obvyklý (odhaduje se, že přibližně jeden ze 240 lidí je synestetik), je zajímavé jej zkoumat a hledat paralely i s jinými jevy, které jsou přirozené i pro nesynestetiky: například spojitost zvuků a tvarů nebo zvuků a barev.

V prvním případě odkazují na studii Londýnské univerzity, která zkoumala rozdíl mezi mezismyslovým vnímáním synestetiků a lidí bez barevně-zvukové synestézie. Studie objevila určitou závislost mezi výškou tónu a barvou, kterou v obou skupinách tón evokoval (viz. Obr. 2-11). Obecně lidé napříč skupinami vnímali vyšší tóny jako světlejší, zatímco nižší tóny tmavší [13].



Obr. 2-11: Příklad rozdílu vztahů vjemů tónů a barev mezi synestetiky(nahoře) a kontrolní skupinou(dole)[13]

Druhým příkladem: vztah mezi tvarem a zvukem je studie psychologa Wolfganga Kőhlera z roku 1929 [14], ve které nechal účastníky studie přiřadit ke dvěma tvarům (viz. Obr. 2-14) název. Na výběr bylo ze dvou možností: *baluba* a *takete*.



Obr. 2-12: Obrázky použité ve studii Wolfganga Kőhlera z roku 1929 i v zopakovaném výzkumu z roku 2001[14]

Podle Kőhlera většina účastníků přiřadila slovo *baluba* k tvaru kulatějšímu a slovo *takete* k tvaru špičatějšímu. Výzkum byl zopakován v roce 2001 na skupinách lidí

ve Spojených státech amerických a v Indii s podobným výsledkem. Což dokazuje, že určitým způsobem propojují sensorické prožitky všichni lidé a jedná se tedy o přirozenou funkci našeho mozku. Nicméně u synestetiků jde o mnohem silnější a individuálnější prožitek než u normální populace.

Jak již bylo ale řečeno, synestézie vytváří velmi individuální prožitek a u většiny případů je velmi nepravděpodobné, že by dva synestetici měli stoprocentně totožný zážitek. Nicméně i přesto je zkoumání synestézie a podobných jevů důležité pro porozumění podstatě lidských kognitivních schopností, vzniku řeči nebo původu estetického vnímání.

2.11. Vizuálně-zvuková multimedialita v umění

To, že svět vnímáme všemi smysly bylo lidem jasné vždy, proto se v historii objevuje mnoho příkladů uměleckého projevu, který stimuluje více než jeden smysl. Například divadlo je skvělým příkladem, kdy je vizuální složka stejně tak důležitou součástí představení jako ta slyšitelná. Hudba spojená s výraznými kostýmy nebo pohyby je pro mnoho lidí silnějším zážitkem než jen hudební složka samotná. Tento způsob stimulace více smyslů simultánně je velmi důležitý i pro počítačové hry, které prohlubují interaktivní prožitek hráče nejen zpětnou vazbou vizuální, ale i zvukovou ve formě zvukových efektů a interaktivní hudby, ale i hmatovou ve formě vibrujícího ovladače. Zejména ve dvacátém století se objevovala řada umělců, kteří se snažili pojmout vztahy mezi smysly ať už experimentálně nebo formou uměleckého zpracování svých prožitků (synestetických či nikoli).

2.11.1. Výtvarné umění

Propojování hudby a obrazu v malířství bylo na přelomu devatenáctého a dvacátého století jednou z oblastí, které se někteří malíři té doby věnovali. Toto období bylo typické experimentálním uměním, narušováním konvencí médií a myšlenkovou i duchovní revolucí.

Jedním umělců, kteří se snažili o zachycení hudby na plátno byl Vasilij Vasilijevič Kandinskij (1866–1944). Malíř ruského původu počátku 20. století, který patřil mezi průkopníky abstraktní malby. Část jeho prací je věnovaná zpracování hudebního vjemu na plátno. Názvy prací: *Improvizace* a *Kompozice* vychází z Kandinského snahy vytvořit malbu, která byla inspirovaná hudebními postupy (zejména s rytmem). Kandinskij vnímal hudbu jako velice abstraktní, a proto se snažil z této abstrakce brát inspiraci.

František Kupka (1871–1957) byl malířem českého původu a také známým průkopníkem abstraktní malby. Z názvů některých jeho maleb je jasné, že se nechával

inspirovat i hudbou a hudebními formami, zejména fugou¹⁰. Příkladem jsou jeho obrazy: *Modrá fuga* a série obrazů *Newtonovy disky*, z níž například obraz *Studie ve dvou barvách*. Inspirován touto hudební formou pracoval s barvami a tvary v rámci vizuálního média malby. Odkazuje též na Isaaca Newtona, a to zejména na jeho teorii barev a barevného kruhu.

U těchto malířů šlo většinou o experimenty s médiem malby a jejich individuální interpretaci hudebních forem a technik do vizuální podoby. Ačkoli Kandinskij se snažil svými malbami ilustrovat hudební skladby (zejména Arnolda Schoenberga), nešlo o postup objektivní, ale, jak již bylo řečeno, velmi individuální.

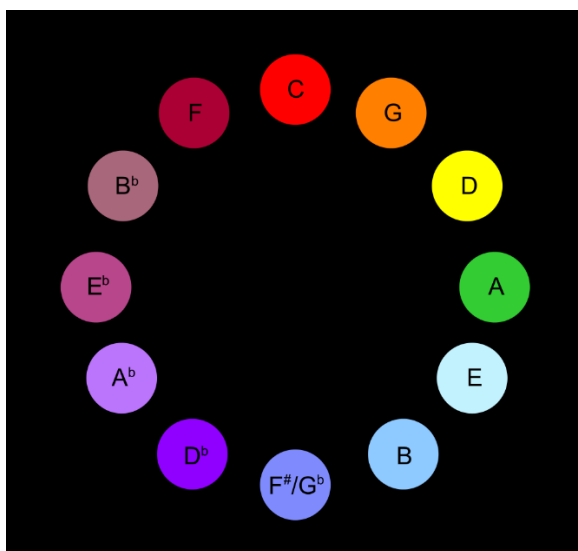
2.11.2. Hudba

I hudební skladatelé hledali způsob, jak propojit hudbu a barvu, a to podle určitých pravidel, která závisí buď na individuálních preferencích skladatele nebo konkrétních fyzikálních zákonech. A také, stejně jako ve výtvarném umění, i v případě hudby docházelo k mnoha experimentům v období přelomu 19. a 20. století.

Velmi činným byl v tomto ohledu například skladatel Alexandr Nikolajevič Skrjabin. Kromě jiných konvenčních skladeb se zabýval i experimentálnějšími typy produkce. V mnoha skladbách se držel synestetického systému, který sám vytvořil inspirován filozofií Theosofismu¹¹ a Newtonovým barevným kruhem. Na obrázku (Obr. 2-13) je vidět, že jde jen o kombinaci kvintového kruhu a Newtonova pojetí barevného spektra. Nicméně nechal podle tohoto systému postavit nástroj zvaný *Clavier à lumières* (světelný klavír). Využil jej ve skladbě pro symfonický orchestr *Prométeus: báseň ohně op.60*. *Clavier à lumières* byl nástroj založený na návrhu britského malíře Alexandra Wallace Remingtona, který vytvořil nástroj *Barevné varhany*. Šlo o nástroj, který místo zvuků promítal na plátno barevné světlo a záměrem bylo doprovázet jím hudbu. *Clavier à lumières* byl sestaven tak, aby promítal barvy podle Skrjabinova synestetického systému (obr. 2-13) [15].

¹⁰ Fuga je hudební forma jejíž charakteristikou je hudební téma, které je zopakováno všemi hlasy a dále rozvíjeno podle pravidel kontrapunktu [16]

¹¹ Filozofický okultní směr založený v USA ruskou imigrantkou Helenou Blavatskou. Šlo o součást populární vlny alternativních duchovních směrů přelomu 19. a 20. století. Toto učení je založeno na Východních náboženstvích (Hinduismus, Buddhismus), ale také alternativních směrech evropské filozofie. Nabízí alternativní výklad historie, kdy lidstvo prožívá cyklická období rozkvětu a zkázy a z posledního Atlantidy podle theosofismu pochází dnešní lidské rasy. Theosofismus zastával množství rasistických myšlenek, kterých se chytlo i množství příslušníků nacistického hnutí v Evropě.



Obr. 2-13: Znárodnění Skriabinova synestetického systému.

2.12. Sonifikace

Sonifikace je obecné označení pro postupy převodu nezvukové informace na neverbální zvukovou informaci. Podobně jako vizualizace slouží zejména k usnadnění komunikace, podporu paměti nebo jako pomůcka při výuce nebo postižení. Konkrétní podoba sonifikace se samozřejmě odvíjí od informace, která je sonifikována a také od účelu sonifikace. V případě sonifikace obrazu se způsob propojení odvíjí od toho, zda je obraz sonifikován pro účely uměleckého ztvárnění nebo jako pomůcka pro orientaci pro nevidomé.

2.12.1. vOICe

Peter Meijer v roce 1992 navrhnul zařízení vOICe, které převádí černobílý obraz na zvuk. Obraz je převáděn pomocí kurzoru, který skenuje obraz zleva doprava a převádí signál podle principu, kdy vertikální pozice pixelu je převedena na frekvenci oscilátoru (pixel ve spodní pozici bude znít na nižší frekvenci než pixel vyšší), horizontální pozice odpovídá pozici ve stereu a jas odpovídá amplitudě signálu [17]. Na podobném principu je založen i software Audiopaint, který funguje jako jednoduchý editor a zároveň generátor zvuku na základě obrazu. V základním nastavení Audiopaint překládá hodnotu odstínu (hue) na amplitudu oscilátorů na levé nebo pravé straně a horizontální pozice pixelu odpovídá času, kdy oscilátor zazní. V nastavení programu Audiopaint lze jednotlivé parametry převodu upravit, tak, aby pozice ve stereu odpovídala libovolnému parametru HSL barevného modelu, frekvenční rozsah oscilátorů a také délka generované zvukové stopy.

2.12.2. Synaestheatre

K sonifikaci barvy lze také přistupovat více možnými způsoby. Lze použít barvu, nebo intenzitu světla jako vstup pro ovládání parametrů syntezátoru [18][19]. I zde se přístupy mohou lišit podle záměru sonifikace. Projekt Synaestheatre [17] si klade za cíl vytvořit sonifikační pomůcku pro orientaci v prostoru. 3D kamerou snímá prostor a v reálném čase přijaté informace přetváří na zvuk. Výška tónu odpovídá vertikální poloze předmětu, pozice ve stereu fyzické pozici v horizontální rovině a hlasitost tónu vzdálenost od kamery. Barva je pak přiřazena konkrétnímu zvukovému tónu. Toto zařízení jednak zkoumá možnosti využití sonifikace pro pomůcky pro nevidomé a zároveň se snaží přiblížit synestetické vnímání nesynestetické populaci [17].

2.12.3. Hear the Rainbow

Hear the Rainbow je nástroj jehož parametry jsou řízené barvou. Skládá se z barevného senzoru a softwarového syntezátoru. Nástroj vychází z teorie, že člověk při zhodnocení a poznávání objektů vytváří vícesmyslový profil podle empirických zkušeností [20]. Zvuk, který syntezátor na základě barvy vytvoří vychází jednak z fyzikálních vlastností dané barvy, ale především z psychologie barev [18]. Nástroj tedy tvoří spíše asociace založené na psychologických poznatcích o vlivu barev na lidskou mentalitu [18]. Odstín barvy tedy i v tomto případě ovlivňuje tón zvuku a jeho další vlastnosti.

2.12.4. Neil Harbisson

Neil Harbisson je jedním z prvních právně uznaných kyborgů – lidí, jejichž těla jsou vylepšena za pomoci technologie. Za kyborga můžeme považovat i člověka s naslouchátkem, kardiostimulátorem nebo bionickou náhradou končetiny. V těchto případech ale technická vylepšení slouží k zjednodušení života nositele tak, aby se jeho schopnosti přiblížily schopnostem "normálního" člověka. Naslouchátko pomáhá neslyšícímu vést konverzaci i s lidmi, kteří neumí znakovou řeč, kardiostimulátor zaručuje, aby člověk s nemocným srdcem byl schopen žít alespoň částečně normální život bez strachu z náhlé srdeční zástavy, bionická náhrada končetiny pomáhá člověku vykonávat základní činnosti. Případ Neila Harbissona je ale maličko odlišný v netradičnosti jeho postižení a také ve způsobu jakým se rozhodl svůj handicap technologií překonat.

Postižením tohoto Katalánského umělce je extrémní forma barvosleposti achromatopsie. Člověk postižený touto formou barvosleposti vidí jen ve stupních šedé. Tuto formu barvosleposti zatím nelze léčit a pomůcek, které by člověku pomohly

vidět rozdíly mezi různými barvami není mnoho a fungují jen částečně. Neil Harbisson spolu s prof. Adamem Montandonem ale zvolili jinou cestu a vytvořili zařízení, které nazvali "Eyeborg", které Neil Harbisson využívá k alternativnímu způsobu vnímání barev. Eyeborg se totiž nesnaží změnit, jak uživatel *vidí* barvy. Místo toho převádí barevné světlo na tón, který uživatel buď slyší nebo v případě Neila Harbissona vnímá skrze vibrace přenášené přímo do lebky. Tento způsob vnímání vnější reality se nedá jednoduše zařadit pod škatulku již popsaných lidských smyslů, ale spíš se stává smyslem novým alternativním způsobem vnímání reality, který spojuje vjemy, které smysly, se kterými se "normální" člověk rodí, obvykle dohromady nespojí [21].

Základní princip zařízení Eyeborg spočívá ve snímání okolního světla pomocí kamery, kterou má uživatel (Neil Harbisson) připevněnou na hlavě a převodu barvy na frekvenci, která je pak převedena na zvuk nebo na frekvenci, kterou vibruje implantát v lebce nositele. Viditelné barevné spektrum je rozděleno na 360 tónů v jedné oktávě. Toto rozdělení přibližně odpovídá frekvenčnímu rozpětí viditelného spektra. Eyeborg Neila Harbissona je ale rozšířen o sonifikaci infračerveného a ultrafialového spektra, takže je mu umožněno vnímat i elektromagnetické záření okem neviditelné [22].

3. NÁVRH ZAŘÍZENÍ

3.1. Přiblížení principu nástroje

Hlavním cílem nástroje *SuperDuperRainbowThing* je sonifikace barevné harmonie. Barvy, podobně jako tóny v hudbě, lze seřadit podle jejich vzájemných vztahů. K tomu, aby bylo možné barevné odstíny sonifikovat, je nutné vytvořit způsob jakým se znělé frekvence na tyto přiřadí k barevným odstínům. Způsob mapování jsem zvolil tak, aby řada znělých frekvencí co nejuvěrněji odpovídala řadě odstínů spektrálních barev. Vycházím z fyzikálních vlastností spektrálních barev, hlavně z frekvence elektromagnetického vlnění, které je tvoří. Mým cílem je znázornit, jak se hudební harmonie dá přeložit do harmonie barevné a naopak. Dalším cílem bylo vytvořit nástroj, který by bylo možné použít pro živou produkci. Která by propojovala konvenčnější formy hudby s interpretací sonifikovaných vztahů.

Z toho vychází i design nástroje. Hráč může vytvářet souzvučky i melodie pomocí „klaviatury“ na základě barvy rozsvícených barevných LED spíše než na základě hudebních struktur. Tím pádem je hlavním smyslem použitým při tvorbě hudby zrak. Nicméně sluchová korekce je v některých případech nezbytná, ale i přesto jde o způsob netradičního přístupu k hudební tvorbě, který by mohl inspirovat k neobvyklým hudebním postupům. Je důležité, aby hráč byl schopen ovládat ladění nástroje podle sluchu i podle zraku zároveň a byl tedy schopen prozkoumávat možnosti nástroje samostatně. Nástroj má osm nezávislých kanálů. Každý z nich lze naladit na libovolnou frekvenci, která odpovídá konkrétnímu barevnému odstínu. Důraz jsem kladl hlavně na bezprostřednost tohoto ovládání. Hráč může ladění jednotlivých kanálů měnit naprosto svobodně během hraní, čímž je schopen vytvářet zvukové a barevné škály a prozkoumávat, jak se zákony barevné harmonie projevují v harmonii zvukové a naopak. Další z důležitých prvků nástroje je fixní přiřazení barevných odstínů a znělých frekvencí, aby sonifikované vztahy byly co nejbližší realitě. Ladění nástroje vychází ze spektra spektrálních barev, které je rozděleno na konečný počet tónů, které jsou poté transponovány o konkrétní počet oktáv níž. K těmto frekvencím pak byly přiřazeny souřadnice v RGB prostoru. Výsledkem je ladící systém, který sonifikuje viditelné spektrum elektromagnetického záření a dovoluje hráči volně experimentovat.

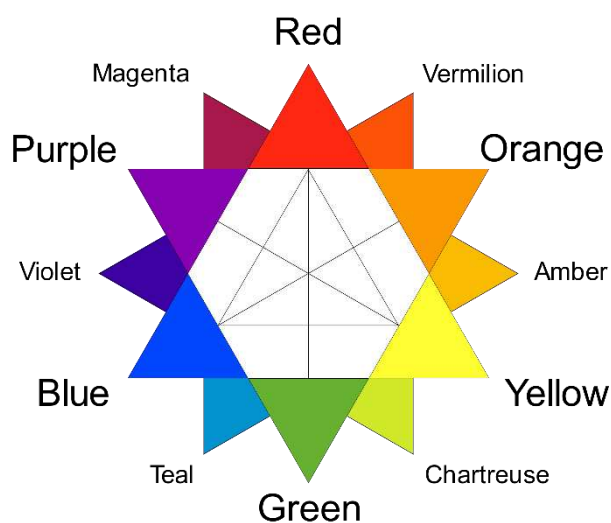
V průběhu realizace se nástroj oproti prvním návrhům samozřejmě změnil. Hlavně šlo o množství možností při samotné hře, drobné detaily a vzhled nástroje, které nebyly z hlediska koncepce nástroje prioritou. Prioritou při návrhu a realizaci byly zejména schopnost nástroje sonifikovat barevnou harmonii, případně propojit známé vztahy harmonie barevné s harmonií hudební, a zároveň možnost nástroj použít k tvorbě hudby nebo alespoň zvuků hudebně použitelných. Výsledkem této práce je tedy prototyp nástroje, který realizuje tyto funkce, a který lze v budoucnu doplnit o funkce další, které by vytvořily podmínky pro širší aplikace.

3.2. Popis sonifikace

Z barevného modelu RYB vyplývá poznatek, že barvy mezi sebou mají různé vztahy podle toho kde v tomto barevném modelu leží a tyto vztahy je možné do určité míry zobecnit (například protilehlé barvy jsou velmi kontrastní a tzv. komplementární). Podobným způsobem se dají popisovat vztahy mezi tóny, kdy vztahy různých tónů vnímáme jinak v závislosti na poměru jejich frekvencí. Jelikož podobný účinek na nás má poměr pulzů v polyrytmech [23], nabízí se otázka, zdali není tento účinek podobný i v případě barev. Pro názornost této demonstrace se vrátím k obrázku, který znázornil systém RYB (obr. 2-7).

tóny a ekvivalentní barvy pro chromatickou stupnici v dydimickém ladění							
Fb[THz]	hudební interval	Poměr k primě	Fz[Hz]	R	G	B	barva
384	1	1,00000	349,246	96	0	0	
409,60	m2	1,06667	372,529	198	0	0	
432,00	v2	1,12500	392,9017	255	0	0	
460,80	m3	1,20000	419,0952	255	0	0	
480,00	v3	1,25000	436,5575	255	101	0	
512,00	4	1,33333	465,6613	255	237	0	
537,60	d5	1,40000	488,9444	186	255	0	
576,00	5	1,50000	523,8689	56	255	0	
614,40	m6	1,60000	558,7935	0	248	255	
640,00	v6	1,66667	582,0766	0	162	255	
682,67	m7	1,77778	620,8817	10	0	255	
720,00	v7	1,87500	654,8362	115	0	242	
768,00	8	2,00000	698,4919	122	0	142	

Tab. 3-1: Vztah spektrálních barev a znělých frekvencí v dydimickém ladění (Fb je frekvence spektrální barvy, Fz je frekvence znělá o čtyřicet oktáv níž)



Kvinta je, jako čistý interval odvozený z druhé a třetí frekvence harmonické řady, definována poměrem frekvencí 3:2. Z tabulky lze vyčíst, že tento interval mezi sebou svírají barvy červená a zelená, tmavě fialová a žlutá, světle fialová a oranžová. Jak lze vidět na hvězdici RYB, tyto barvy leží na protějších stranách kruhu (v tomto případě hvězdice) [24].

Čistá kvarta (poměr 4:3) leží mezi žlutou a tmavě modrou, červenou a žlutou, zelenou a fialovou, které leží na vrcholu rovnostranných trojúhelníků. Některé kombinace barev ale tomuto intervalu neodpovídají, to může být způsobeno omezeným výběrem barev a na celém spektru odstínů, které je nástroj schopen vytvořit, tyto vztahy najít lze.

Z tabulky lze ale vyčíst, že už intervaly velikosti malé sekundy jsou viditelné a rozeznatelné, s výjimkou červených odstínů, které jsou zobrazovacími možnostmi velmi omezeny.

Ve světle těchto skutečností jsem dospěl k závěru, že paralely mezi barevnými odstíny a tóny skutečně existují. Odpověď na otázku, proč tomu tak je, proč člověk vnímá kmitočty elektromagnetického záření v podobných vztazích jako mechanické vlnění je nad rámec této práce. I přes to jde o fascinující jev vypovídající o komplikovanosti lidského vnímání.

3.3. Využití technologie

3.3.1. Arduino

Arduino je open source projekt společnosti Arduino software. Jde o sérii mikrokontrolerů vytvořených na základě mikroprocesorů společnosti Atmel ATmega.

Základním principem Arduina je zpracování vstupů na výstup. Konkrétní modely Arduina disponují různými počty digitálních a analogových vstupů a výstupů (zkráceně I/O).

V případě této práce jsem použil model Arduino Micro. Důvodem je v první řadě možnost přenášet sériové zprávy skrze USB rozhraní, v druhé řadě samozřejmě velikost. Tento model je napájen skrze USB rozhraní standartními 5 V.

Digitální I/O

Digitální rozhraní funguje na jednoduchém binárním principu. Digitální pin rozeznává jen dvě hodnoty: LOW a HIGH, které odpovídají referenční hodnotě napětí 5 V. Rozdíl mezi vstupem a výstupem je dán jen uživatelským naprogramováním. Digitální pin je schopen vytvořit na výstupu napětí mezi 0 V a 5 V pomocí pulzně šířkové modulace (PWM).

Analogové I/O

Analogové rozhraní funguje díky ADC převodníkům, které převádí spojitý analogový signál na digitální hodnoty v rozmezí hodnot 0–1023. Pin analogového rozhraní čte hodnoty napětí a srovnává k referenčnímu napětí, které se podle konkrétního modelu pohybuje od 3 V do 15 V.

Práce s Arduinem

Arduino je programováno pomocí eponymního jazyka Arduino, který vychází z jazyka Wiring. K vytváření skriptů se používá vývojové prostředí Arduino IDE. Pro mnoho konkrétních účelů bylo vytvořeno nejen komunitou velké množství knihoven.

3.3.2. PWM

Pulzně šířková modulace je druh diskretní modulace určený pro přenos analogového signálu pomocí signálu, který nabývá jen dvou hodnot. Název napovídá, že se jedná o změnu šířky pulzu (střídy), čímž je ovlivněna efektivní hodnota signálu.

3.3.3. Raspberry Pi

Raspberry Pi je jednodeskový počítač (SBC – single board computer), který je podobně jako Arduino zaměřen na open source projekty. K širokým možnostem využití přispívá zejména programovatelné rozhraní GPIO, které se, podobně jako Arduino, skládá z analogových i digitálních rozhraní. Na rozdíl od Arduina je pro správné fungování Raspberry Pi nutný operační systém. Jedná se zpravidla o přímo pro Raspberry Pi vytvořenou distribuci Linuxu Raspbian.

3.3.4. Pure Data

Pure Data je grafický programovací jazyk vytvořený pro práci s daty v reálném čase. Díky tomu je vhodný na práci se zvukem a obrazem. Autorem je Miller Puckette, který se podílel i na tvorbě programovacího jazyka MAX/MSP. Oba programovací jazyky jsou si velmi podobné v konceptu, funkcích i příkazech, hlavním rozdílem je, že Pure Data je tvořen pod Open Source licenci.

3.3.5. MIDI

MIDI (Musical instrument digital interface) je komunikační standart navržený pro komunikaci mezi hudebními nástroji a dalšími zařízeními určenými k tvorbě hudby. Na trhu se první nástroje s možností MIDI propojení v roce 1982 a používá se dodnes. Základní myšlenka MIDI standartu vychází ze snahy o univerzální způsob komunikace mezi hudebními nástroji (hardwarovými i softwarovými), ovládacími zařízeními (kontroléry) a počítačem, tak aby hudebník měl volnou ruku v tom, jaké nástroje pro svou hudbu zvolí a jakým způsobem je bude ovládat. Další vlastností MIDI je i využití v notačních softwarech, takže je možné hudbu přehrát takřikajíc „z listu“ bez potřeby živého hráče. Celkově MIDI standart otevřel dveře širokým možnostem hudební tvorby a produkce.

Zařízení komunikující pomocí MIDI mezi sebou nepřenáší audio signál (ten obsahuje příliš mnoho informací), ale úspornější digitální signál. Standartní rozhraní MIDI se skládá z několika pětipinových DIN konektorů: IN, OUT a THRU. In slouží k přijímání MIDI zpráv, OUT k odesílání a THRU k posílání dat kopírovaných ze vstupu MIDI IN [25]. Ke komunikaci pomocí MIDI standartu se dnes používá větší množství hardwarových rozhraní. Zejména pro komunikaci s počítačem, rozhraní USB, aj.

MIDI protokol je tzv. event based, což znamená, že k toku informací dochází jen v případě, je-li na vysílajícím zařízení změněn stav (je zmáčknuta klávesa, otočí se potenciometrem). Dokud nedojde k další změně stavu, žádné informace se nepošlou. Základem MIDI protokolu je MIDI zpráva. Ta se skládá z bytu stavového a několika bytů datových. První bit určuje, zda jde o byte stavový (1) nebo datový (0). Pokud jde o byte stavový, pak další tři bity určují typ zprávy a poslední čtyři určují MIDI kanál na kterém je zpráva vysílána. Datový byte obsahuje kromě prvního identifikačního bitu sedm bitů, které určují hodnotu zprávy. Která nabývá hodnot o rozlišení sedmi bitů (0–127).

Například u noty typu Note On (obvykle slouží ke spuštění tónu), nese první datový byte hodnotu tónu, který má být zahrán, a druhý byte nese informaci o rychlosti stisku noty *velocity* [25].

V tabulce (Tab. 3-2) je zobrazen seznam typů MIDI zpráv, jejich funkce, číslo, jímž se identifikují ve stavovém bytu, a počet datových bytů, které používají.

MIDI zpráva	Význam	ID	počet datových bytů
<i>Note Off</i>	nota vypnuta	0	2
<i>Note On</i>	nota zapnuta	1	2
<i>Polyphonic Key Pressure</i>	individuální tlaková citlivost	2	2
<i>Control Change</i>	změna kontroleru	3	2
<i>Program Change</i>	volba programu	4	1
<i>Channel Pressure</i>	společná tlaková citlivost	5	1
<i>Pitch Bend Change</i>	ohýbání tónu	6	2

Tab. 3-2: Typy MIDI zpráv [25].

Průběžný stav (running status) nastává ve chvíli, kdy dochází k velkému toku dat jednoho typu. Například když uživatel otáčí potenciometrem, posílá tím za sebou mnoho hodnot stejného typu. MIDI sběrnice pak nevysílá stavové byty a jen byty datové, tím se šetří kapacita sběrnice. Tento stav končí až ve chvíli, kdy je potřeba vyslat další stavový byte [25].

Je nutné podotknout, že přiřazení funkcí jednotlivým zprávám (například control change zpráva pro hlasitost) je věc spíše určitých konvencí, aby nastavení zařízení různých výrobců korespondovala. To, jak jsou MIDI zprávy interpretovány záleží na zařízení, které zprávy přijímá, proto lze vhodným nastavením vytvořit netradiční formy ovládání. Příkladem může být MPE (MIDI Polyphonic Expression), který dovoluje velmi široké možnosti expresivity v hraní díky možnosti aplikovat modulaci, pitch bend a další efekty na každou notu zvlášť díky tomu, že každá nota je vysílána na odděleném kanálu, takže control change zprávy nebo pitch bend zprávy, které jsou ve standartu MIDI aplikovány na celý kanál. Takže nástroje jako Seaboard výrobce ROLI nebo Linnstrument od Rogera Linna nabízí velmi rozsáhlé možnosti hry, aniž by pro ně musel být vyvíjen samostatný komunikační standart [26].

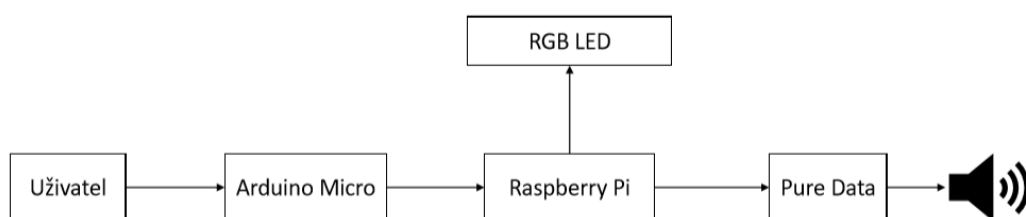
3.3.6. DMA

DMA (neboli direct memory access) je způsob přenosu informací z operačního systému přímo do paměti bez nutnosti využití procesoru. V celém cyklu je procesu udělen přímý přístup k paměti jen na začátku a poté když je proces ukončen, pošle tzv. *interrupt*, kterým tento přístup ukončí a požádá o něj až ve chvíli, kdy je přímý přístup k paměti nutný. Výhodou tohoto způsobu práce s daty je ten, že pro procesy, které jsou citlivé na čas a nemohou si dovolit být zdrženy nízkou prioritou v seznamu procesů, je možné provést bez závislosti na výpočetní možnosti procesoru.

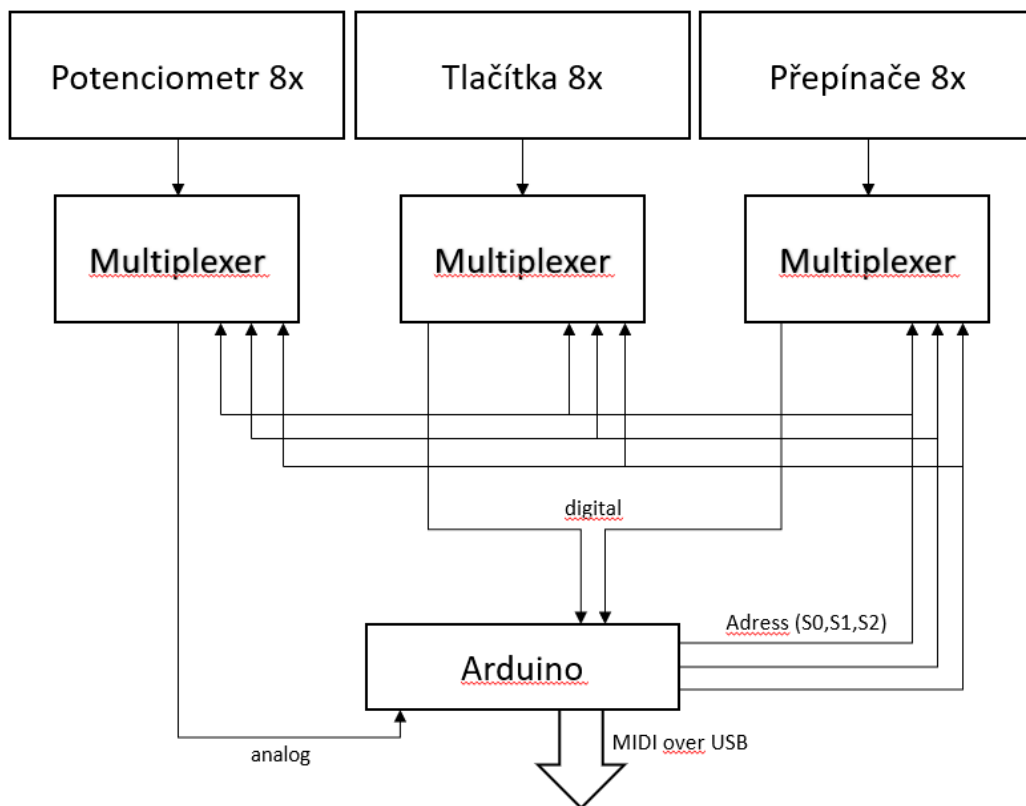
4. REALIZACE NÁSTROJE

4.1. Základní schéma

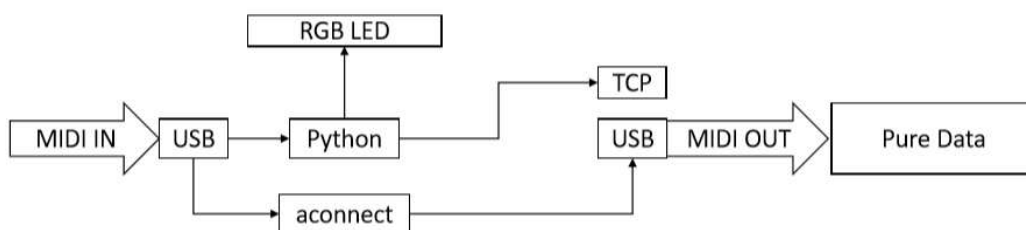
Nástroj lze rozdělit na několik částí, z nichž každá zastává konkrétní funkci. Hardwarový ovladač má formu panelu, na kterém se nachází hlavní ovládací prvky a zpětná vazba barevných světél. Jeho funkci obstarává mikrokontroler Arduino Micro a počítač Raspberry Pi. Tento ovladač je skrze zvukovou kartu připojen k počítači, na kterém běží Pure Data patch, který obstarává samotné zvukové možnosti nástroje. Třetí částí, kterou je možno připojit k celému nástroji je další Raspberry Pi, který s prvním komunikuje skrze TCP protokol a obstarává libovolnou větší sestavu světél.



Obr. 4-1: Obecné schéma nástroje



Obr. 4-2: Blokové schéma zapojení Arduino



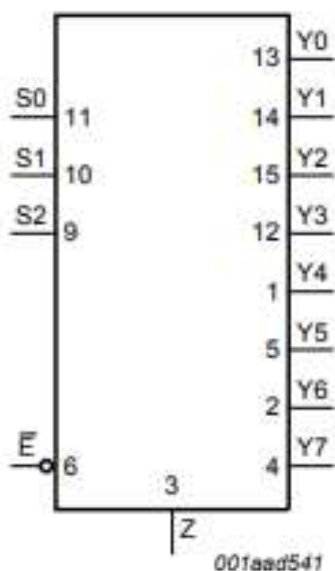
Obr. 4-3: Schéma vnitřního softwarového propojení Raspberry Pi

4.2. Hardwarová část

4.2.1. Multiplexer

Jednu z nevýhod, kterou s sebou nese Arduino Micro je relativně malý počet digitálních a analogových pinů pro připojení dostatečného množství ovládacích prvků. V případě, použití například modelu Arduino Mega, který obsahuje mnohem větší množství vstupů a výstupů, by se ztratila funkce přenosu MIDI zpráv přes USB rozhraní. Malý počet vstupů a výstupů u modelu Arduino Micro se dá vyřešit využitím multiplexerů.

Multiplexer (tj. slučovač) je zařízení, které slučuje několik zařízení tak, že je lze všechny připojit na jeden vstup/výstup.



Obr. 4-4: zjednodušené schéma multiplexeru HC4051

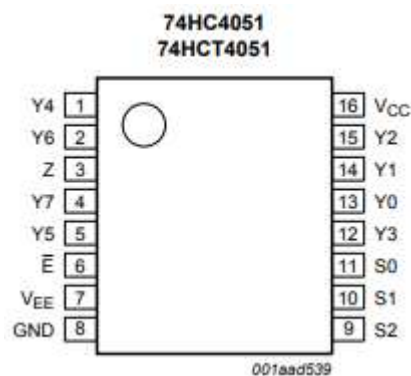
Na obrázku (Obr. 4-4) je znázorněno zjednodušené schéma osmivstupého multiplexeru HC4051. Vstupy Y (0–7) jsou vstupy multiplexeru, mezi kterými se přepíná pomocí adresních pinů (S0, S1, S2), na které je přiváděn digitální signál (HIGH/LOW). Enable pin (E) slouží k odpojení všech vstupů.

Input				Channel ON
E	S2	S1	S0	
L	L	L	L	Y0 to Z
L	L	L	H	Y1 to Z
L	L	H	L	Y2 to Z
L	L	H	H	Y3 to Z
L	H	L	L	Y4 to Z
L	H	L	H	Y5 to Z
L	H	H	L	Y6 to Z
L	H	H	H	Y7 to Z
H	X	X	X	switches off

[1] H = HIGH voltage level; L = LOW voltage level; X = don't care.

Tab. 4-1: Tabulka logiky adresních pinů

Na tabulce (Tab. 4-1) je vidět podle jakého pravidla jsou vstupy Y připojeny na výstup Z. Je vidět, že v každý jeden moment je na výstup Z připojen maximálně jeden vstup Y. Díky použití multiplexeru HC4051 jsem schopen připojit dvacet pět ovládacích prvků na malé množství vstupů.



Obr. 4-5: Reálné rozložení pinů Multiplexeru HC4051

K Arduino jsou multiplexery připojeny takto: Adresní piny (S0, S1, S2) jsou paralelně připojeny k digitálním výstupům Arduina (D2, D3, D4), výstupy Z jednotlivých multiplexerů pak na digitální piny (D5, D6) v případě multiplexerů, ke kterým jsou připojeny tlačítka a přepínače, a na analogový pin (A0) v případě multiplexeru, ke kterému jsou připojeny potenciometry. Multiplexery jsou napájeny 5 V, které dodává Arduino na pin Vcc. Zbývající piny (E, V_{ee} a GND) jsou připojeny na společnou zem.

4.2.2. Potenciometry

Část ovládacího rozhraní tvoří řada osmi otáčivých potenciometrů. Potenciometr funguje v obvodu jako dělič napětí. Výstup všech osmi potenciometrů je připojeno k vstupům multiplexeru, jehož výstup je připojen na analogový vstup Arduina. Arduino odečítá napětí na potenciometru od referenčního napětí 5 V, které je připojeno na vstup potenciometrů. Třetí uzemňovací pin potenciometrů je připojen na společnou zemi.

4.2.3. Tlačítka a přepínače

Nástroj je kromě potenciometrů ovládán také tlačítky a přepínači. Konkrétně řadou osmi přepínačů a osmi tlačítek, a jeden přepínač, který má funkci vypínače celého zařízení. Tlačítka jsou připojena skrze multiplexery k digitálním vstupům Arduina. Princip jejich fungování spočívá v tom, že při stisknutí tlačítka nebo přepnutí přepínače se vytvoří kontakt mezi piny a Arduino na digitálním vstupu zaznamená napětí 5 V, takže z hodnoty LOW se změní na hodnotu HIGH. Jediný rozdíl mezi tlačítky přepínači je v tom, že tlačítka se po uvolnění tlaku vrátí do pozice „vypnuto,“ zatímco přepínač je nutno fyzicky přepnout zpět.

4.2.4. Arduino

Po připojení všech komponentů k Arduino je nutné Arduino naprogramovat tak, aby provádělo nutné operace. Jelikož je cílem vytvořit z mikrokontroleru Arduino Micro USB MIDI ovladač, využil jsem knihovnu MIDI_controller [41], která je vytvořena přímo pro účel jednoduché tvorby libovolně navržených MIDI ovladačů založených na deskách Arduino obsahující procesory ATmega32u4, protože mají funkci sériového propojení skrze USB a tím pádem je možné posílat i MIDI zprávy skrze USB. U desek Arduino Mega nebo UNO, které jsou postaveny kolem procesorů ATmega 16u2 je nutné doplnit firmware o ovladače, které tuto funkci doplní, protože tuto funkci nativně nepodporují.

Knihovna MIDI_controller obsahuje řadu funkcí, které ze vstupních hodnot vytváří MIDI zprávy podle konkrétních parametrů, které uživatel zadá. Pro vytváření a nahrávání programů na desku Arduino se používá vývojové prostředí Arduino IDE. Program pro Arduino sestává ze dvou hlavních částí: *setup* a *loop*. Část *setup* obsahuje funkce, které jsou provedeny pouze jednou před započítím cyklu a část *loop* obsahuje kód, který je prováděn opakovaně v cyklu. V tomto případě (Obr.4-6) jsou na začátku kódu před částí *setup* definovány vstupní ovládací prvky a multiplexery, skrze které jsou připojeny, a také zprávy, které tyto ovládací prvky tvoří. V části *loop* je pak volána funkce MIDI_Controller, která podle zadaných parametrů tvoří MIDI zprávy.

```

Digital buttons[] = {
  {multiplexerBUTTON.pin(0), 34, 1},
  {multiplexerBUTTON.pin(1), 34, 2},
  {multiplexerBUTTON.pin(2), 34, 3},
  {multiplexerBUTTON.pin(3), 34, 4},
  {multiplexerBUTTON.pin(4), 34, 5},
  {multiplexerBUTTON.pin(5), 34, 6},
  {multiplexerBUTTON.pin(6), 34, 7},
  {multiplexerBUTTON.pin(7), 34, 8}
};

Digital buttonSHUTDOWN(8, 69, 9);

AnalogMultiplex multiplexerSWITCH(6, { 2, 3, 4 } );

Digital toggleSwitch[] = {
  {multiplexerSWITCH.pin(0), 63, 1},
  {multiplexerSWITCH.pin(1), 63, 2},
  {multiplexerSWITCH.pin(2), 63, 3},
  {multiplexerSWITCH.pin(3), 63, 4},
  {multiplexerSWITCH.pin(4), 63, 5},
  {multiplexerSWITCH.pin(5), 63, 6},
  {multiplexerSWITCH.pin(6), 63, 7},
  {multiplexerSWITCH.pin(7), 63, 8}
};

AnalogMultiplex multiplexer(A0, { 2, 3, 4 } );

Analog potentiometers[] = {
  {multiplexer.pin(0), MIDI_CC::Channel_Volume, 1},
  {multiplexer.pin(1), MIDI_CC::Channel_Volume, 2},
  {multiplexer.pin(2), MIDI_CC::Channel_Volume, 3},
  {multiplexer.pin(3), MIDI_CC::Channel_Volume, 4},
  {multiplexer.pin(4), MIDI_CC::Channel_Volume, 5},
  {multiplexer.pin(5), MIDI_CC::Channel_Volume, 6},
  {multiplexer.pin(6), MIDI_CC::Channel_Volume, 7},
  {multiplexer.pin(7), MIDI_CC::Channel_Volume, 8}
};

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  MIDI_Controller.refresh();
}

```

Obr. 4-6: Hlavní část kódu pro Arduino

S multiplexerem Arduino pracuje tak, že ve smyčce propojuje s výstupem všechny vstupy, a ve chvíli, kdy zaznamená na daném digitálním nebo analogovém vstupu změnu stavu, vytvoří zprávu. O jaký konkrétní ovládací prvek se jedná je jasné z adresního signálu, který je v tu chvíli posílán na adresní piny multiplexeru, takže

vytvoří zprávu, která odpovídá zadaným parametrům pro konkrétní vstup multiplexeru.

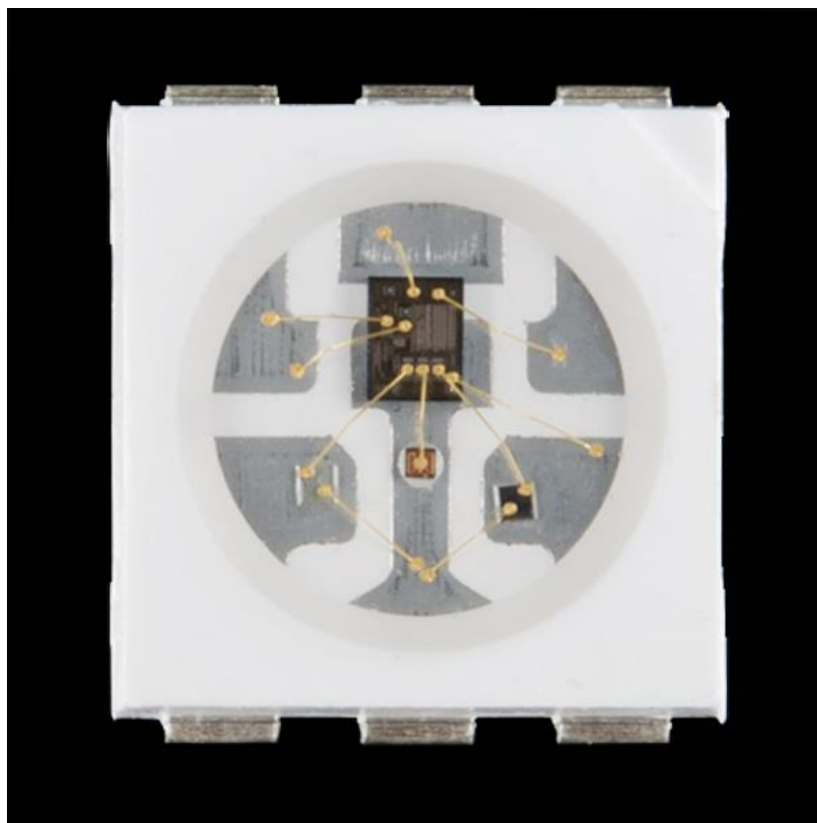
Tento program jej pak nutné nahrát na desku Arduino Micro. K tomu, jak už bylo řečeno, slouží také vývojové prostředí Arduino IDE. Po připojení desky pomocí USB rozhraní k počítači je možné v záložce *Nástroje* vybrat položku *Port*, která otevře nabídku portů, ve které by se měla zobrazit deska Arduino Micro. Po zvolení správného portu pak jen stačí zvolit volbu *Nahrát* z hlavní nabídky a Arduino IDE program zkontroluje, odhadne množství výpočetních zdrojů, které využije, a nakonec program samotný nahraje na desku. Od této chvíle se deska po připojení k počítači chová jako MIDI ovladač jménem Arduino Micro, který skrze USB sběrnici posílá data a je skrze něj i napájen.

V kódu lze vidět, že jednotlivé vodorovné sady prvků posílají stejný typ zprávy (všechna tlačítka posílají společně stejnou notu, potenciometry posílají stejný typ control change zprávy a pro všechny přepínače je také jedna nota), jen s tím rozdílem, že každý potenciometr, tlačítko a přepínač vysílá na svém kanálu, což vytváří situaci, kdy na každém MIDI kanálu vysílá zprávu jen jeden potenciometr, jedno tlačítko a jeden přepínač. Tento způsob zjednodušuje návrh dalších částí zařízení. Ať už jde o ovládání barevného světla nebo tvorbu zvuku.

4.2.5. RGB LED

Pro zobrazení barevného světla, na kterém se snažím demonstrovat paralely mezi tónem a světlem jsem se rozhodl využít pásek RGB svítivých diod (LED). Svítivé diody jsou diody, které připojeny k napětí v propustném směru tvoří záření. Volbou různých materiálů je možné změnit barvu vyzařovaného světla.

RGB LED jsou tvořeny třemi diodami, které září třemi základními barvami (červenou, zelenou a modrou) a tvoří tak RGB barevný prostor, ve kterém podle vzájemného poměru míry jejich vyzařování jsou schopny tvořit libovolné barevné odstíny. Jednotlivé barvy jsou tvořeny velikostí napětí, které je na ně přivedeno, čehož lze dosáhnout pomocí pulzně šířkové modulace. Mít ale pro každý kanál (z osmi) zvlášť tři různobarevné diody, z nichž každou je nutné ovládat PWM signálem je velmi neefektivní a popravdě i těžko proveditelné, jelikož Raspberry Pi (ani Arduino) nemá dostatečný počet digitálních výstupů, které by byly schopny tvořit PWM signál. Velmi efektivní řešení nabízí diody WS2812, které spojené do pásku vyžadují jen jeden vodič pro ovládací PWM signál. To je díky tomu, že tyto diody mají jen jednu anodu a tři katody, z nichž každá svítí jednou základní barvou, a hlavně napětí na jednotlivých katodách je řízeno integrovaným obvodem, který komunikuje s ovládacím zařízením (v tomto případě Raspberry Pi). Tento integrovaný obvod je součástí pouzdra diody (jak lze vidět na obrázku Obr. 4-7).



Obr. 4-7: Pouzdro diody WS2812.

Výhodou využití tohoto modelu LED je, že je možné využít libovolný počet led za sebou a všechny ovládat jedním PWM výstupem, pokud jsou všechny napájené dostatečným výkonem.

WS2812 mají tři vstupní kontakty: GND pro připojení na společnou zemi, napájení 5 V a Din pro vstupní data.

4.2.6. Raspberry Pi

Raspberry Pi má primárně funkci ovládání sestavy LED pomocí přichozích MIDI zpráv a zároveň funguje jako MIDI THU zařízení (kopíruje přichozí MIDI zprávy na výstup). V tomto případě jsem použil model Raspberry Pi 3B zejména z důvodu dostatečného množství USB portů.

Příprava Raspberry Pi je o něco komplikovanější než v případě Arduina. V první řadě je nutné připravit bootovací médium, což v případě Raspberry Pi je SD karta, na které je nahrán obraz operačního systému; v tomto případě distribuce Linuxu Raspbian Stretch (verze 2018-11-13). K nahrání .ISO souboru operačního systému jsem použil software Etcher. Grafické rozhraní programu Etcher je jednoduché: stačí zvolit obraz operačního systému a médium, na které je pak obraz nahrán. Před nahráním obrazu je však nutné SD kartu zformátovat, k čemuž jsem použil nástroj DISKPART, který je součástí operačního systému Windows. Po vytvoření

bootovacího média jej stačí vložit do příslušného portu a připojit Raspberry Pi k napájení. Standartně systém Raspbian po nabootování otevře grafické rozhraní. Je tedy nutné připojit monitor skrze HDMI port a vstupní zařízení (klávesnici a myš), skrze grafické rozhraní je provedení základní přípravy systému velmi přímočaré: připojení k WiFi síti a automatická aktualizace systému. Dalším důležitým krokem je umožnění spojení skrze protokol SSH, změna přihlašovacích údajů z důvodu větší bezpečnosti a deaktivace automatického otevření grafického rozhraní. Po restartování systému se otevře jen textový terminál operačního systému a je možné využít SSH propojení z jiného počítače.

K propojení s Raspberry Pi slouží software PuTTY do kterého je nutné zadat jméno uživatele a IP adresu Raspberry Pi (tu jsem zjistil pomocí softwaru Advanced IP Scanner). Poté se otevře okno textového terminálu, do kterého je pro přístup k ovládání systému potřeba zadat správné heslo a je možné provádět příkazy vzdáleně skrze lokální síť. Dále o nastavení softwaru Raspberry Pi budu pokračovat dále v podkapitole „Softwarová část“

Raspberry Pi je s Arduinem propojeno skrze USB rozhraní, skrze které jej napájí a přijímá data. LED jsou ovládány a napájeny skrze programovatelné rozhraní GPIO. K tomu jsou připojeny následovně: GND kontakt na LED samozřejmě na GND GPIO pin na Raspberry Pi, taktéž s napájením, kdy 5V kontakt je připojen na 5V pin na Raspberry Pi a Din na digitální GPIO pin, který je schopný PWM výstupu (v tomto konkrétním případě pin 12)

Pro další rozšíření funkce nástroje pro vytváření světelných instalací v prostoru slouží další Raspberry Pi. Tentokrát model Zero WH. Na tomto zařízení je spuštěn další Python skript, který vytváří server pro přijímání MIDI zpráv skrze TCP protokol, a který ovládá soustavu RGB LED. Propojení funguje tak, že Raspberry Pi, který přijímá skrze USB MIDI zprávy z Arduina posílá tyto zprávy skrze bezdrátové připojení na tento server, a ten je interpretuje pro ovládání světelné soustavy. Je nutné podotknout, že počítač Raspberry Pi není schopný napájet více než jen malý počet LED kvůli malému výkonu napájecích GPIO pinů, proto je nutné využít příslušného napájecího zdroje s dostatečným výkonem. V rámci bakalářské práce jsem vytvořil základní prototyp tohoto prvku (takřikajíc „proof of concept“), který lze ovšem upravit a nastavit podle potřeby případné instalace v prostoru.

4.2.7. Další propojení s Pure Data

Jednou z komplikací, se kterou jsem se setkal při práci na tomto projektu, bylo, že vývojové prostředí Pure Data nebylo schopno rozeznat Arduino Micro jako MIDI ovladač, což bylo problémem, který se mi nepodařilo opravit, proto jsem se rozhodl spustit Pure Data samostatně na počítači s Windows. Kvůli tomu bylo ale nutné vytvořit cestu pro MIDI zprávy. Řešení spočívá v tom, že Raspberry Pi funguje jako MIDI THRU zařízení. Příchozí MIDI zprávy nejen zpracovává a přetváří na

světelný výstup pomocí LED, ale také zprávy kopíruje na výstup, ze kterého jsou pak MIDI zprávy vedeny do instance Pure Data. K tomu slouží USB/MIDI převodník Bespeco BMUSB100, který je k Rasoberry Pi připojen pomocí USB portu a na druhé straně připojen ke zvukové kartě Tascam pomocí pětipinových DIN konektorů. Pure Data tak v systému Windows rozeznává zvukovou kartu jako MIDI zařízení a tímto, na první pohled komplikovaným, způsobem propojit všechna zařízení. Hlavní je ale využití zvukového ovladače ALSA, který je součástí operačního systému Raspbian. Je totiž nutné napojit tok příchozích MIDI zpráv na výstup do USB/MIDI přechodníku. K tomu slouží příkaz *aconnect*, který funguje jako virtuální patchbay pro MIDI i audio zařízení. Po připojení všech zařízení je nutné zobrazit adresy jednotlivých MIDI zařízení pomocí příkazu *aconnect -lo*. Poté stačí jen propojit tato dvě zařízení, v tomto konkrétním případě příkaz vypadá konkrétně: *aconnect 20:0 16:0*. Poté Raspberry Pi funguje jako MIDI THRU zařízení.

4.3. Softwarová část

4.3.1. Volba tónů

Jak bylo uvedeno v teoretickém úvodu, ladění, které jsem zvolil pro nástroj *SuperDuperRainbowThing* je vytvořené na základě principu rovnoměrně temperovaného ladění, což znamená, že jednotlivé tóny jsou od sebe vzdáleny stejný počet centů. Ladění je vytvořené, aby odpovídalo možnostem MIDI protokolu, tj. oktáva je rozdělena na 126 tónů. Obecný matematický vztah pro toto ladění (ať už znělých frekvencí nebo frekvencí spektrálních barev) vychází ze vztahu (4)

$$\text{počet tónů} \sqrt[126]{2} = \text{poměr frekvencí} \quad (5)$$

Ze kterého po dosazení hodnot dostaneme vztah:

$$\sqrt[126]{2} = 1.00552 \quad (6)$$

Pro získání frekvence libovolného tónu platí obecný vztah,

$$f = f_0 * (\sqrt[126]{2})^i \quad (7)$$

kde f_0 je frekvence libovolného nižšího tónu, a i je počet nejmenších intervalů.

Dále jsem vybral část referenčního spektra, která svírá interval oktávy. Konkrétně 384THz – 768THz. Tento interval jsem podle vztahu (6) rozdělil na 127 frekvencí (sto dvacátá sedmá frekvence odpovídá frekvenci o oktávu vyšší, tj. o dvojnásobné frekvenci). Tímto způsobem jsem získal rovnoměrně temperovanou stupnici spektrálních barev.

Je samozřejmé, že tyto frekvence není možné slyšet, bylo nutné transponovat tuto stupnici tak, aby se pohybovala v hodnotách lidským sluchem slyšitelných.

Vycházím z předpokladu, že interval oktávy odpovídá poměru 2/1, pokud transponuji o oktávu výš a 1/2, když transponuji o oktávu níž. Z tohoto předpokladu se dá odvodit vztah,

$$f = \frac{f_0}{2^n} \quad (8)$$

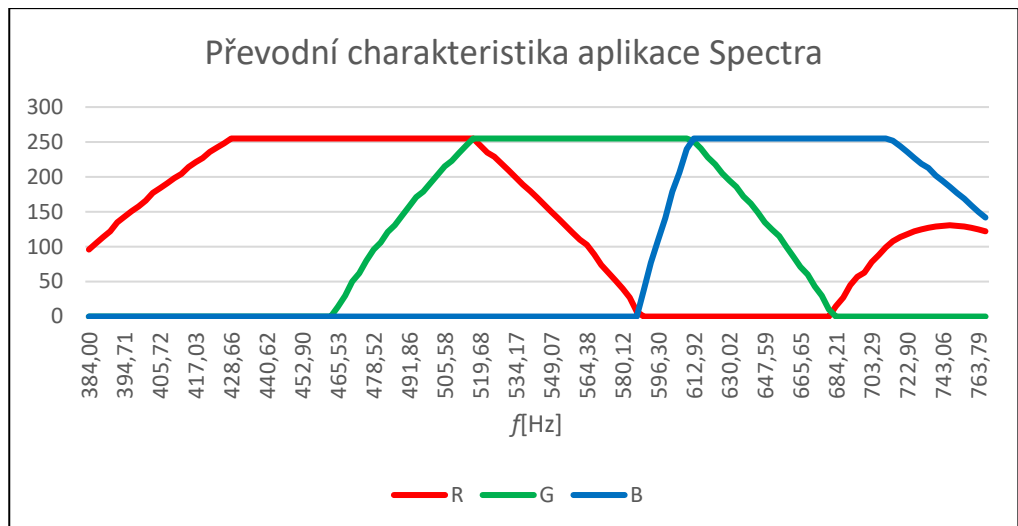
kde f je transponovaná frekvence, f_0 je frekvence, kterou transponuji a n je počet oktáv, o který transponuji dolů. Náhodným dosazováním čísel jsem došel k tomu, že k vytvoření stupnice přibližně od f' do f'' je potřeba transponovat „světelnou“ stupnici o přesně čtyřicet oktáv (tedy $n = 40$). Tímto způsobem jsem vytvořil stupnici tónů o frekvencích od 349,25 Hz do 698,49 Hz, která přibližně odpovídá výše zmíněným tónům: f' až f'' . Toto ladění vychází lehce vyšší než standardní ladění ($a' = 440$ Hz), kde tyto tóny odpovídají frekvencím: 349,23 Hz a 698,46 Hz.

4.3.2. Přidělení RGB hodnot frekvencím

Důležitou částí celého procesu bylo vytvořit proces přidělení správných hodnot RGB k hodnotám frekvencí. Jak již bylo zmíněno v teoretickém úvodu, RGB prostory jsou zpravidla vymezené v rámci CIELAB prostoru a neobsahují skutečně spektrální barvy. Tento problém je, s využitím méně dostupných technologií, neřešitelný, proto je nutné si uvědomit, že výsledkem nebude přesná interpretace barev zvukem, ale jen přibližné přidělení, které ovšem ponese dostatečné množství informací pro hráče či posluchače, aby vztah barvy a zvuku byl jasný.

K získání souřadnic v RGB prostoru, které dostatečně odpovídají frekvencím spektrálních barev jsem použil aplikaci *Spectra*¹². Jde o aplikaci vyvinutou přesně k tomuto účelu. Převádí mezi hodnotami vlnové délky, frekvence a souřadnicemi RGB prostoru v 8bitovém rozlišení (0–255).

¹² Aplikace *Spectra* slouží kromě jiného k přidělení frekvence přibližné pozice v RGB prostoru. Dostupné na adrese: <http://www.efg2.com/Lab/ScienceAndEngineering/Spectra.htm>



Tab. 4-2: Převodní charakteristika aplikace Spectra

Na základě této převodní charakteristiky jsem vytvořil sestavu hodnot (viz. Tab. 6-4 v přílohách).

4.3.3. Raspberry Pi

Hlavní funkci Raspberry Pi – tedy přijímat MIDI zprávy a ovládat na jejich základě řadu LED – obstarává Skript napsaný v jazyce Python. Základem tohoto skriptu jsou tyto knihovny:

- Mido [41]
- Board
- Neopixel [43]
- Os

Knihovna Mido je zaměřená na práci se standardem MIDI. Dovoluje pracovat s MIDI porty (otevírat, tvořit nové i posílat MIDI přes TCP bezdrátově), extrahovat ze zpráv konkrétní informace a parametry, a tvořit nové MIDI zprávy. Knihovna Board obsahuje definice a funkce pro přímou práci s hardwarem Raspberry Pi, zejména s rozhraním GPIO. Neopixel je knihovna zaměřená na práci se soustavami LED WS2811, WS2812 a dalšími, které jsou kompatibilní. Funguje v reálném čase díky DMA (direct memory access – přímý přístup k paměti) A Os je knihovna, která dovoluje přímo z Pythonu provádět příkazy v terminálu operačního systému Raspbian.

Samotný skript funguje tak, že na začátku je definována řada diod. Definované jsou délkou (tj. počtem diod v řadě), typem a GPIO pinem, ke kterému jsou připojeny. Lze definovat i další parametry jako například *brightness* pro celkový jas diod. Toto nastavení jasu lze ale aplikovat pouze plošně na všechny diody zároveň. Dále je definována soustava hodnot, kterých postupně nabývají diody červená, zelená a

modrá. Po otevření MIDI portu *for* cyklus pro každou příchozí zprávu zkontroluje, zdali jde o zprávu typu *control change*, protože to je typ zprávy, kterým je ovládána barva diod. Ke každé hodnotě *control change* (0–127) je přiřazena jedna hodnota v RGB prostoru, konkrétně hodnota, která nejlépe reprezentuje spektrální barvu. Z každé *control change* zprávy skript extrahuje dvě informace: o jaký MIDI kanál se jedná a hodnotu zprávy. Kanál, na kterém je zpráva vysílána odpovídá pozici RGB diody v soustavě a hodnota (0–127) odpovídá pozici v soustavě RGB hodnot, výsledkem je, že při otočení potenciometrem příslušná dioda mění postupně barvu. Pokud dorazí na MIDI port *Note On* zpráva ze samostatného přepínače, spustí se funkce *pixels.fill(0, 0, 0)*, která vyplní všechny diody těmito konkrétními hodnotami, což znamená, že je zhasne, a také je proveden příkaz *shutdown -h now*, který okamžitě vypne operační systém. Tento prvek je přítomen proto, že je vůči Raspberry Pi nešetrné vypínat odpojením zdroje napětí. Díky tomuto řešení lze snadno provést tento příkaz bez nutnosti otevírat terminál nebo se připojovat skrze SSH.

4.3.4. Pure Data

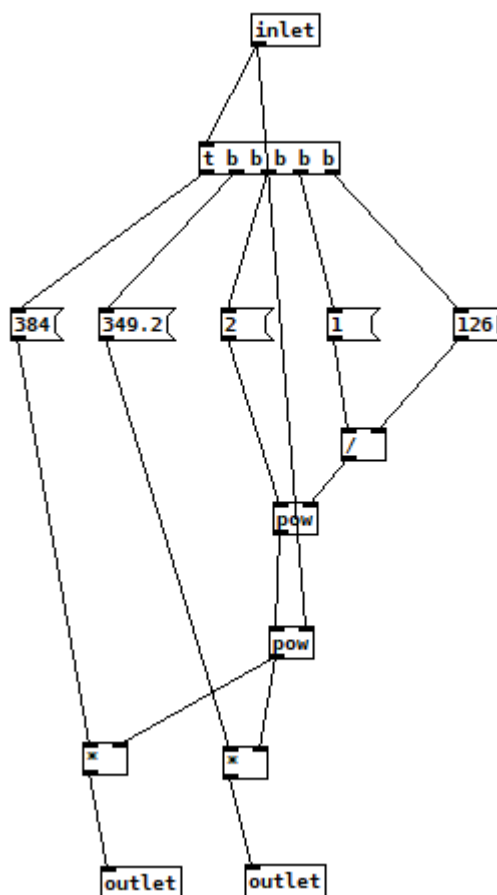
Patch v Pure Data se skládá z několika dalších subpatchů, které zastávají různé funkce, ale většina nich je takříkajíc „zanořena“ do sebe navzájem. Všechny zmíněné patche a patche v přílohách jsem vytvořil sám na základě informací z výukových materiálů [40].

Hlavní patch – SuperDuperRainbowThing

Hlavní patch (nazvaný podle celého nástroje *SuperDuperRainbowThing*) Obsahuje hlavní stavební prvky nástroje: základní polyfonní nástroj, vizualizaci frekvence oscilátoru a frekvence odpovídající spektrální barvy, sekvencer, jednoduchý oktav, samostatné oscilátory a výstupní zesilovač s vizualizací výstupu. Jednotlivé moduly jsou vytvořeny tak, aby byl hráč schopen vytvářet propojení podle svého uvážení.

absFreqVis.pd

V srdci celého nástroje leží tento subpatch, který je mnohokrát abstrahován a odkazován v celém nástroji. Jeho hlavní funkcí je volba frekvence oscilátoru. Aby konkrétní *Control Change* zprávě odpovídala konkrétní frekvence, vytvořil jsem algoritmus pro výpočet této frekvence. Tento algoritmus vychází ze vztahu (7).



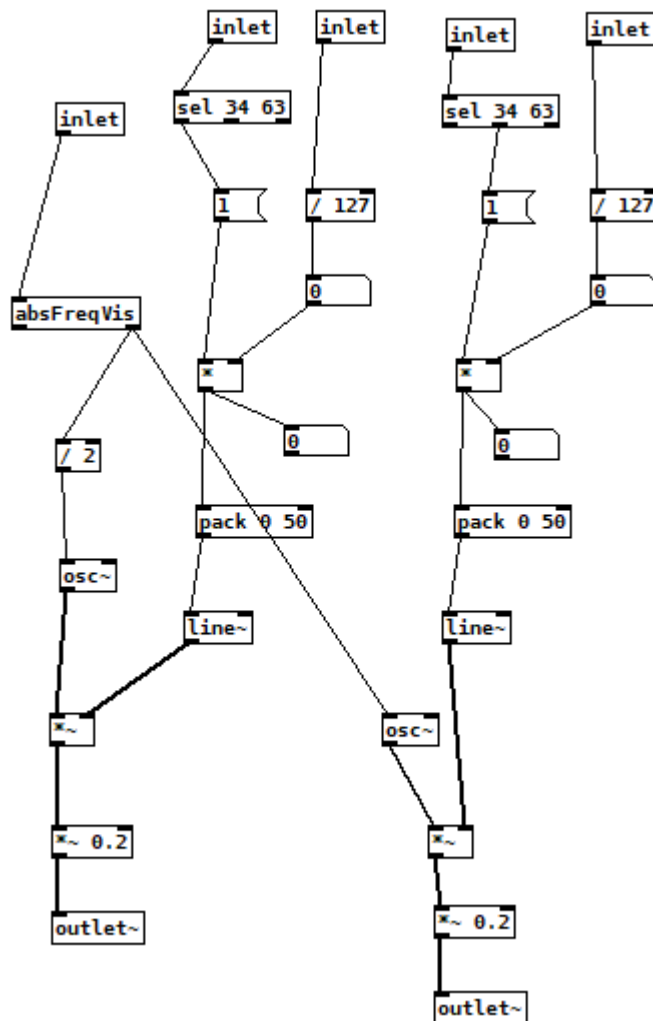
Obr. 4-8: Pure Data patch *absFreqVis.pd*

Na obrázku (Obr. 4-8) lze vidět tento patch. Objekt *inlet* funguje jako vstup a *outlet* tedy jako výstup. Na *inlet* je později napojen tok *control change* zpráv. Patch funguje tak, že pro každou *control change* zprávu, která přijde na *inlet* je spuštěn *multi bang*, což je impuls, který aktivuje další objekty, kterými jsou čísla: úplně vlevo je hodnota základní frekvence „světelné stupnice“ v THz (384), vedle je pak hodnota základní referenční frekvence „tónové stupnice“ v Hz. Jelikož Pure Data nemá operaci k odmocnění, bylo nutné zapsat $^{126}\sqrt{2}$ jako $2^{\frac{1}{126}}$, což mi dovolilo použít objekt *pow* (mocnina – power). Tuto konstantu je nutné umocnit ještě jednou pomocí dalšího objektu *pow*, kdy umocňuji na aktuální hodnotu příchozí *control change* zprávy. Výsledkem této operace pak násobím základní referenční hodnoty frekvencí a na levý výstup pak je přivedena hodnota aktuálně zvolené frekvence spektrální barvy v THz a na pravý ekvivalentní frekvence v Hz.

Oscstrig~.pd

Tlačítka a přepínače mají u nástroje primárně funkci aplikování amplitudové obálky na odpovídající oscilátor. Tlačítka spouštějí oscilátor jako klávesy, to znamená, že tón je znělý po dobu stisku, zatímco přepínače se do původního stavu samy nevrací, zní jejich tón kontinuálně dokud není „vypnut.“ Aby byla funkce těchto dvou prvků

odlišná, rozhodl jsem se nastavit patch tak, aby přepínače spouštěly tón o oktávu nižší než tlačítka, čímž dostávají funkci doprovodnou pro hraní akordů nebo nízkých padů nebo dronů.



Obr. 4-9: Pure Data patch *ostrig~.pd*

Patch *ostrig~.pd* (viz Obr. 4-9) má pět vstupů (zleva): pro *control change* zprávu, pro hodnotu *note on* nebo *note off* zprávy, kterou posílají přepínače, pro *velocity* těchto zpráv, a to samé pro zprávy posílané tlačítka.

Control change zprávy jsou zpracovány subpatchem *absFreqVis.pd*, na jehož pravém výstupu je frekvence oscilátoru, ta je napojena na samotný oscilátor (objekt *osc~*), kdy jedna větev obsahuje operaci dělení dvěma, aby jeden z oscilátorů hrál o oktávu níž. Další dvě větve fungují jako generátory obálky. Když je stisknuta klávesa nebo přepnutý vypínač, její hodnota *velocity* (která je vždy 0 nebo 126) vydělena 127, tak, aby hodnota byla 0 nebo 1. Tímto číslem je aktivován objekt *pack*, který na výstupu má dvě čísla, která jsou přivedena na vstup objektu *line~*, který generuje lineární přechod mezi dosavadní a novou hodnotou v čase, který

udává druhé číslo vstupu v milisekundách (v tomto případě 50 ms). Tento signál je pak zkombinován s výstupem oscilátoru pomocí objektu `*~`, který násobí dva audio signály.

Polyphonic~

Subpatch `polyphonic~.pd` pouze kombinuje abstrakci `osctrig~` se vstupy z MIDI tak, že jednotlivé kanály jsou samostatné a jejich výstupy pak jsou sloučené do dvou objektů `outlet`.

Freq_meter

Subpatch `freq_meter.pd` slouží k zobrazení konkrétně zvolené frekvence oscilátorů v Hz a zároveň k zobrazení ekvivalentní frekvence spektrální barvy v THz. K tomu slouží subpatch `absFreqVis.pd`, jehož výstupem je číslo, které je pak přivedeno na `number` objekt, který jej zobrazí. Dále je využita funkce `canvas`, která funguje tak, že vytvoří oblast, která se zobrazí při využití subpatche v jiném patchi a jakékoli objekty, které se nachází v této oblasti jsou zobrazeny. Do oblasti `canvas` jsou naskládány objekty `number`, přidány popisky a při zavolání tohoto subpatche se zobrazí tato „informační tabule.“ Zároveň tento objekt obsahuje výstupy, kterými lze ovládat frekvenci připojených oscilátorů.

Sequencer~

Sekvencer má tři módy: standartní sekvencer, který zahraje zvolené tóny v daném pořadí (zleva doprava), náhodný mód, který zvolené noty hraje náhodně, a polonáhodný mód, který opakuje náhodně vytvořenou sekvenci o délce osmi kroků. Základem sekvenceru je objekt `metro`, který v daném časovém intervalu vysílá na výstup impulsy (`bang`).

První část sekvenceru bere impuls z objektu `metro` a aktivuje jím objekt `float`, což je objekt, který uchovává číslo a v případě aktivace jej pošle na výstup, k tomuto objektu je připojena smyčka, která neustále přičítá jedničku. Dále se nachází objekt `mod`, který provádí operaci modulo tj. dělí číslem a na výstupu vyšle zbytek dělení. V tuto chvíli tedy dochází k opakovanému počítání od nuly to sedmičky. Tento signál je pak přiveden na společný objekt `sel`, který třídí hodnoty a vytváří `bang` na výstupu příslušným dané hodnotě. `Bang` spouští objekty `makenote`, které posílají zprávu to subpatche `osctrig~.pd`.

Druhá část sekvenceru (náhodný výběr tónů) namísto objektu `float` má jen objekt `random`, který vytváří pseudonáhodná čísla od 0 do $n-1$. V tomto případě má objekt parametr δ , který udává hodnotu n , takže objekt vytváří náhodná čísla od 0 do 7. Výstup tohoto objektu je přiveden na společný `sel` objekt a proces je stejný jako v předchozí části.

Třetí (polo náhodný mód) je o něco komplikovanější. Jeho základem jsou ve skutečnosti dva sekvencery, jeden čistě náhodný, a druhý, který náhodně vytvořenou

sekvenci opakuje. Když je tento mód spuštěn, spustí se sekvence, která do osmi paměťových polí zapíše náhodná čísla, a po vyplnění všech polí se vypne a spustí se druhá sekvence, která z této paměti čte a tato čísla posílá do společného *sel* objektu.

Ostatní subpatche

Pro další drobné přidané funkce je součástí nástroje ještě několik subpatchů. *Sine_osc~.pd* a *saw_osc~.pd* jsou jednoduché oscilátory s ovládáním hlasitosti. Na vstup je přiveden signál s informací o frekvenci a výstupem je audio signál. *Octaver.pd* je jednoduchý převod frekvence o oktávu níž nebo výš. Je možné jej předřadit před oscilátor. A nakonec subpatch *StereoOut.pd* je zvukový výstup s vizualizací hlasitosti signálu.

SuperDuperRainbowThing~

Jde o hlavní patch, na kterém se nacházejí všechny zmíněné subpatche, které lze propojovat a kombinovat jejich funkce. Nevýhodou Pure Data je nutnost přecházet mezi editačním módem a standardním módem pro vytvoření propojení, která hráč potřebuje, a samotné ovládání modulů. Nicméně pro samotné hraní je nejdůležitější hardwarový ovladač, proto není mnoho prvků, které by vyžadovaly ovládání pomocí kurzoru.

5. PRAKTICKÉ VYUŽITÍ NÁSTROJE

Základní aplikace nástroje je samostatná hra. Po zapojení všech součástí má hráč k dispozici dva ovládací prvky: ovládací panel a grafické rozhraní Pure Data na obrazovce počítače. Pomocí hlavního panelu lze ovládat frekvence jednotlivých kanálů a spouštění oscilátorů, zpětnou vazbu ve formě barevného světla. Pomocí grafického rozhraní Pure Data lze ovládat sekvencér a připojovat další jednoduché moduly (oscilátory, jednoduchý oktáver a generátor šumu s pásmovou propustí). Zpětnou vazbou je pak samozřejmě generovaný zvuk a zobrazené hodnoty frekvencí (světla i zvuku).

Jedním ze způsobů hry je vizualizace stupnic. Počet kanálů je výhodný pro vizualizace osmi tónových stupnic. Zejména církevních modů počínajících tónem F. Po nastavení stupnice pak lze hrát melodie pomocí tlačítek za podkladného doprovodu níže znějících oscilátorů. Příliš rychlá změna akordů hraných pomocí přepínačů není snadná, spíše se tedy hodí pro vytváření harmonických dlouho znějících dronů případně výměnu akordů postupně rozváděním jednotlivých hlasů. Omezením v tomto případě je rozsah nástroje. Jelikož je rozsah barevného spektra pouze jednu oktávu, je jakékoli vedení melodického hlasu omezené jen na tento rozsah.

Kde se však vizualizační nebo sonifikační vlastnost projevuje nejvíc, je při přeladování nástroje během hry. Při naladění jedné stupnice a následném hraní, hráč snadno zapomene, že k tónům patří i barvy, ale při aktivním přeladování se tento fakt stává součástí hry mnohem více. Při vytváření zvukových kompozic jsem mnohem více vnímal harmonii barevnou, a to, jak se projevuje v harmonii hudební. V širší harmonii jsou tyto vztahy velmi znatelné, v užších intervalech se projevují záněže, které jsou zajímavé zvukově, ale barevně se příliš neprojevují. Nicméně i tak byla souvislost mezi hudební a barevnou harmonií znatelná. Zejména v tom, jaké souzvučky se tvoří mezi barvami rozdílného kontrastu. Obecně se dá říci, že čím pestřejší je paleta barev, tím širší a výraznější harmonii hudební jsem vnímal.

Pro rozšíření zvukového projevu jsem nástroj použil jako součást modulárního systému. Sekvenceru nástroje jsem přidal funkci generování hodinového signálu a pomocí programu loopMIDI jej propojil s virtuálním modulárním syntezátorem VCV Rack. V něm jsem vytvořil patch pro vytváření rytmických sekvencí jako hodinový signál jsem použil periodický MIDI signál generovaný sekvencérem v Pure Data, díky tomu jsem byl schopen ovládat rychlost sekvencí v Pure Data i VCV Rack zároveň. Kombinace sekvenceru nástroje s externím rytmickým sekvencérem velkým dílem obohatila možnosti nástroje a zvukový dosah. A dílem tato metoda přispěla i k multimediálnímu prožitku.

Za zmínku stojí i využití samostatných modulů v Pure Data patchi. Vytvořil jsem čtyři druhy: dva oscilátory (sinus a pilový signál), oktáver a generátor šumu, na který je aplikován pásmová propust. Tyto oscilátory obsahují vlastní VCA, takže je

nutné je pomocí myši ovládat. Použil jsme je zejména pro zvýraznění konkrétního kanálu. Přidáním oscilátoru na konkrétní frekvenci je samozřejmě daný kanál výraznější a je například při spuštění sekvencéru možné lehce ovládat harmonické vyznění melodie pomocí změn v jednom či více krocích sekvencéru. Pro další ozvláštňení zvuku jsem použil generátor šumu. Ten obsahuje fader, kterým je ovládána šířka pásmové propusti a frekvence filtru je ovládána frekvencí kanálu. Jednak se tímto způsobem kanál zvýrazní zejména při změnách frekvence, ale také vytváří širší a spojitější spektrum výsledného zvuku.

Osobně bych za nejzajímavější označil sonifikaci barevné harmonie, generováním signálů odpovídajících kontrastním barvám, protože jde o způsob, jak experimentovat s vlastnostmi barev za použití zvuku. Další pro mne zajímavou aplikací bylo vytváření kompozic za pomoci sekvencérů a možností nástroje vytvářet zvukově husté drony. Propojení dobře známých vlastností zvuku s vlastnostmi barevného spektra vytváří zajímavou rovinu v možném přístupu k tvorbě zvuku.

Nástroj se během realizace oproti prvním návrhům samozřejmě změnil, ale základní koncepce a záměr byly zachovány. Jak již bylo zmíněno v kapitole o návrhu zařízení, je nástroj navržen a realizován tak, aby jej bylo možno rozšířit o případné rozšiřující funkce. Komunikační standart MIDI sice některé prvky nástroje lehce omezil (jako například množství znělých frekvencí), ale v případě nutnosti doplnění funkcí je naopak velmi snadné vytvořit ovládací prvky pro přídavné funkce. Jendou z nevýhod nástroje, kterou vnímám při hře je malá interaktivita světelné soustavy. Základní funkce – tedy změna barvy v závislosti na otáčení potenciometrem bez znatelného zdržení – je zachována, nicméně by pocitu interaktivity v mnohém pomohly větší možnosti ovládání světla a reakce charakteru jejich rozsvícení v závislosti na hře. Další možností vylepšení nástroje by byla větší kompaktnost nástroje. Z důvodu nekompatibility Pure Data s MIDI ovladačem nebylo možné realizovat nástroj jako samostatné zařízení. Tato komplikace ovšem vytvořila podmínky pro vytvoření grafického rozhraní, díky kterému bylo snazší rozšířit zvukové vlastnosti nástroje díky grafickému rozhraní Pure Data. Další výhodou, kterou nutnost propojení s PC přineslo je možnost propojení nástroje s jinými softwarovými nebo hardwarovými zařízeními. Jak bylo zmíněno výše, Nástroj je schopen posílat jednoduchý hodinový signál do dalších nástrojů. Z důvodu, že znělé frekvence jsou v případě tohoto nástroje velmi konkrétní, a z důvodu, že nástroj pracuje s MIDI zprávami nekonvenčně, bylo by efektivnější vytvořit místo MIDI výstupu audio výstup pro každý kanál zvlášť pro další práci se zvukem nástroje samotným, jako například aplikace efektů a podobně.

6. ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byla přiblížena problematika vnímání barev z fyziologického hlediska, základní barevné modely a jejich podstata a omezení. Metody zobrazování barev jsou úzce spjaté se podstatou vnímání elektromagnetického záření lidským zrakem. Barevné spektrum, které vzniká rozložením bílého světla, bylo známo už od antiky, ale uspokojivě byl tento vztah a podstata barev jako kombinace tří barev základních vysvětlen až v 19. století. Z tohoto vychází i uspořádání barev do barevných prostorů zejména CIElab, z něhož jsou pak odvozeny prostory RGB. Hraniční část prostoru CIElab tvoří barvy spektrální, které jsou tvořeny zářením o velmi úzkém spektru nebo přímo jednou frekvencí a jedná se o odstíny, které vidíme právě rozkladem bílého světla.

Po popisu lidského sluchu a úvodu do problematiky hudebních ladění a stupnic byly popsány způsoby mezi smyslového vnímání a jeho projevy v běžné populaci i jevy méně časté jako například Synestézie. Jde o jev, kdy jedinec naprosto samovolně a soustavně vnímá propojení smyslových vjemů. Zmínil jsem skladatele Alexandra Skrjabina, který o sobě tvrdil, že synestezii měl a vkládal tyto své prožitky do své hudby.

Poslední část teoretického úvodu se zabývala problematikou sonifikace, což je proces vyjádření nezvukové informace zvukem (vyjma lidské řeči). Zmínil jsem několik příkladů sonifikačních zařízení z přelomu 20. a 21. století.

Dále jsem se zabýval návrhem zařízení. Princip nástroje spočívá v sonifikaci barev, podobně jako u projektu Eyeborg, ve vytvoření hudební stupnice odpovídající barevnému spektru. Napomáhá tomu fakt, že šířka barevného spektra je přibližně jedna oktáva, a proto je možné transponovat frekvence spektrálních barev do slyšitelného spektra a vytvořit ladění, které barvám odpovídá. Samotný nástroj je tvořen ovládacím panelem, který zobrazuje sonifikované barvy a ovládá softwarový syntezátor, který barvy sonifikuje podle pevně daného převodu, který spočívá právě v transponování „barevné oktávy“. Ovládací panel je tvořen mikrokontrolerem Arduino a počítačem Raspberry Pi, a softwarový syntezátor je vytvořen v prostředí Pure Data. Všechny části nástroje spolu komunikují pomocí standardu MIDI. Další část se zabývá realizací nástroje. Je popsáno propojení jednotlivých komponent a princip jejich fungování. Jsou popsány jednotlivé části syntezátoru a způsob jakým byly opomenuty konvence standardu MIDI, aby bylo tuto technologii možné použít v této konkrétní aplikaci.

V poslední části byly popsány mé osobní poznatky nabyté hrou na finální verzi nástroje a mé zhodnocení, jak se nástroj liší oproti finální koncepci. Cíl sonifikovat barvy, tak, aby bylo možné zkoumat paralely mezi barevnou a hudební harmonií byl splněn. Hráč je schopen s vědomím tohoto cíle (a v zásadě i bez něj) nástroj použít svobodně tak, aby nejen tyto vztahy sonifikoval, ale aby také tvořil zvukové

kompozice založené na těchto poznacích. Záměru vytvořit samostatné ucelené zařízení se mi podařit nedosáhlo, proto musí být ovládací panel propojen s PC, kde je spuštěno prostředí Pure Data. Nicméně tento nezdar znamená, že je snadné propojit nástroj s jinými softwarovými nástroji. Popsal jsem propojení se softwarovým modulárním syntezátorem VCV Rack. Využití open source platforem Arduino, Raspberry Pi a Pure Data dovoluje široké možnosti budoucích rozšíření pro různé aplikace, jako například multimediální instalace, audiovizuální díla, nebo tvorbu hudebních a zvukových kompozic inspirovaných barevnou harmonií. Nabízí se možnost využití nástroje ve výuce výtvarných oborů nebo přírodních věd, pro živá vystoupení nebo studiové hudební a zvukové produkci.

Seznam literatury

- [1] FASSATI, Tomáš. *Praktická vizuální komunikace: učebnice druhé gramotnosti*. [Benešov: Muzeum umění a designu, 2012]. ISBN 978-80-87400-09-8
- [2] JANČOVIČ, Adam. *Vnímání barev* [online]. Brno, 2005 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/publikace/jancovic1.html>. Diplomová práce. Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí práce RNDr. Jindřiška Svobodová, Ph.D.
- [3] *Fotoelektrický jev*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotoelektrický_jev
- [4] PARRAMÓN, José. *Teorie Barev*. Praha: Svojtka a Vašut, 1995. ISBN 80-7180-046-5.
- [5] TAYLOR, Angie. *Design Essentials for the Motion Media Artist: A practical guide to principles and techniques*. Oxford, UK: Elsevier, 2011. ISBN 978-0-240-81181-9.
- [6] PIHAN, Roman. *BAREVNÝ MODEL L*A*B*. Fotoroman.cz [online]. 2011 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: http://www.fotoroman.cz/glossary/3_lab.htm
- [7] SKALA, Václav. *Světlo, barvy a barevné systémy v počítačové grafice*. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-200-0463-7
- [8] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. Praha: Akademie múzických umění, 2003. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 80-7331-901-2. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:41800280-7178-11e4-8991-005056827e51>
- [9] PAŘÍZEK, Petr. *Elektronická kompozice: cesta k propojení sonických a akordických prvků v hudbě*. V Brně: JAMU, 2017. Výběrová řada doktorských spisů. ISBN 978-80-7460-119-4.
- [10] JAEKL, Phillip. *Why We Hear Voices in Random Noise*. Nautilus [online]. 2017 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://nautil.us/blog/why-we-hear-voices-in-random-noise>
- [11] *Synestézie* Psychologiechaosu.cz [online]. [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.psychologiechaosu.cz/syntezie/>

- [12] HONZÁK, Radkin. *Chuť tónu, barva čísla; Synestezie – dar, o němž se moc nemluví: Smysly neoddělitelně propojené*. Vesmír.cz [online]. 2009, 10. 12. 2009 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2009/cislo-12/chut-tonu-barva-cisla-synestezie-dar-nemz-se-moc-nemluvi.html>
- [13] WARD, Jamie, Brett HUCKSTEP a Elias TSAKANIKOS. *Sound-colour synaesthesia: to what extent does it use cross-modal mechanisms common to us all?* [online]. London UK [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: http://cogprints.org/6268/1/Cortex_sound-colour_Synaesthesia.pdf. Univesity College London.
- [14] RAMACHANDRAN, V.S. a E.M. HUBBARD. *Synaesthesia: A Window Into Perception, Thought and Language* [online]. San Diego, 2001 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://cbc.ucsd.edu/pdf/Synaesthesia%20-%20JCS.pdf>
- [15] NICHOLLS, Simon. *Aleksandr Nikolaevich Scriabin: A short biography* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.scriabin-association.com/scriabin-biography/>
- [16] *Fuga*. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fuga>
- [17] HAMILTON-FLETCHER, Giles, Michele MENGUCCI a Francisco MEDEIROS. *Synaestheatre: Sonification of Coloured Objects in Space* [online]. University of Sussex, Brighton, UK, 2016 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://users.sussex.ac.uk/~thm21/ICLI_proceedings/2016/Practical/Installations/102_Hamilton-Fletcher_et_al_-_Paper_and_Installation_Submission.pdf
- [18] QI, Mengcheng a Ryan LAND. *Instrument-Based Color Sonification with the PIC32* [online]. Cornell University, 2015 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/f2015/crl233_mq58/crl233_mq58/crl233_mq58/index.html
- [19] KIRKHAM, Sophie. *Hear The Rainbow: An Interactive and Emotive Sonification of a 3 Dimensional Colour Space* [online]. 2015 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://munsell.com/color-blog/hear-the-rainbow-color-sound/>
- [20] LABOROVÁ, A. *Experimentální softwarový hudební nástroj řízený změnou intenzity světla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. MgA. Mgr. Dan Dlouhý, Ph.D..

- [21] Neil Harbisson. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Neil_Harbisson
- [22] *En un xip Multicolor* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/embed/Rk041s6Nnk0>
- [23] NEELY, Adam. *New Horizons in Music: Polyrhythms* [online]. In: . 5.3.2018 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=JiNKlhspdKg>
- [24] TAYLOR, Angie. *Design Essentials for the Motion Media Artist: A practical guide to principles and techniques*. Oxford, UK: Elsevier, 2011. ISBN 978-0-240-81181-9.
- [25] SCHIMMEL, Jiří. *Studiová a hudební elektronika* [online]. 2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015 [cit. 2019-05-18]. ISBN 978-80-214-4452-2. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=137497>
- [26] *MIDI Manufacturers Association (MMA) Adopts New MIDI Polyphonic Expression (MPE) Enhancement to the MIDI Specification*. Midi.org [online]. Los Angeles [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.midi.org/articles/midi-polyphonic-expression-mpe>
- [27] HAVERKAMP, Michael. *Look at that sound!: visual aspects of auditory perception* [online]. III Congreso Intyernacional de Sinestesia, Ciencia y Arte. Granada, 2009 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.michaelhaverkamp.de/Look%20at%20sound%20M%20Havekamp.pdf>
- [28] Arabic Maqam. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Arabic_maqam

Obrázky

- [29] [Obr. 2-2] *ElmgSpektrum.png* [online]. In: . 2007 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:ElmgSpektrum.png#file-links>
- [30] [obr. 2-4] *Cone spectral sensitivities.png* [online]. In: . 2008 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cone_spectral_sensitivities.png

- [31] [Obr. 2-5] NEWTON, Isaac. *Opticks* [online]. In: . 2018(1704) [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Newton's_colour_circle.png
- [32] [Obr. 2-6] VON GOETHE, Johann Wolfgang. [online]. In: . 1809 (2008) [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Goethe,_Farbenkreis_zur_Symbolisierung_des_menschlichen_Geistes-_und_Seelenlebens,_1809.jpg
- [33] [Obr. 2-7] KWAMIKAGAMI. *Color star-en (tertiary names).svg* [online]. In: . 2015 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Color_star-en_\(tertiary_names\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Color_star-en_(tertiary_names).svg)
- [34] [Obr. 2-8] VISSCHER, Marti O. *RGB-Color-Model-and-CIE-Lab-Color-space.png* [online]. In: . 2010 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/RGB-Color-Model-and-CIE-Lab-Color-space_fig3_41669565
- [35] [Obr. 2-9] *A "light" summary of color* [online]. In: . 2014 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://designblog.rietveldacademie.nl/?p=35944>
- [36] [Obr. 2-10] SKALA, Václav. Světlo, barvy a barevné systémy v počítačové grafice. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-200-0463-7
- [37] [Obr. 2-11] SHARKD. *CMYK subtractive color mixing.svg* [online]. In: . 2017 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CMYK_subtractive_color_mixing.svg
- [38] [Obr. 2-12] LEVESQUE, Dan. That 'Face on Mars' Thing is Total B.S. In: *Death by Cosmos* [online]. EBB Media, 2016 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://deathbycosmos.com/the-face-on-mars/>
- [39] [Obr. 2-15] Scriabin-Circle.svg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2011 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scriabin-Circle.svg>

Další zdroje














- [40] *Pure Data* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://write.flossmanuals.net/pure-data/>
- [41] BJØRNDALLEN, Ole Martin. *Mido: MIDI objects in Python* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://mido.readthedocs.io/en/latest/>

- [42] PIETER, P. *MIDI_controler* [online]. In: . [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://github.com/ttapa/MIDI_controller
- [43] DICOLA, Tony. *NeoPixels on Raspberry Pi* [online]. Adafruit Industries, 2018 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/neopixels-on-raspberry-pi.pdf?timestamp=1543321219>














Seznam obrázků

Obr. 2-2 Vizualizace částí spekter elektromagnetického záření.....	9
Obr. 2-4: Spektrální citlivost čípků	11
Obr. 2-5: Barevný kruh podle Isaaca Newtona	12
Obr. 2-6: Goetheho symetrický barevný kruh	13
Obr. 2-7: Znázornění modelu RYB do formy hvězdice	14
Obr. 2-8: Grafické znázornění CIELAB barevného prostoru v ploše s vyznačeným gamutem RGB prostoru(vlevo) a v trojrozměrném prostoru (vpravo).....	15
Obr. 2-9: Znázornění principu aditivního barevného modelu RGB (barvy červená, zelená a modrá nabývají hodnot od nuly do jedné).	16
Obr. 2-10: Průběhy trichromatických činitelů	17
Obr. 2-11: Substraktivní model CMY	18
Obr. 2-12: Slavná "tvář z Marsu". Snímek sondy Viking 1 z roku 1976(vpravo dole) a snímek sondy Mars Global Surveyor z roku 2001.	23
Obr. 2-13: Příklad rozdílu vztahů vjemů tónů a barev mezi synestetiky(nahoře) a kontrolní skupinou(dole)	25
Obr. 2-14: Obrázky použité ve studii Wolfganga Köhlera z roku 1929 i v zopakovaném výzkumu z roku 2001	25
Obr. 2-15: Znázornění Skriabinova synestetického systému.	28
Obr. 3-1:Obecné schéma nástroje.....	37
Obr. 3-2:Blokové schéma zapojení Arduina	37
Obr. 3-3:Schéma vnitřního softwarového propojení Raspberry Pi	38
Obr. 3-4: zjednodušené schéma multiplexeru HC4051	38
Obr. 3-5:Reálné rozložení pinů Multiplexeru HC4051	39
Obr. 3-6: Hlavní část kódu pro Arduino	41
Obr. 3-7:Pouzdro diody WS2812.	43
Obr. 3-8:Pure Data patch absFreqVis.pd.....	49
Obr. 3-9: Pure Data patch osc trig~.pd	50

Příloha 1 - Tabulky

tóny a ekvivalentní barvy pro chromatickou stupnici v dydimickém ladění							
Fb[THz]	hudební interval	poměr k primě	Fz[Hz]	R	G	B	barva
384	1	1,00000	349,246	96	0	0	
409,60	m2	1,06667	372,529	198	0	0	
432,00	v2	1,12500	392,9017	255	0	0	
460,80	m3	1,20000	419,0952	255	0	0	
480,00	v3	1,25000	436,5575	255	101	0	
512,00	4	1,33333	465,6613	255	237	0	
537,60	d5	1,40000	488,9444	186	255	0	
576,00	5	1,50000	523,8689	56	255	0	
614,40	m6	1,60000	558,7935	0	248	255	
640,00	v6	1,66667	582,0766	0	162	255	
682,67	m7	1,77778	620,8817	10	0	255	
720,00	v7	1,87500	654,8362	115	0	242	
768,00	8	2,00000	698,4919	122	0	142	

Tab. 6-1: Tóny a ekvivalentní barvy pro chromatickou stupnici v dydimickém ladění

Tóny a ekvivalentní barvy pro chromatickou stupnici v rovnoměrně temperovaném ladění							
Fb[THz]	interval v půltónech	poměr k primě	Fz[Hz]	R	G	B	barva
384	0	1,00000	349,246	96	0	0	
406,8338	1	1,05946	370,0132	187	0	0	
431,0254	2	1,12246	392,0153	255	0	0	
456,6555	3	1,18921	415,3258	255	0	0	
483,8097	4	1,25992	440,0223	255	121	0	
512,5785	5	1,33484	466,1874	255	237	0	
543,058	6	1,41421	493,9084	170	255	0	
575,3499	7	1,49831	523,2777	60	255	0	
609,562	8	1,58740	554,3934	0	255	240	
645,8084	9	1,68179	587,3594	0	142	255	
684,2102	10	1,78180	622,2856	15	0	255	
724,8955	11	1,88775	659,2886	120	0	232	
768	12	2,00000	698,4919	122	0	142	

Tab. 6-2: Tóny a ekvivalentní barvy pro chromatickou stupnici v rovnoměrně temperovaném ladění

dórský	aiolský	mixolydický	lydický
F	F	F	F
G	G	G	Gb
Ab	Ab	A	Ab
Hb	Hb	Hb	Hb
C	C	C	Cb
D	Db	D	Db
Eb	Eb	Eb	Eb

frygický	jónský	lydický
F	F	F
Gb	G	G
Ab	A	A
Hb	Hb	H
C	C	C
Db	D	D
Eb	E	E

Tab. 6-3: Církevní mody v dydimickém ladění a ekvivalentní barvy

CC	Fb[THz]	Fz[Hz]	R	G	B
1	384.00	349.25	96	0	0
2	386.12	351.17	105	0	0
3	388.25	353.11	114	0	0
4	390.39	355.06	122	0	0
5	392.54	357.02	135	0	0
6	394.71	358.99	143	0	0
7	396.89	360.97	151	0	0
8	399.08	362.96	158	0	0
9	401.28	364.96	166	0	0
10	403.49	366.97	177	0	0
11	405.72	369.00	184	0	0
12	407.95	371.03	191	0	0
13	410.20	373.08	198	0	0
14	412.47	375.14	204	0	0
15	414.74	377.21	214	0	0
16	417.03	379.29	221	0	0
17	419.33	381.38	227	0	0
18	421.64	383.48	236	0	0
19	423.97	385.60	242	0	0
20	426.31	387.73	248	0	0
21	428.66	389.86	255	0	0
22	431.03	392.02	255	0	0
23	433.40	394.18	255	0	0
24	435.79	396.35	255	0	0
25	438.20	398.54	255	0	0
26	440.62	400.74	255	0	0
27	443.05	402.95	255	0	0
28	445.49	405.17	255	0	0
29	447.95	407.41	255	0	0
30	450.42	409.65	255	0	0
31	452.90	411.91	255	0	0
32	455.40	414.18	255	0	0
33	457.91	416.47	255	0	0
34	460.44	418.77	255	0	0
35	462.98	421.08	255	0	0
36	465.53	423.40	255	14	0
37	468.10	425.74	255	30	0
38	470.68	428.08	255	50	0
39	473.28	430.45	255	62	0
40	475.89	432.82	255	80	0
41	478.52	435.21	255	96	0
42	481.16	437.61	255	106	0
43	483.81	440.02	255	121	0

CC	Fb[THz]	Fz[Hz]	R	G	B	
44	486.48	442.45	255	131	0	
45	489.16	444.89	255	144	0	
46	491.86	447.34	255	158	0	
47	494.57	449.81	255	171	0	
48	497.30	452.29	255	179	0	
49	500.05	454.79	255	191	0	
50	502.80	457.30	255	203	0	
51	505.58	459.82	255	215	0	
52	508.37	462.36	255	223	0	
53	511.17	464.91	255	234	0	
54	513.99	467.47	255	245	0	
55	516.83	470.05	255	255	0	
56	519.68	472.64	245	255	0	
57	522.54	475.25	235	255	0	
58	525.43	477.87	229	255	0	
59	528.32	480.51	219	255	0	
60	531.24	483.16	209	255	0	
61	534.17	485.82	199	255	0	
62	537.12	488.50	189	255	0	
63	540.08	491.20	180	255	0	
64	543.06	493.91	170	255	0	
65	546.05	496.63	160	255	0	
66	549.07	499.37	150	255	0	
67	552.09	502.13	140	255	0	
68	555.14	504.90	130	255	0	
69	558.20	507.68	120	255	0	
70	561.28	510.48	110	255	0	
71	564.38	513.30	103	255	0	
72	567.49	516.13	89	255	0	
73	570.62	518.98	74	255	0	
74	573.77	521.84	63	255	0	
75	576.93	524.72	52	255	0	
76	580.12	527.61	40	255	0	
77	583.32	530.52	27	255	0	
78	586.54	533.45	7	255	0	
79	589.77	536.39	0	255	38	
80	593.02	539.35	0	255	77	
81	596.30	542.33	0	255	110	
82	599.58	545.32	0	255	141	
83	602.89	548.33	0	255	179	
84	606.22	551.35	0	255	206	
85	609.56	554.39	0	255	240	
86	612.92	557.45	0	251	255	
87	616.31	560.53	0	241	255	
88	619.71	563.62	0	228	255	

CC	Fb[THz]	Fz[Hz]	R	G	B
89	623.12	566.73	0	218	255
90	626.56	569.85	0	205	255
91	630.02	573.00	0	195	255
92	633.49	576.16	0	186	255
93	636.99	579.34	0	172	255
94	640.50	582.53	0	162	255
95	644.03	585.75	0	149	255
96	647.59	588.98	0	135	255
97	651.16	592.23	0	125	255
98	654.75	595.49	0	115	255
99	658.36	598.78	0	100	255
100	662.00	602.08	0	86	255
101	665.65	605.40	0	71	255
102	669.32	608.74	0	60	255
103	673.01	612.10	0	43	255
104	676.72	615.48	0	30	255
105	680.46	618.87	0	10	255
106	684.21	622.29	15	0	255
107	687.98	625.72	27	0	255
108	691.78	629.17	45	0	255
109	695.60	632.64	57	0	255
110	699.43	636.13	63	0	255
111	703.29	639.64	78	0	255
112	707.17	643.17	88	0	255
113	711.07	646.72	99	0	255
114	714.99	650.28	108	0	252
115	718.94	653.87	114	0	244
116	722.90	657.48	118	0	236
117	726.89	661.10	122	0	227
118	730.90	664.75	125	0	219
119	734.93	668.42	127	0	213
120	738.99	672.11	129	0	202
121	743.06	675.81	130	0	194
122	747.16	679.54	131	0	186
123	751.28	683.29	130	0	177
124	755.43	687.06	129	0	169
125	759.60	690.85	127	0	159
126	763.79	694.66	125	0	150
127	768.00	698.49	122	0	142

Tab.6-4: Jednotlivé frekvence spektrálních barev i znělého ladění nástroje

Příloha 2 - Pure Data patch

THz	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Hz	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

octaver			octaver		
UP	DirOut	DOWN	UP	DirOut	DOWN

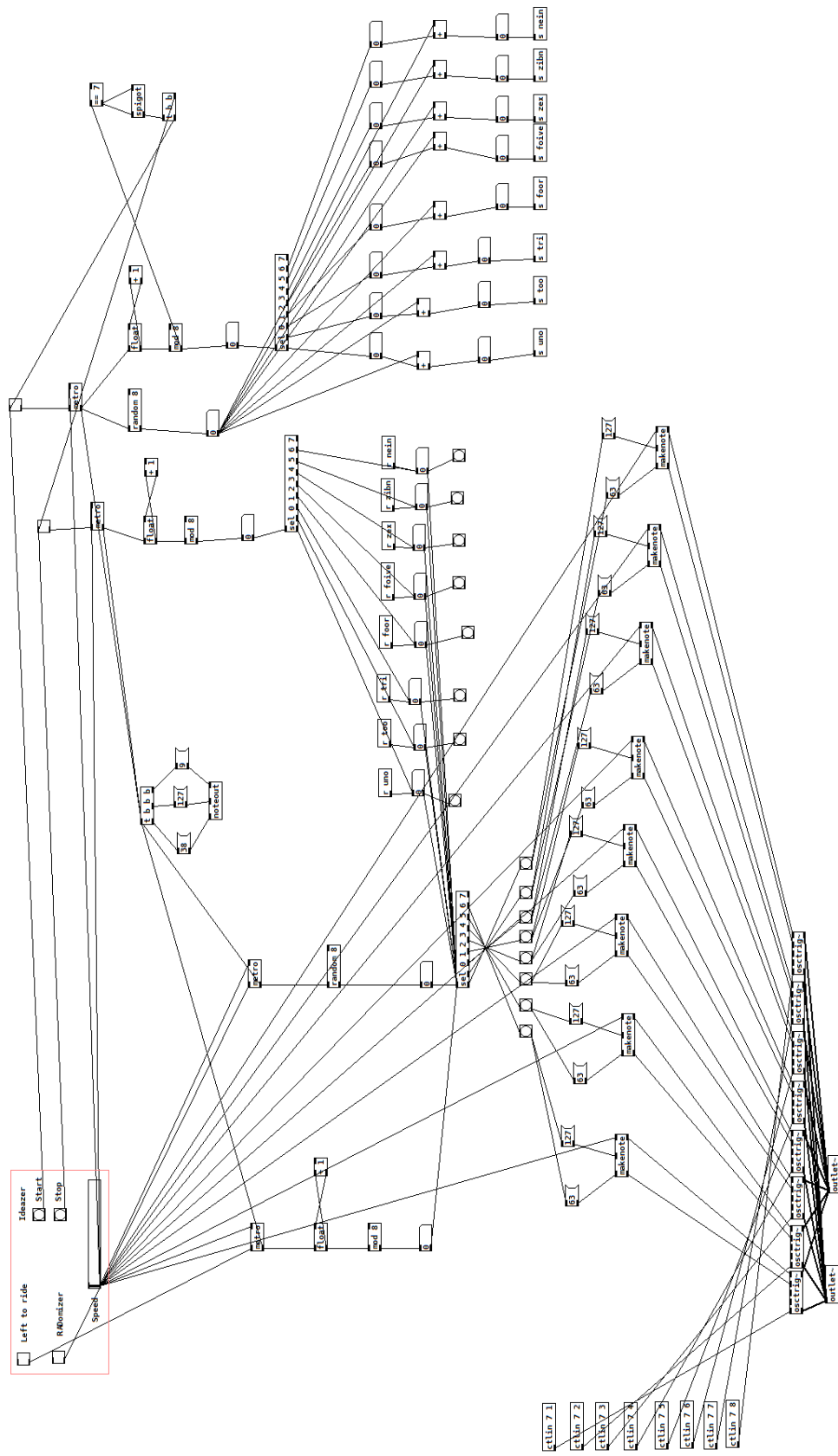
Sine	<input type="text"/>	Sine	<input type="text"/>
Saw	<input type="text"/>	Saw	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> NOIZ	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> NOIZ	<input type="text"/>

<input type="checkbox"/> Left to ride	Ideazer
<input type="checkbox"/> RAdomizer	<input checked="" type="checkbox"/> Start
	<input checked="" type="checkbox"/> Stop
Speed	<input type="text"/>

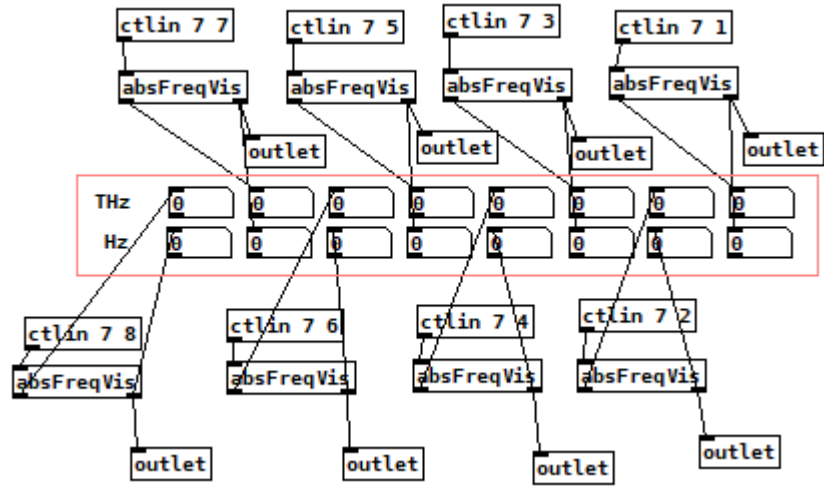
polyphonic~

<input type="text"/>	>+12	<input type="text"/>
<input type="text"/>	+6	<input type="text"/>
<input type="text"/>	+2	<input type="text"/>
<input type="text"/>	-0dB	<input type="text"/>
<input type="text"/>	-2	<input type="text"/>
<input type="text"/>	-6	<input type="text"/>
<input type="text"/>	-12	<input type="text"/>
<input type="text"/>	-20	<input type="text"/>
<input type="text"/>	-30	<input type="text"/>
<input type="text"/>	-50	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<-99	<input type="text"/>

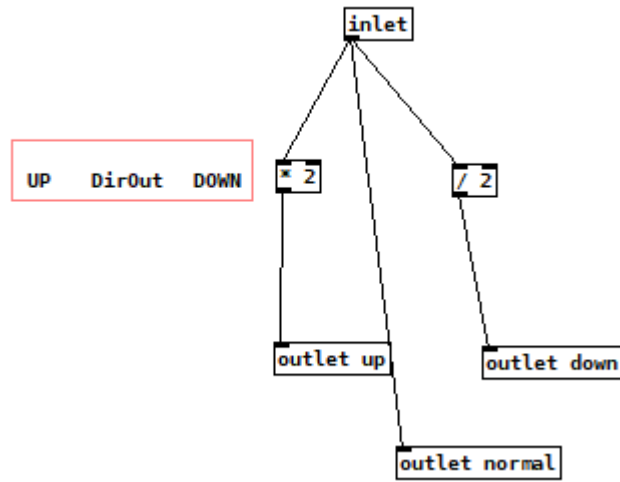
Obr. 6-1:SDRT.pd



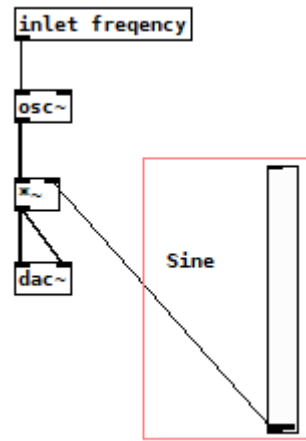
Obr. 6-2: Sequencer~.pd



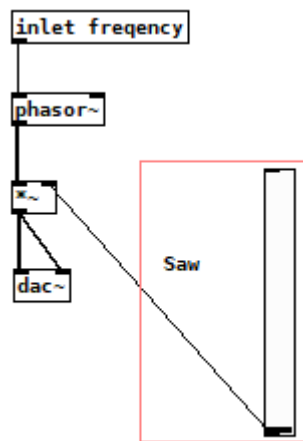
Obr. 6-2: Freqmeter.pd



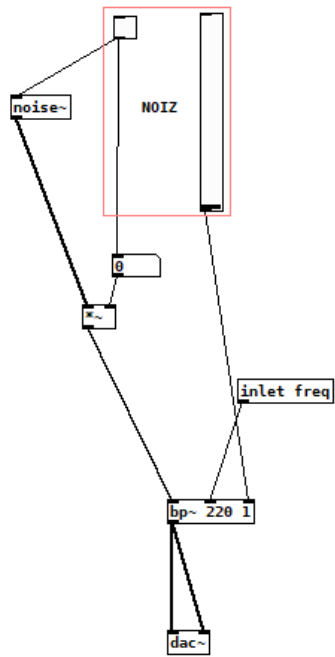
Obr. 6-3: Octaver.pd



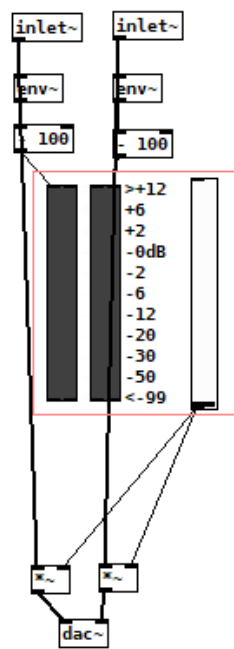
Obr. 6-4: Sine~.pd



Obr. 6-5: Saw~.pd



Obr. 6-6: Bandfil~.pd



Obr. 6-7: StereoOut~.pd

Příloha 4 - Finální podoba nástroje



