



**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 MECHANICKO-ELEKTRICKÝ  
HUDEBNÍ NÁSTROJ ŘÍZENÝ FREKVENČÍ ZMĚN  
INTENZITY SVĚTLA**

EXPERIMENTAL ELECTRO-MECHANICAL MUSICAL INSTRUMENT CONTROLLED BY THE  
FREQUENCY OF LIGHT INTENSITY CHANGES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Karel Benko**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**

specializace Zvuková produkce a nahrávání

Ústav telekomunikací

**Student:** Karel Benko

**ID:** 203620

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj řízený frekvencí změn intenzity světla

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a zkonstruovat experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj; experimentálnost spočívá v neobvyklé konstrukci a způsobu tvorby zvuku na základě optoelektrického principu včetně možnosti využití mikrointervalového ladění. V rámci bakalářské práce student nástroj kompletně realizuje na základě návrhu, provedeného v semestrální práci.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] GUŠTAR, M. Elektrofony I. Uvniť, Praha, 2006. ISBN 978-80-239-8446-0.
- [2] GUŠTAR, M. Elektrofony II. Uvniť, Praha, 2008. 518s. ISBN 978-80-239-8447-7.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 8.6.2020

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

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

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Cílem bakalářské práce je navrhnout a realizovat experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj, konkrétně na základě optoelektrického principu. Nástroje bude disponovat širokou škálou ovládacích prvků s možností mikrointervalového ladění i hry. Výsledný zvuk je možné upravovat například integrovaným generátorem obálky.

## **Klíčová slova**

Experimentální elektromechanický fotoelektrický hudební nástroj

## **Abstract**

The purpose of the bachelor thesis is to design and implement an experimental mechanical-electrical musical instrument, specifically on the basis of the optoelectric principle. The instrument will have a wide range of controls with the possibility micro-interval tuning and playing. The resulting sound can be adjusted, for example, with the integrated envelope generator.

## **Keywords**

Experimental electro-mechanical photoelectric musical instrument

## **Bibliografická citace:**

BENKO, Karel. Experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj řízený frekvencí změn intenzity světla [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125875>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Dan Dlouhý.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma *Experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj* 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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:

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. MgA. Mgr. Danovi Dlouhému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

.....  
podpis autora

# Obsah

Úvod.....	8
1. Teoretický úvod.....	9
1.1 Dělení nástrojů.....	10
1.1.1 Elektrofony .....	10
1.2 Historie fotoelektrických nástrojů .....	12
1.3 Vlastnosti zvuku .....	12
1.3.1 Harmonické průběhy.....	13
1.3.2 Neharmonické průběhy .....	15
1.4 Princip fotoelektrických nástrojů.....	16
1.4.1 Části nástroje.....	16
2. Návrh fotoelektrického nástroje .....	21
2.1 Koncept.....	21
2.1.1 Jednotlivé částí nástroje .....	21
2.1.2 Návrh a rozložení .....	25
Závěr .....	34
Literatura.....	35
Seznam příloh .....	36

## Seznam obrázků

Obr. 1.1: Průběh a frekvenční spektrum usměrněného sinového průběhu [4] .....	14
Obr. 1.2: Průběh a frekvenční spektrum obdélníkového průběhu [4] .....	14
Obr. 1.3: Průběh a frekvenční spektrum pulzního průběhu [4] .....	14
Obr. 1.4: Průběh a frekvenční spektrum trojúhelníkového průběhu [4] .....	15
Obr. 1.5: Průběh a frekvenční spektrum pilového průběhu [4] .....	15
Obr. 1.6: Diagram zapojení obecného fotoelektrického nástroje .....	16
Obr. 1.7: Diskové clony ze <i>Superpiana</i> (dvojce vlevo) a <i>Rythmiconu</i> (dvojce vpravo) [] .....	18
Obr. 2.1: Diagram zapojení fotoelektrických snímačů .....	22
Obr. 2.2: Diagram zapojení LED diod .....	22
Obr. 2.3: Návrh clony pro 3D tisk a návrh možných druhů průběhů .....	23
Obr. 2.4: Diagram zapojení DC a krokového motoru .....	24
Obr. 2.5: Umístění komponentů z boku .....	25
Obr. 2.6: Rozmístění komponentů shora .....	25
Obr. 3.1: Kroky čtení dat z dotykové vrstvy .....	27
Obr. 3.2: 3D model clony o průměru 8 cm a 100 průzory .....	29
Obr. 3.3: Záznam průběhu generovaného signálu .....	29
Obr. 3.4: Schéma zapojení řídicího čipu krokového motoru .....	30
Obr. 3.5: Zapojení tlačítkových spínačů .....	31
Obr. 3.6: Zapojení páčkových přepínačů .....	32
Obr. 3.7 Zapojení hlavních částí nástroje při jejich vývoji a testování .....	33
Obr. 3.8: Výroba těla nástroje .....	34



# Úvod

Experimentálních hudebních nástrojů či zvukových zdrojů je nespočetné množství a jejich počet se neustále rozšiřuje. Vytvořit nový nástroj je v dnešní době téměř nemožné, proto velká část, z již existujících získává různé úpravy. Za experimentální nástroj lze z jednoho pohledu považovat takový nástroj, který se jakkoliv vymyká, ať už uměleckým či technickým konvencím. Z pohledu druhého tak lze nazvat veškeré nástroje s atypickým zvukem, způsobem hry, tvarem či jiným originálním prvkem.

Tato práce se tedy zabývá návrhem a konstrukcí experimentálního mechanicko-elektrického hudební nástroje (zvukového zdroje) s využitím světelných snímačů a motorizovaných clon, tedy založeného na fotoelektrickém jevu. Z historického hlediska již vzniklo vícero nástrojů využívajících fotoelektrického jevu pro generování zvuku. Většina z nich však využívala klasické žárovky jako zdroj světla a fotoelektrického selenového snímače. V dnešní však době existují různé druhy snímačů, které jsou využity v navrhovaném nástroji spolu s využitím LED diod jako zdroje světla. Cílem práce tedy je nástroj s neobvyklým zvukem, avšak primárně způsobem interakce. Práce je strukturována do tří částí, kde první z nich pojednává o řazení nástrojů do kategorií podle způsobu generování zvuku a jejich specifických vlastností. Dále pak zvukovými vlastnostmi navrhovaného nástroje, a především pak nakonec jeho samotným principem fungování. Druhá část se věnuje vlastnímu návrhu a konstrukčnímu řešení nástroje, kdy třetí část referuje o jeho samotné realizaci a případných provedení úprav.

# TEORETICKÝ ÚVOD

## 1.1 Dělení nástrojů

Sachsova–Hornbostelova klasifikace hudebních nástrojů rozřazuje nástroje do několika základních skupin. Ty jsou zde uvedeny pro přesné zařazení experimentálního nástroje v této práci. Nástroje se dělí nejčastěji podle principu vytváření zvuku, a to na:

Chordofony – nástroje strunné

Areofony – nástroje dechové

Membranofony – nástroje blanzvučné

Idiofony – nástroje samozvučné

Hydrofony – nástroje vodozvučné

Elektrofony – nástroje elektrické [1]

### 1.1.1 Elektrofony

Elektrofony se dále dělí do podskupin na základě způsobu generování zvuku, a to na:

#### a) **Amplifikované**

Jedná se o klasické nástroje, které generují zvuk čistě mechanicky. Přidaný snímač či mikrofon zde slouží pouze pro zesílení či záznam zvuku. Příkladem může být akustická kytara se snímačem. [2]

#### b) **Mechanicko-elektrické**

Zde jsou to nástroje, které využívají snímačů nebo mikrofonů pro převod slabých mechanicky vznikajících zvuků do elektronické podoby, kde jej lze následně upravovat. Mezi tyto nástroje se řadí například elektrická kytara. [2]

#### c) **Elektromechanické**

Tyto nástroje vytváří zvuk ve formě elektrického kmitání, které ale vzniklo mechanickým pohybem. Princip generování zvuku u takovýchto nástrojů se dále dělí na:

- **Magnetofonické** – Tyto nástroje fungují na podobném principu jako nástroje elektromagnetické, avšak zde je signál generován pomocí čtecí hlavy snímající magnetické pásky. Příkladem takového nástroje je *Mellotron*. [2]

- **Elektrostatické** – Fungují podobně jako kondenzátorové mikrofony. Jako snímač je zde vzduchový kondenzátor, který se skládá z pevné a pohyblivé části. Kmitající částí je většinou pohyblivá elektroda, kdy při jejím pohybu dochází ke změně kapacity mezi elektrodami. Na tomto principu funguje například *Wurlitzer piano*. [2]
- **Elektromagnetické** – V případě elektromagnetických nástrojů dochází ke změně magnetického pole v blízkosti cívky, a tím k indukování napětí a proudu v cívce. Na tomto principu fungují například *Hammondovy varhany*, které pro generování zvuku využívají rotujících kovových ozubených kol, takzvaných *tone wheels*, v blízkosti cívek, kdy pohyb těchto kol mění magnetické pole cívky. [2]
- **Fotoelektrické** – Nástroje, které pro generování zvuku využívají fotoelektrického jevu, ať už u polovodičových snímačů, kde dochází k vnitřnímu, popřípadě vnějšímu fotoelektrickému jevu, tak i u elektroluminiscenčních diod, které světlo vyzařují a využívají fotoelektrického jevu inverzního. Tyto nástroje využívají nejčastěji rotační clony ve formě disku. Takovéto clony, nejčastěji celuloidové, měly průzory, ať už ve formě pravidelně či nepravidelně rozmístěných děr, tak i různých průběhů, které byly pořízeny fotograficky nebo byly kresleny ručně. Kromě nástrojů s klasickou klaviaturou vznikly nástroje jako například *Pattern playback*, který sloužil k analýze a syntéze hlasu a umožňoval převod spektrogramů na zvuk. Dalším odlišným nástrojem je syntetizér *ANS*, který spojoval hudbu, světlo a obraz tím, že byla notace prováděna graficky. [2, 3]

#### d) **Elektronické**

Zvuk vzniká jen a pouze v elektrických obvodech, kdy tyto obvody dělíme na analogové, analogově-digitální a digitální, a to podle toho, jak se generuje a moduluje samotný zvuk. Jak již z názvů vyplývá, digitální nástroje generují zvuk v číslicové formě, zatím co analogové využívají nejrůznějších elektronických obvodů, analogově-digitální pak kombinují oba principy. Analogové nástroje se dále dělí podle obvodových prvků, kdy tyto prvky mohou být tranzistory, elektronky, nebo různé analogové integrované obvody. Příkladem mohou být různé syntetizéry, například *Theremin*, či samplery. [2]

## 1.2 Historie fotoelektrických nástrojů

Nejstarším doloženým fotoelektrickým nástrojem je *Luminaphone*, který vznikl v roce 1925. Skládal se z clony ve tvaru mísy, kdy tato clona byla umístěna na hřídeli motoru. Clona z kovu nesla děrování v soustředných kruzích. Toto děrování bylo pravidelné a tím určovalo frekvenci tónu. Jelikož se frekvence tónů liší o neceločíselné hodnoty, nástroj neumožňoval temperované ladění. Ke každému tónu byla přiřazena jedna klávesa klaviatury, která spínala světelný zdroj namířený skrze clonu na fotocitlivý senzor. Při rotaci clony a sepnutí zdroje světla začne na fotocitlivý senzor dopadat světlo právě o frekvenci s jakou se v ose mezi nimi střídá děrování, které světelný paprsek propustí a kovová část, která světlo ke snímači nepropustí. V závislosti na velikosti a tvaru děrování se mění intenzita a kvalita generovaného zvuku. Nástroj disponoval 36 klávesami s možností rozšíření. Dále nabízel změnu zvuku právě změnou clony. *Luminaphone* nedisponoval možností měnit dynamiku za pomoci jasů nebo ladění změnou rychlosti otáčení clony. [3]

*Superpiano*, patentováno 1927, bylo, co se ovládání týče, mnohem dále. Princip generování zvukového signálu je zde stejný jako u *Luminaphonu*. Nabízel sedm celých oktáv, které byly vytvořeny dvanácti disky, z nichž každý obsahoval sedm soustředně umístěných průběhů reprezentujících jednotlivé tóny. Každý z disků byl poháněn pomocí jiného převodního poměru pro dosažení chtěného, třeba i temperovaného ladění. Jednotlivé průběhy byly vytvořeny na základě faktu, že tón o oktávu výše má dvojnásobnou frekvenci. Aby zvuk nezůstal pouze jako harmonický průběh obvyklých tvarů, byla přidána druhá řada těchto disků, která umožňovala tóny kombinovat. Nástroj disponoval možností dynamického hraní, a to za pomoci změny intenzity světelného zdroje, která se měnila v závislosti na stlačení klávesy. Vznikla i upravená verze *Superpiana* s názvem *Symphonium*, která nesla nákresy průběhů orchestrálních nástrojů. Nástroj umožňoval kombinovat tyto zvuky až patnácti různými způsoby. [3]

## 1.3 Vlastnosti zvuku

Jelikož fotoelektrické nástroje využívají rotačních clon, generovaný zvuk je vždy periodický. Základní signál je sinusový, který je pro matematické vyjádření nejjednodušší, jelikož jeho spektrum obsahuje pouze jeho vlastní frekvenci. Jde o základní stavební prvek dalších průběhů, které vznikají kombinací celočíselných či neceločíselných násobků sinových průběhů, jenž ve výsledku vytvářejí harmonické i neharmonické průběhy.

### 1.3.1 Harmonické průběhy

Harmonické průběhy jsou tvořeny, jak již bylo výše zmíněno, výhradně celočíselnými násobky základního průběhu, které jsou periodické a jejich doba trvání není nijak omezena. Výčet některých harmonických průběhů je:

#### a) Složený signál

Kombinací určitých frekvencí a jejich správným poměrem můžeme vytvořit libovolný harmonický průběh, na tomto principu je založena i aditivní syntéza. Některé konkrétní druhy složených signálů mají svůj vlastní název odvozený od jejich tvaru, který však není ideální ale pouze přibližný, čehož je příkladem obdélníkový průběh. Jelikož je možné vytvořit jakýkoliv harmonický průběh součtem různých poměrů celočíselných násobků základní frekvence, je možné takto vzniklé průběhy matematicky vyjádřit za pomoci Fourierovy transformace podle vzorce:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi ftn) - \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi ftn) \quad (1.1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1.2)$$

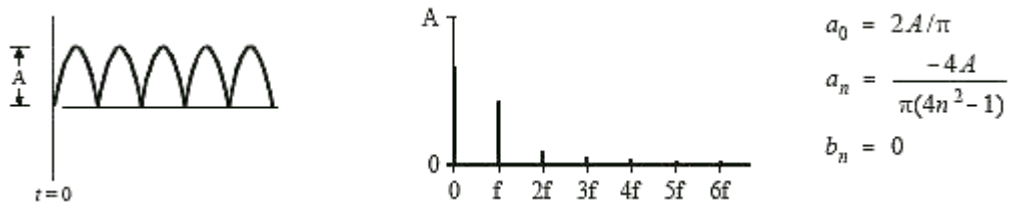
$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi ftn) dt \quad (1.3)$$

$$b_n = \frac{-2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi ftn) dt, \quad (1.4)$$

kde  $x(t)$  je amplituda signálu,  $a_0$  stejnosměrná složka,  $a_n$  amplituda kosinové funkce,  $b_n$  amplituda sinové funkce,  $f$  frekvence fundamentu,  $n$  celočíselný násobek harmonické složky,  $T$  perioda a vše je pak vztaženo k času  $t$ . [4]

### b) Usměrněný sinusový průběh

Jak z názvu vyplývá, tento průběh se získá usměrněním záporné polarity do kladné. Spektrum vzniklého průběhu se skládá ze základní frekvence a její harmonických složek, kdy je důležité, že se všechny tyto složky od základní frekvence odečítají. [4]



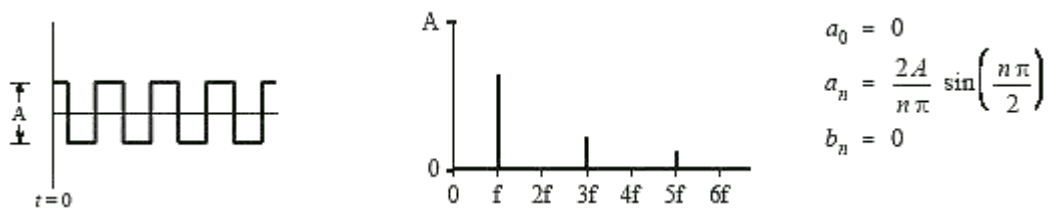
Obr. 0.1: Průběh a frekvenční spektrum usměrněného sinového průběhu [4]

Jako příklad výpočtu tohoto průběhu lze dosadit hodnoty z obrázku 1.1 do základní rovnice 1.1, získáme tak níže uvedený výsledný vztah popisující průběh signálu v závislosti na čase.

$$x(t) = \frac{2A}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4A}{\pi(1-4n^2)} \cos(2\pi ftn) \quad (1.5)$$

### c) Obdélkový průběh

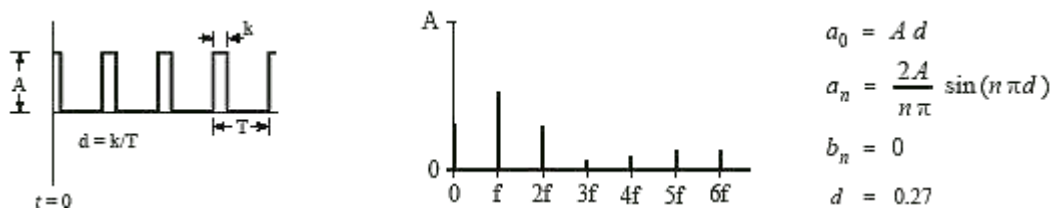
Jedním z konkrétních druhů složených signálu je signál obdélkový, který je tvořen pouze lichými harmonickými složkami základní frekvence, a zároveň je zachován klesající poměr těchto harmonických. Pro získání dokonalého obdélkového průběhu je potřeba nekonečné množství vyšších harmonických složek. [4]



Obr. 0.2: Průběh a frekvenční spektrum obdélkového průběhu [4]

### d) Pulzní průběh

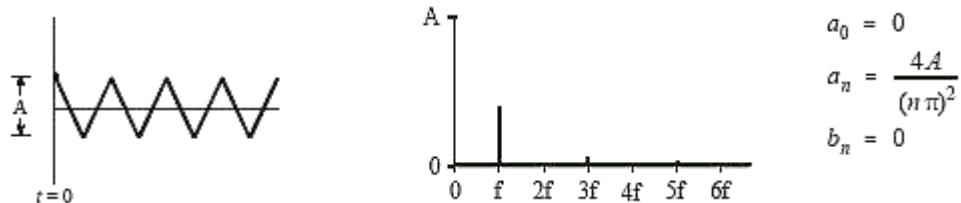
Jde o obdélkový průběh s nerovnoměrnou střídou. Střídu lze měnit přidáním sudých harmonických a změnou poměrů všech harmonických složek. [4]



Obr. 0.3: Průběh a frekvenční spektrum pulzního průběhu [4]

### e) Trojúhelníkový průběh

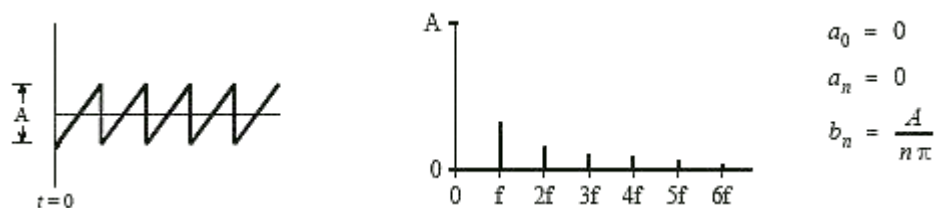
Podobně jako u obdélníkového signálu, se skládá pouze z lichých harmonických. Na rozdíl od obdélníkového průběhu se ale každá první harmonická složka odečítá a každá druhá harmonická složka přičítá. Poměr těchto složek klesá strměji, než je tomu u obdélníkového průběhu. [4]



Obr. 0.4: Průběh a frekvenční spektrum trojúhelníkového průběhu [4]

### f) Pilový průběh

Podobně jako z obdélníkového signálu přidáním sudých harmonických složek vytvoříme pulzní průběh. Přidáním sudých harmonických složek k průběhu trojúhelníkovému můžeme vytvořit signál pilový. Takový průběh se vyznačuje ostrou náběhovou nebo sestupnou hranou. [4]



Obr. 0.5: Průběh a frekvenční spektrum pilového průběhu [4]

Jako příklad výpočtu tohoto průběhu lze dosadit hodnoty z obrázku 1.5 do základní rovnice 1.1, získáme tak níže uvedený výsledný vztah popisující průběh signálu v závislosti na čase.

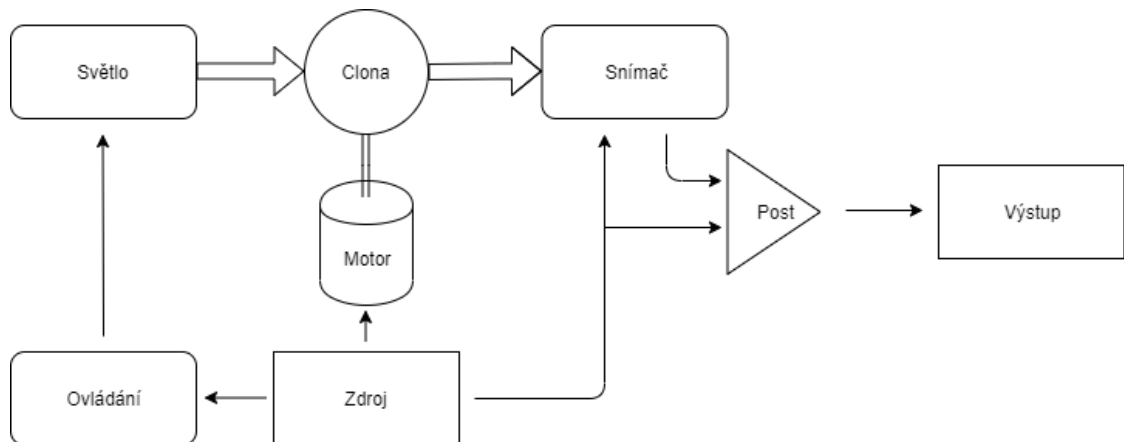
$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A}{n\pi} \sin(2\pi ftn) \quad (1.5)$$

## 1.3.2 Neharmonické průběhy

Tyto průběhy vznikají různou kombinací celočíselných i neceločíselných násobků základního signálu a jsou podstatou různých modulačních syntéz, jako je například amplitudová modulace.

## 1.4 Princip fotoelektrických nástrojů

Každý fotoelektrický nástroj obsahuje světelný zdroj, snímač, jednu či více clon, jeden či více motorů a ovládací obvody. Samotný princip generování signálu tohoto nástroje je založen na elektro-mechanickém generátoru harmonického průběhu. V tomto případě je průběh zajištěn rotující se clonou s určitým počtem průzorů. V případě, kdy je clona umístěna mezi zdrojem světla a fotoelektrickým senzorem, dochází při rotaci k osvětlení sensorické plochy jen v případech, kdy je v oblasti osy mezi zdrojem světla a senzorem ve cloně díra. Výpočet frekvence harmonického signálu lze provést pomocí vzorce násobení počtu otáček za vteřinu a počtu děr ve cloně. Tento vztah platí ale jen v případě, že jsou průzory ve cloně rovnoměrně rozmístěny. V případě, kdy je na disku jakýkoli vzor, například postupně se přibližující průzory, lze vypočítat frekvenci opakování tohoto průběhu, nikoli výslednou frekvenci zvuku. A to z toho důvodu, že se frekvence výsledného zvuku neustále mění. Opakuje-li se daný vzor na disku vícekrát, můžeme pak spočítat frekvenci opakování vzoru, a to násobením počtu otáček a počtu opakujících se vzorců. [3]



Obr. 0.6: Diagram zapojení obecného fotoelektrického nástroje

### 1.4.1 Části nástroje

#### a) Fotoelektrické snímače

Jedním z bodů, kterým se práce bude během konstrukce zabývat, je vliv snímače na barvu generovaného zvuku (signálu). A to z toho důvodu, že existuje několik druhů fotocitlivých součástí. [5]



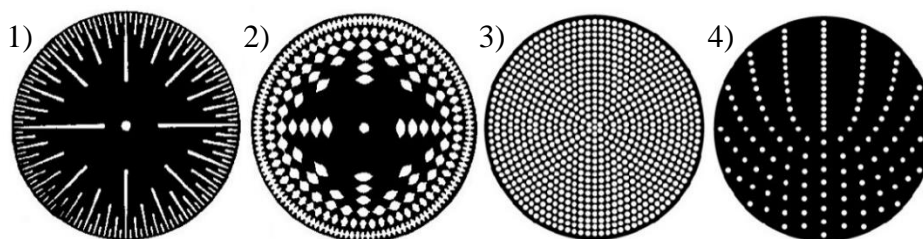
- **Fotorezistor** – Fotorezistory jsou levné součástky, které se zvyšující se světelnou intenzitou snižují svůj elektrický odpor a to exponenciálně. Vyrábí se z několika druhů materiálů, z nichž nejběžnější je sulfid kadmnatý (CdS). Materiál ovlivňuje citlivost na vlnovou délku světla, ale i na jeho intenzitu, dále pak možnost detekovat i ultrafialové či infračervené světlo. Stejně jako klasický rezistor, na základě jeho teplotní závislosti se může vytvářet šum a zároveň je ovlivňována citlivost na jas a vlnovou délku. Fotorezistory jako takové jsou velmi závislé na vlastnostech světla. Kromě výše uvedených vlastností je intenzitou a vlnovou délkou ovlivněna i odezva na změnu osvětlení, podle materiálu od stovek milisekund po jednotky milisekund. Díky jeho pomalé reakci na změnu jej lze použít pro snímání signálů o frekvencích jen do stovek hertz. [5, 6]
- **Fotodioda** – Voltampérová charakteristika fotodiody je stejná jako charakteristika klasické diody. Rozdíl nastává v závěrném směru, kdy s rostoucím osvětlením dochází k lineárně odpovídajícímu růstu anodového proudu. Zajímavostí je, že dioda pracuje ve čtvrtém kvadrantu jako zdroj elektrické energie, jelikož zde dochází k fotovoltaickému efektu. Fotodiody pracují velmi rychle, řádově  $10^{-6}$  až  $10^{-9}$  sekund. Existuje ale i zvláštní konstrukce tzv. PIN, kdy je dosaženo rychlosti dokonce  $10^{-12}$  až  $10^{-15}$  sekund. Stejně jako fotorezistory jsou fotodiody závislé na teplotě a jejich vlastnosti se mění v závislosti na materiálech. [5, 7]
- **Fototranzistor** – Fototranzistory se vyrábějí převážně bez vyvedené báze, jelikož jsou ovládány právě světlem. Rychlost fototranzistorů se udává do 50 kHz. Fototranzistor je oproti fotodiodě citlivější na změnu osvětlení. [5, 8]
- **Fotovoltaický článek** – Poslední teoreticky možným využitelným fotocitlivým prvkem je fotovoltaický článek. Z principiálního hlediska je možné jej využít jako snímač. Ve své podstatě se jedná o diodu s velkou plochou citlivou na světlo. [5]

## b) Světlo

Jako zdroj světla lze využít libovolný zdroj elektromagnetického vlnění, které je možné snímat. Snímače jsou vlivem materiálu, ze kterého jsou vyrobeny, závislé na vlnové délce světla. Této skutečnosti lze využít užitím různých vlnových délek viditelného spektra, popřípadě vlnění o vlnové délce blízké viditelnému spektru. Z hlediska historie nebylo využito citlivosti materiálu snímače na vlnové délky zdroje světla a z pravidla bylo užito klasických žárovek, které vyzařují kromě viditelného spektra především infračervené. Z hlediska možnost se nejedná o vhodný světelný zdroj. Často se do cesty mezi světelný zdroj a snímač zařadily různé optické členy pro usměrnění vyzařovaného světla. Daleko vhodnější jsou LED diody, a to díky užší vyzařovací charakteristice a možnosti vybrat vhodnou vlnovou délku světla pro snímač. Další výhodou je i nižší spotřeba a rozměry.[3]

## c) Clony

Clony se u fotoelektrických nástrojů používají z pravidla ve formě disků, které je možné vidět na obrázku 1.7, nebo „nekonečných“ pásků. Výsledný průběh je zaznamenán v nekonečné smyčce, aby během přehrávání zaznamenaného průběhu byl získán konstantní signál bez přerušení. Je zde pár výjimek, kdy nebylo použito těchto do nekonečna se opakujících průběhů, a to například u záznamu zvuku u filmů. Takovéto průběhy mohou být kreslené, vystřihnuté, nebo případně za použití fotografie. Tyto průběhy mohou představovat charakteristické harmonické průběhy, ale také mohou simulovat konvenční nástroje či lidský hlas. Z tohoto důvodu lze fotoelektrické nástroje považovat za jakési samplery. Kromě průběhů je možné vytvářet i rytmy, toto umožňoval například *Rythmicon*. Průběhy jsou na celuloidových discích umístěny soustředně, kdy jsou uspořádány od nejhlubších tónů uprostřed po nejvyšší směrem ke kraji. Obdobně je tomu u plechových disků. U pásků se průběhy skládaly dle konstrukce vedle sebe, případně měl každý průběh vlastní pásek. Kromě clon nesoucí průběhy, bylo využito i clon nesoucí spektrogramy. [3]



Obr. 0.7: Diskové clony ze *Superpiana* (1, 2) a *Rythmiconu* (3, 4) [3, 9, 10]

#### d) **Pohon**

Jako pohon u fotoelektrických nástrojů je pro pohyb clon použito motoru, a to přímým náhonem pomocí převodních kol nebo za pomoci řemenů z hřídele na jednotlivé rotační části. Z dochovaných zdrojů nebyl zjištěn druh těchto pohonných motorů. Z pravidla bylo užito jednoho silnějšího motoru, který měl konstantní rychlost otáčení. Existovaly nástroje disponující možností změny rychlosti, a to i během hry. Takováto změna rychlosti v průběhu hry často vedla k ne vždy žádanému glissandu (nepřerušovaný volný přechod mezi tóny). U nástrojů, které neměly potřebný frekvenční rozsah, byla ovšem možnost přeladování žádaná. Jelikož byly převody pevné, bylo nemožné ladit nástroj jinak než změnou rychlosti motoru nebo výměnou clony, kdy tato možnost nebyla vždy možná. [3]

#### e) **Ladění**

U fotoelektrických nástrojů je ladění řešeno v několika konstrukčních bodech. První z nich jsou samotné clony, kdy průběh a jeho hustota udává při rotaci frekvenci či rychlost přehrávání zvuku. Druhým bodem jsou samotné převody. Ty ale většinou nebylo možné měnit ani upravovat. Jedná se tedy pouze o teoreticky možný bod ladění, který byl určován při výrobě nástroje. Třetím bodem jsou již zmíněné motory, kdy v některých případech bylo možné měnit rychlost jejich otáčení. Poslední a při psaní této práce nezjištěná možnost je vytvoření adekvátně rychlého pulzního signálu spínajícího světelný zdroj, kdy je možné dosáhnout modulovaného výstupního signálu a určitým způsobem i jiného než předurčeného tónu. Pro dosažení žádaného tónu (a v celku tedy i ladění) je potřeba znát frekvence průběhu, která se vynásobí počtem otáček motoru. Tedy v případě, kdy je převodní poměr motoru a clony 1:1. Pokud tomu tak není, je potřeba získanou hodnotu vynásobit převodním poměrem. Tímto způsobem je možné získat jakékoli ladění i přes fakt, že základní clona má vždy celočíselnou hodnotu. Často žádaná vlastnost nástroje je možnost mikrotonálního ladění, které ovšem v případech fotoelektrických nástrojů nebyla k dostání, jelikož vyžaduje jednotlivě ovládaný motor pro každou clonu. [3]

#### f) **Ovládání**

Kromě fotoelektrických nástrojů, které průběhy přehrávaly automaticky (filmy, počítače), kde bylo možné určit rychlost přehrávání, případně průběhy transponovat, bylo ovládání ostatních fotoelektrických nástrojů zcela bez výjimky pouze za pomoci klaviatur. Zaměření pouze na klaviaturu a případné drobné ovládací prvky má své opodstatnění v jednoduchosti a dostupnosti, navíc podpořenou vidinou prodeje nástroje široké veřejnosti. Jelikož žádný z nástrojů nedisponoval možností mikrotonálního ladění, nebylo třeba nějakého alternativního ovládání. Nástroje nabízely další ovládací prvky ve formě filtrů, dynamiky, vibrata, možnosti kombinovat některé oscilátory, popřípadě upravovat rychlost motoru, třeba že jen přibrzděním rukou.[3]

## 2. NÁVRH FOTOELEKTRICKÉHO NÁSTROJE

### 2.1 Koncept

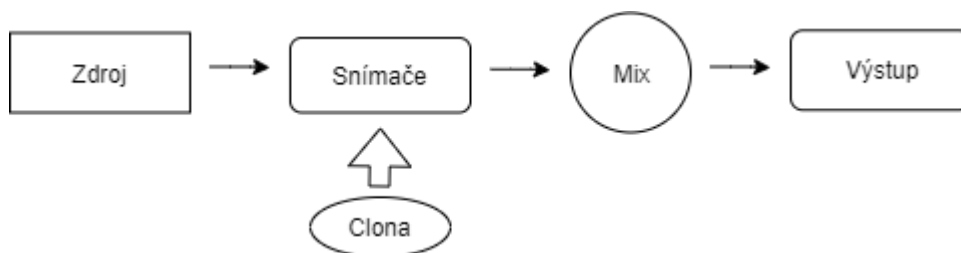
Cílem této práce je experimentální mechanicko-elektrický hudební nástroj založený na fotoelektrickém principu, který umožní prozkoumat a rozšířit možnosti fotoelektrického principu u hudebních nástrojů. Základ nástroje vychází z výše uváděného Superpiana a podobných nástrojů. Všechny tyto nástroje využívaly jednoduchého světelného zdroje stejně jako snímače a lišily se v zásadě pouze různě zpracovanými průběhy. Zpracování tohoto nástroje moderním způsobem přináší možnost mikro tonálního ladění jednotlivých tónových generátorů nezávisle na sobě, a to i během hry. Což přináší nové možnosti využití nástroje založeného na fotoelektrickém principu, jako jsou přepínání a kombinace různých fotocitlivých senzorů, obdobně jako je tomu u snímačů elektrické kytary, které mohou dodat specifitější barvu výsledného zvuku, což je velice žádaný faktor u jakéhokoli nově vznikajícího, či přepracovaného nástroje. Další funkční a zároveň i estetický prvek je možnost výběru barvy zdroje světla. Jelikož se s hudebními nástroji nepojí jen jejich zvuková barva a možnosti, ale i samotný vzhled nástroje. Jako hlavní ovládací prvek by proto měla sloužit především dotyková plocha, která se právě skrze estetický vjem pro nástroj hodí, jelikož je průhledná. Přídavným ovládacím prvkem by měl být *elektrický smyčec* reagující na zrychlení a umožňující hru v prostoru, která by měla umožnit nový způsob interakce hráče s nástrojem.

#### 2.1.1 Jednotlivé části nástroje

##### a) Snímače

Jak už bylo v úvodní teorii zmíněno, různé snímače mají různé vlastnosti, co se rychlosti a citlivosti týče, čímž můžeme pozměnit charakter a barvu zvuku. Proto je možné v praktické části užito fototranzistoru, fotodiody i fotorezistoru. Tím bude pokryto snímání celého vyzařovaného spektra. Solární panel není v návrhu nástroje použit, jelikož během návrhu nebyl nalezen v dostatečně malém rozměru, a dále z důvodu jejich nízké účinnosti 15-20 %. Malá možnost využití fotorezistoru z jiného materiálu než CdS (Sulfid kademnatý), a to z důvodu nízké dostupnosti. Jak lze na blokovém diagramu vidět, snímače mají různé možnosti ovládní. Ty by měly fungovat podobně jako u elektrické kytary, kdy se mezi snímači dá přepínat,

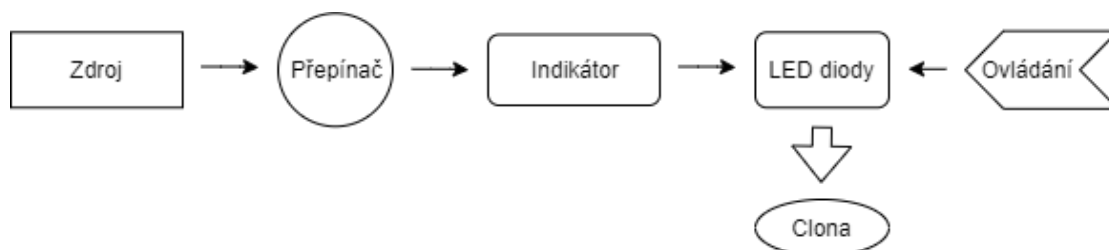
popřípadě nastavovat poměr. Každý druh snímačů je sveden do svého vlastního signálního kanálu za pomoci operačního zesilovače v součtovém zapojení. Každý z výstupů těchto operačních zesilovačů má vlastní potenciometr pro nastavení úrovně signálu. Všechny tyto signály se poté opět spojí a s nastavitelnou výstupní úrovní se vyvedou na výstupní konektor. V závislosti na kvalitě a parametrech výstupního signálu se nabízí přidání generátoru obálky ADSR do cesty signálu.



**Obr. 2.1:** Diagram zapojení fotoelektrických snímačů

## b) Světlo

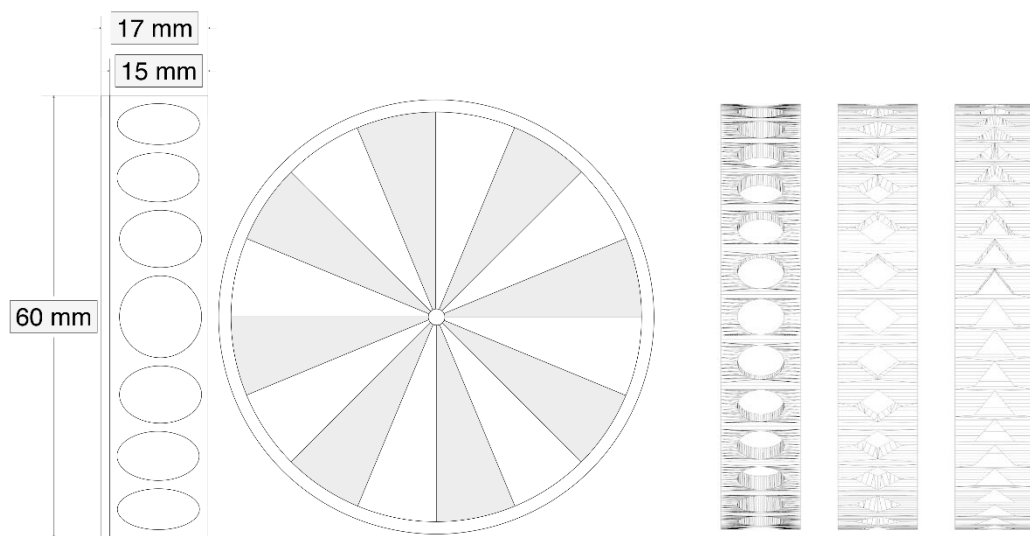
Jako světelný zdroj se nabízí využití RGB, IR i UV LED diod. Při hře na nástroj by pak bylo možné jednotlivé barvy přepínat, popřípadě je zde možnost přidání ovládacího prvku, aby bylo možné nastavit poměr jasů jednotlivých diod. Ovšem tato možnost se ověří až při konstrukci samotného nástroje. Další z možných úprav je přidání obvodu, který by zabezpečil konstantní prolínání barev. Tento obvod by sloužil spíše jako estetický doplněk nástroje. V případě, že se při konstrukci ukáže vliv barvy světla pro různě citlivé senzory zanedbatelný, obvod by prošel zjednodušením a takovou úpravou, aby byla podpořena výhradě estetická povaha nástroje. Pro dosažení zajímavějšího vizuálního efektu jsou spínány diody a ne snímače.



**Obr. 2.2:** Diagram zapojení LED diod

### c) Clony

V době návrhu nástroje ještě stále není vybrán přesný rozměr clon, ani počet průzorů v nich vytvořený, jelikož to není možné. Cílem však je získání co nejmenších, cenově dostupných a na výrobu jednoduchých clon. Z těchto důvodů je již nyní zvolena výroba clon realizována pomocí 3D tisku. Clony nebudou tvaru disků, ale dutých válců. Uvnitř těchto válců budou umístěny LED diody. Takto vyrobené clony mají vždy přesné rozestupy jednotlivých průzorů a zároveň lze vytvořením univerzálního modelu ulehčit práci, jelikož poté stačí změnit požadovaný tvar průběhu. Odpadá tak potřeba výpočtů pro správné a pravidelné rozložení po celé cloně.

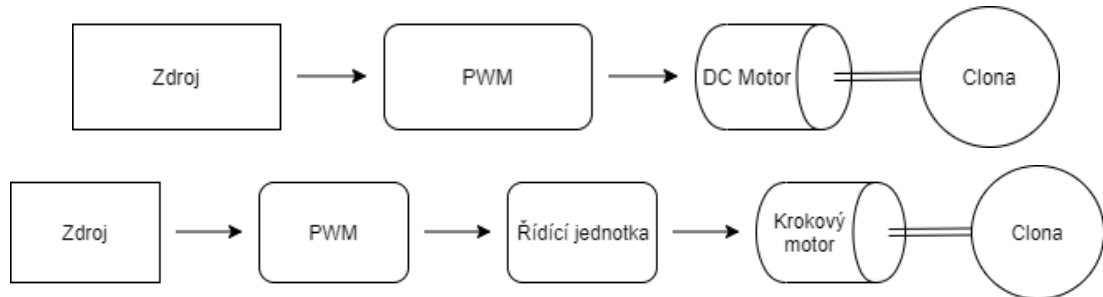


Obr. 2.3: Návrh clony pro 3D tisk a návrh možných druhů průběhů

### d) Pohon

Jelikož je pohon clon v této práci jedním z hlavních prvků, které umožní celkové ladění nástroje, bylo zvoleno vícero řešení, ze kterých se vybere až při samotné konstrukci nástroje. Jedním z řešení je použití stejnosměrných motorků, kdy jejich rychlost můžeme řídit za pomoci PWM (*pulse width modulation*), tedy pomocí modulace šířky pulzů. Výhodami tohoto řešení jsou jednoznačně nižší cena a relativně jednoduché obvodové řešení. Nevýhodou je zde doba změny otáček, které způsobí, že při změně ladění během hry dojde ke změně tónu glissandem. Otázkou tedy je, zdali je tato vlastnost chtěná a ve výsledku cílená či ne. Druhým řešením je použití krokových motorů. Rychlost otáčení je zde řešena v podstatě stejným způsobem, ovšem tento druh motoru potřebuje navíc vlastní řídicí obvod. Výhodou tohoto řešení je rychlá odezva na změnu ladění. Nevýhodou je však vyšší pořizovací

cena a již zmíněný řídicí obvod. Pro změnu otáček je použit potenciometr, kterým je možné zvolna měnit rychlost otáčení a tím získat mikro tonální ladění, nebo za pomoci přepínače zařazeného před potenciometrem, ten umožní přepínání právě mezi potenciometrem a fixně nastavenými hodnotami. Fixně nastavené hodnoty a tím i chtěné tóny.



**Obr. 2.4:** Diagram zapojení DC a krokového motoru

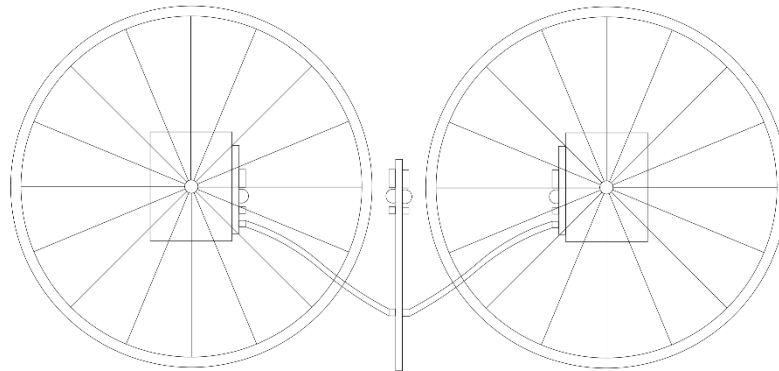
#### e) Ovládání

K ovládání bude využito některé z dotykových vrstev, kterých je na trhu k dostání hned několik druhů. Dotyková vrstva byla zvolena, aby podpořila vizuální stránku nástroje, jak již bylo uvedeno v konceptu nástroje. Ovládání by mělo fungovat tak, že na jedné ose bude figurovat frekvence a na druhé dynamika. Nejjednodušší se jeví ovládání skrze tzv. rezistivní mřížku, kdy je dotyková plocha pokryta pásky vodivého filmu, a to horizontálně i vertikálně. Tyto pásky jsou od sebe odděleny a k jejich spojení dojde při dotyku plochy pomocí prstu nebo jakéhokoliv předmětu. Nevýhodou je možná nepřesnost až nefunkčnost při větším počtu doteků. Další možností jsou klasické rezistivní dotykové plochy. Toto řešení by si žádalo obvod pro rozeznání bodu dotyku.

Další ovládací prvek, zvýrazňující atypičnost nástroje je „elektrický smyčec“, který může obsahovat jednoosý nebo tříosý akcelerometr. Podélná osa podle držení reaguje na zrychlení určovaním intenzity generovaného zvuku. Další dvě osy je možné využít jako případné ovládací prvek.

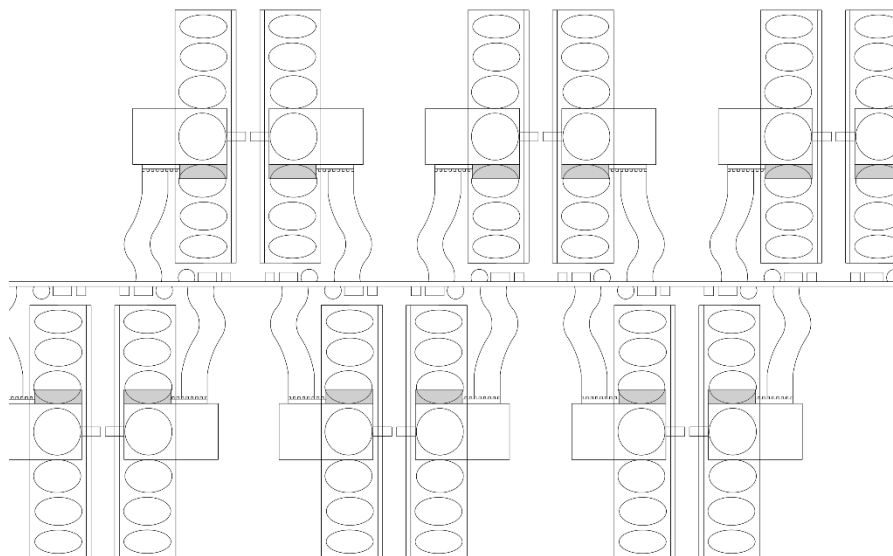


## 2.1.2 Návrh a rozložení



**Obr. 2.5:** Umístění komponentů z boku

Jak lze na obrázku č. 2.6, vidět, deska plošných spojů, nesoucí snímače musí být umístěna uprostřed nástroje, a to kolmo vůči dnu. Pro minimalizaci případného fázového posun signálů jednotlivých snímačů vůči sobě, musí tyto snímače být umístěny co nejbližší k sobě. Takovéto skupinky snímačů jsou umístěny z obou stran desky. Abychom co nejvíce minimalizovali velikost nástroje, umístíme jednotlivé části podle obrázku č. 2.7. Na desce plošných spojů jsou kromě snímačů umístěny taktéž konektory pro připojení LED diod a motorů. Ty se připojují pomocí plochých kabelů, jelikož leží na vlastních deskách plošných spojů.



**Obr. 2.6:** Rozmístění komponentů shora

## 3. PRAKTICKÁ ČÁST

### 3.1 Realizace nástroje

Aby bylo možné zaručit funkčnost nástroje, je zapotřebí jej před samotným finálním návrhem a jeho následnou konstrukcí vyzkoušet, a to formou sestavením jednotlivých dílčích částí. Právě během sestavování těchto pokusných obvodů došlo hned k několika poměrně velkým změnám, které snížily výslednou cenu samotného nástroje a zároveň umožnily daleko širší možnosti ovládání nástroje a tím i finální vlastnosti generovaného zvuku.

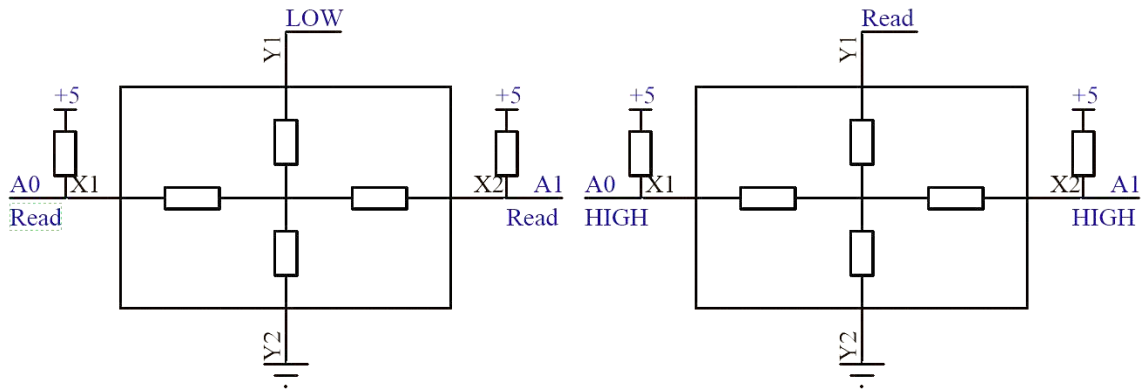
#### 3.1.1 Provedené změny a výsledné zapojení

##### a) Mikrokontroler a dotyková vrstva

Největší změnou na celém nástroji je využití mikrokontroleru *Atmega328p*, který disponuje 6 analogovými vstupy, z toho 2 slouží pro komunikaci pomocí protokolu *IIC (I<sup>2</sup>C)* a 14 digitálních vstupně výstupních pinů z nichž je jich 6 schopných pulzně šířkové modulace. Hlavním důvodem této změny je čtení dat z dotykové vrstvy, jelikož při testování a následných změn původního obvodového řešení, které je v příloze 5, nebylo dosaženo uspokojivých výstupních hodnot, které by byly použity pro ovládání nástroje. Zároveň tato změna umožnila jednodušší a uživatelsky přívětivější volbu barev LED diod s možností automatického prolínání barev. [11]

Dotyková vrstva je v ose X připojena z obou stran k analogovým vstupům mikrokontroleru. Aby bylo možné čtení dvou různých, případně stejných hodnot bylo zapotřebí k těmto vstupům paralelně připojit napětí přivedené skrze rezistory. Tím je v podstatě vytvořen napěťový dělič, který v případě dotyku je napětí přivedeno na signálovou zem a analogově digitální převodník čte hodnotu napětí právě na této vrstvě, to lineárně roste spolu se vzdáleností od vstupu. Podle celkové hodnoty napětí získané z obou převodníků je možné určit, zdali a jak se vrstvy dotýkáme. Jelikož pro ovládání dynamiky postačuje jen jedna hodnota je v ose Y připojena k analogovému vstupu pouze jedna strana dotykové vrstvy, druhá je pak připojena na signálovou zem. Jak lze vidět na obrázku 3.1, čtení dat z os X a Y se střídá, jelikož je potřeba zajistit, aby žádný ze vstupů nezůstal takzvaně plovoucí. Získané hodnoty jsou pomocí jednoduchých matematických funkcí převedeny a podle nastavení nástroje jsou za

pomocí funkcí IF ELSE přiřazeny určitým hodnotám reprezentujícím frekvenci a dynamiku. Část programu obstarávající čtení dat z os X a Y a následné přiřazování hodnot je v příloze 8. [12]



**Obr. 3.1:** Kroky čtení dat z dotykové vrstvy

#### b) Snímače

Jako snímač byl vybrán pouze fototranzistor *LL-S350PTC-1A*, jelikož má reakční dobu 15  $\mu$ s, lze jej tedy použít v celém slyšitelném spektru a zároveň nepotřebuje další obvodové prvky, na rozdíl od fotodiody, která potřebuje zesilující tranzistory nebo operační zesilovač. Jak již bylo zmíněno v teoretické úvodu fotorezistory reagují na změny pomalu, a to v rámci desítek milisekund. Bylo by možné jej využít jako LFO (Low Frequency Oscilator, tedy generátor nízkých kmitočtů), avšak v navrhovaném nástroji se nevyskytuje, jelikož generované frekvence budou z pravidla daleko vyšší. Při vyšších frekvencích dopadajícího světla by tedy docházelo pouze ke čtení průměrné hodnoty.

Tyto fototranzistory jsou po jednom umístěny každý zvlášť uprostřed úzké desky plošných spojů tak aby bylo možné je přiložit co nejbližší cloně, kdy jde o podobné umístění jako na obrázku 2.5. Generované signály jsou navedeny přes potenciometry na operační zesilovač, a dále na výstup z nástroje, kdy celé toto schéma je možné vidět v příloze 7.

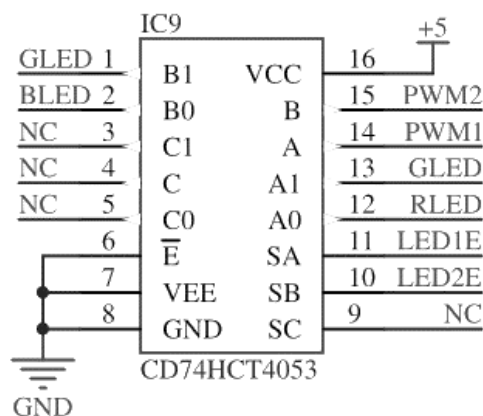
#### c) Světlo \*pod pohon\*

Jako zdroj světla slouží pouze RGB LED diody, konkrétně *RF-W2SA50TS-A39R*, které byly vybrány vzhledem k nízké ceně a vysokému jas. K využití ultrafialových a infračervených během konstrukce nedošlo vzhledem k jejich vyšší pořizovací ceně

a omezenému počtu pinů mikrokontroleru, to by mohlo být v budoucnu vyřešeno použitím například posuvného registru a multiplexorem, avšak stále je zde omezení v počtu PWM pinů mikrokontroleru. Aby bylo možné měnit dynamiku hry jsou LED diody řízeny pulzně šířkovou modulací. Bohužel vybraný mikrokontroler disponuje pouze třemi časovači, kdy každý z nich obstarává funkčnost dvou pinů, z nichž dva jsou již použity pro generování hodinového signálu pro krokové motory. Aby bylo možné měnit barvy, popřípadě samotné LED diody, je do cesty modulovaného signálu zařazen multiplexor, který je ovládán digitálním výstupem, jehož zapojení je možné vidět na obrázku 3.2 a v následující části programu:

```
digitalWrite(LED1E, (Case>2 && Case<4));
digitalWrite(LED2E, Case<2);
```

jenž v případě splnění podmínky přivede na vstupy multiplexoru napětí. Tím jsme schopni měnit barvy v podstatě libovolně, avšak pouze pro dvě LED diody současně.



**Obr. 3.2:** Zapojení multiplexoru

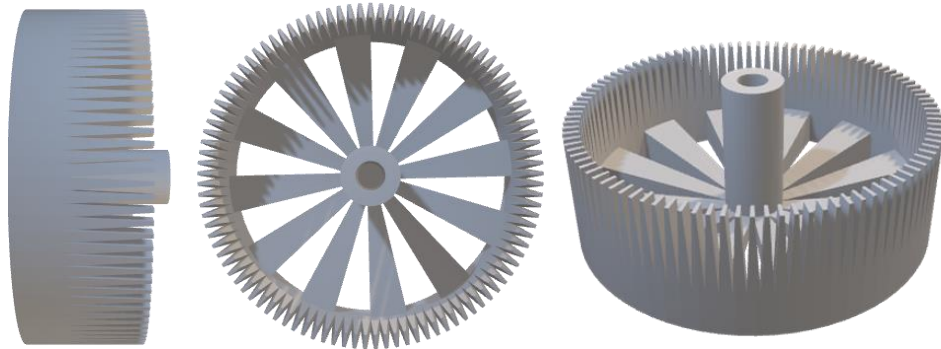
Volbu barvy je možné měnit kdykoliv během hry pomocí otočného enkoderu, kdy při zmáčknutí tlačítka enkoderu se barvy mění prolínáním ve smyčce automaticky, v tom případě se otáčením enkoderu mění rychlost tohoto prolínání. Část programu obstarávající nastavení barvy na základě polohy enkoderu jsou v příloze 8.

#### d) Clony

3D model clony, kdy je její část je možné vidět na obrázku 3.3, byl navrhnout pro 3D tisk. Celkový model se skládá dohromady ze čtyř clon, které se liší jednak svým poloměrem, ale také počtem průzorů, které jsou ve tvaru trojúhelníků, kdy případným

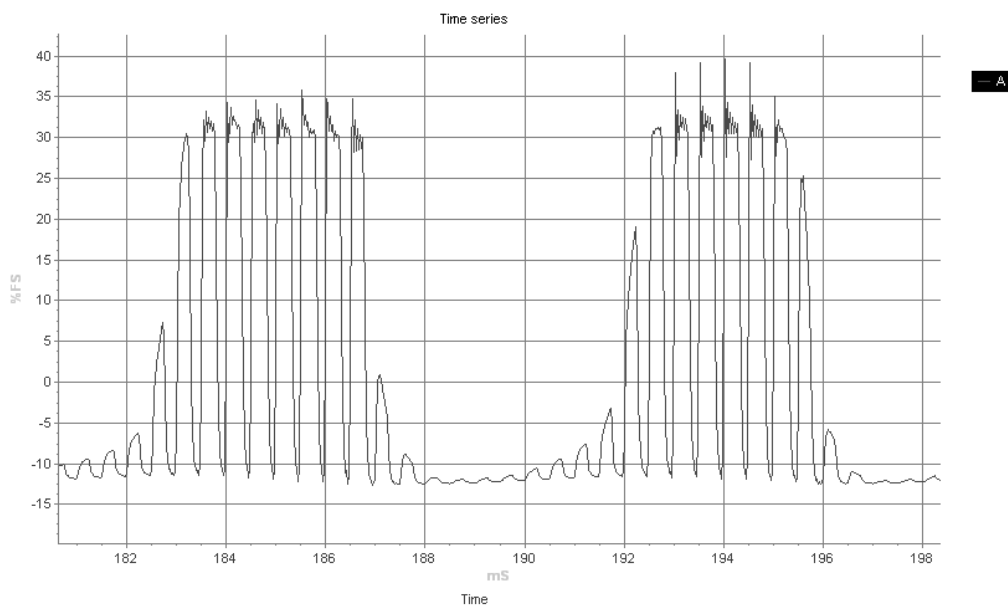
nastavením výšky usazení na hřídel motoru je možné provést změnu střídy generovaného signálu.

Nejmenší ze clon má v průměru 6 cm a nese 50 průzorů, průměr druhé clony je větší, kdy každá další clona je v průměru vždy větší o 2 cm a obsahuje o 50 průzorů více. Použití čtyř clon je využito k možnému generování harmonických složek, respektive jedné subharmonické, jedné harmonické a kvintě.



**Obr. 3.3:** 3D model clony o průměru 8 cm a 100 průzory

Při testování clony, konkrétně první, avšak nesprávně vymodelované, byla frekvence pulzně šířkové modulace, řídící jas LED diod, nastavena na 2 kHz. Vložením clony do prostoru mezi LED diodu a fototranzistor a pouhým otáčením clony rukou jsme docílili frekvence přibližně okolo 250 Hz. Průběh zaznamenaného signálu, téměř obdélníkového charakteru, který se podařilo zaznamenat při ověřování funkčnosti obvodu je vidět na obrázku 3.4.

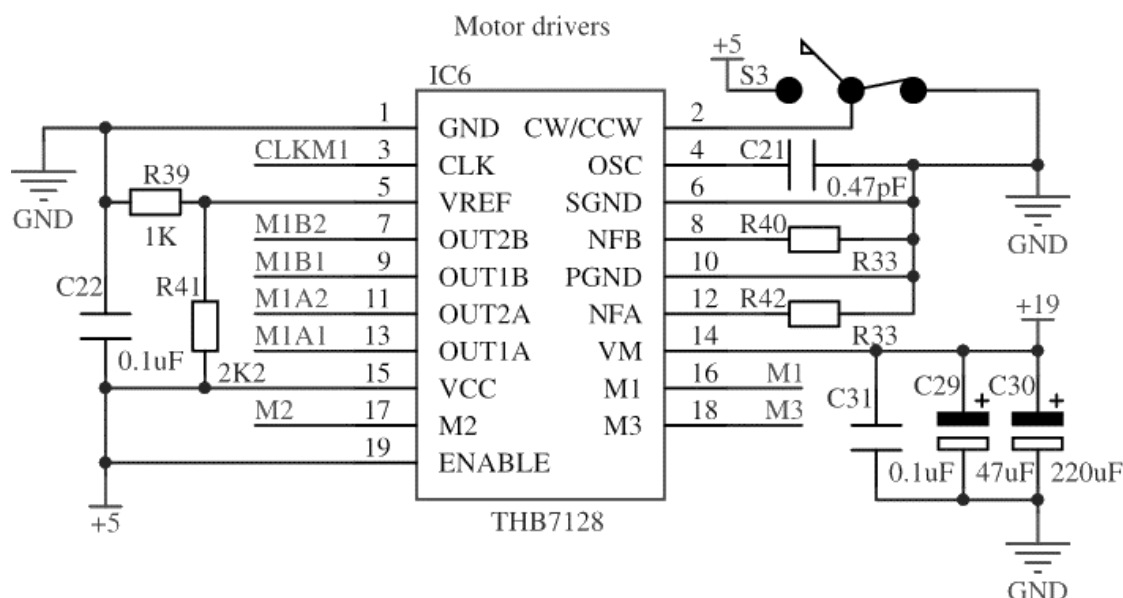


**Obr. 3.4:** Záznam průběhu generovaného signálu

### e) Pohon

Namísto původně plánovaného použití dvanácti klasických stejnosměrných motorků řízených za pomoci pulzní modulace bylo zvoleno dvou krokových motorů. K této změně došlo hned z několika důvodů a to:

- I.) Stejnosměrné motory mohou při konstantním napájení kolísat v rychlosti.
- II.) Nastroj by bylo potřeba naladit při každém zapnutí.
- III.) Jelikož mohou znít pouze dva tóny současně je možné nahradit původních dvanáct kusů stejnosměrných motorků pouze dvěma krokovými motory.
- IV.) Krokové motory mají frekvenci otáčení odpovídající vstupnímu signálu.
- V.) Snížení počtu nutných snímačů umožňuje využít například jako snímače harmonických složek.



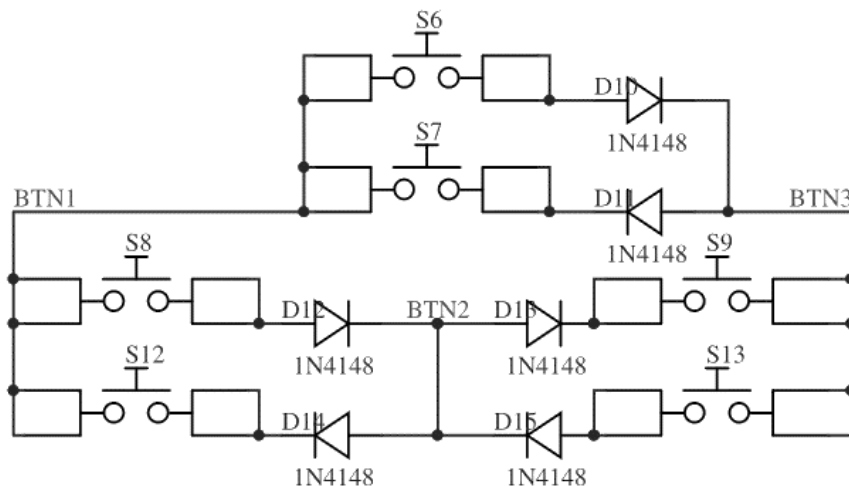
Obr. 3.5: Schéma zapojení řídicího čipu krokového motoru

K řízení těchto motorů je použito dvou kusů čipu *THB7128*, což je řídicí čip krokových motorů, který je řídit za pomoci spínání proudu, čímž umožňuje dosáhnout vyšších rychlostí řízených motorů. Každý z čipů je zapojen podle obvodu na obrázku 3.5, který je udáván výrobcem. Jediný ovládací prvek je zde přepínač pro změnu směru otáčení, což může změnit charakter generovaného zvuku. Změna s sebou však nese i omezení, a to je rychlost otáčení krokového motoru, jelikož při vyšších rychlostech se není motor schopný dostatečně rychle přizpůsobit opačnému směru a tím má tendenci zastavit. Jako zdroj hodinového signálu slouží 2 časovače mikrokontroleru *Atmega328p*. Aby bylo možné generovat signál, v podstatě

o jakékoli frekvenci, je využito knihovny *Tone.h*, která sice primárně slouží pro generování tónů o frekvencích velmi blízkých temperovanému ladění a současně disponuje možností využívající několika časovačů zároveň a tím umožňuje vznik polyfonie, ovšem v tomto případě je jejím hlavním přínosem automatizace výpočetních vzorců, které počítají s drobnými odchylkami a automatické nastavování parametrů časovače. Mikrokontroler disponuje takzvanou funkcí *Fast PWM*, pro kterou se výstupní frekvence počítá dle vzorce  $f_{PWM} = \frac{f_{CLK}}{N \cdot (1 + TOP)}$ , kde  $f_{CLK}$  je taktovací frekvence mikrokontroleru,  $N$  je hodnota děliče, která může nabývat hodnot 1, 8, 64, 256, 1024 a  $TOP$  je hodnota osmibitového komparátoru, při které se vynuluje časovač, ta může nabývat hodnot 1-255. [11, 13, 14, 15]

#### f) Ovládání

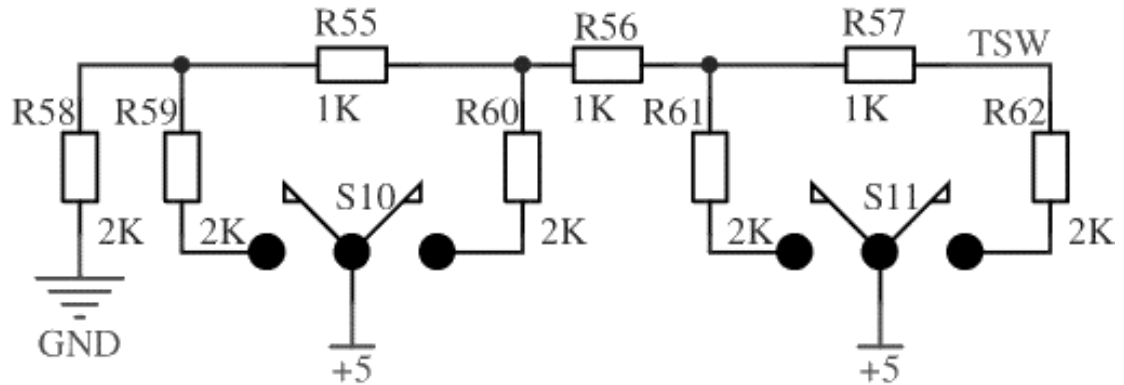
Samotné ovládací prvky se od původních nějak zásadně neliší, jen byly obvodově přizpůsobeny využití mikrokontroleru. Během vývoje se z finančních a časových důvodů nepodařilo uskutečnit zakomponování plánovaného „smyčce“, avšak piny mikrokontroleru určené pro komunikaci skrze IIC (I<sup>2</sup>C) protokol, pomocí kterého lze připojit zařízení jako akcelerometr a gyroskop, zůstaly nevyužity právě z důvodu budoucího rozšíření. Z důvodu nižšího počtu digitálních pinů mikrokontroleru a počtu požadovaných ovládacích prvků bylo využito zapojení tlačítek a páčkových přepínačů jenž můžeme vidět na obrázcích 3.6 a 3.7.



**Obr. 3.6:** Zapojení tlačítkových spínačů

Takovéto zapojení spolu s naprogramovaným mikrokontrolerem nám umožní rozpoznat dvojnásobný počet tlačítkových spínačů. Avšak toto zapojení s sebou nese

omezení v podobě nemožnosti rozpoznat sepnutí několika tlačítek současně, ovšem při stanovení správných podmínek lze umožnit rozpoznání alespoň kombinací tlačítek S8, S13 a S9, S12, kdy tyto tlačítka obstarávají změny oktáv každého z generátorů, díky čemuž lze hrát daleko sofistikovanějším způsobem. Zbylá tlačítka S6, S7 pak obstarávají změnu frekvence pulzně šířkové modulace řídící jas LED diod.



Obr. 3.7: Zapojení páčkových přepínačů

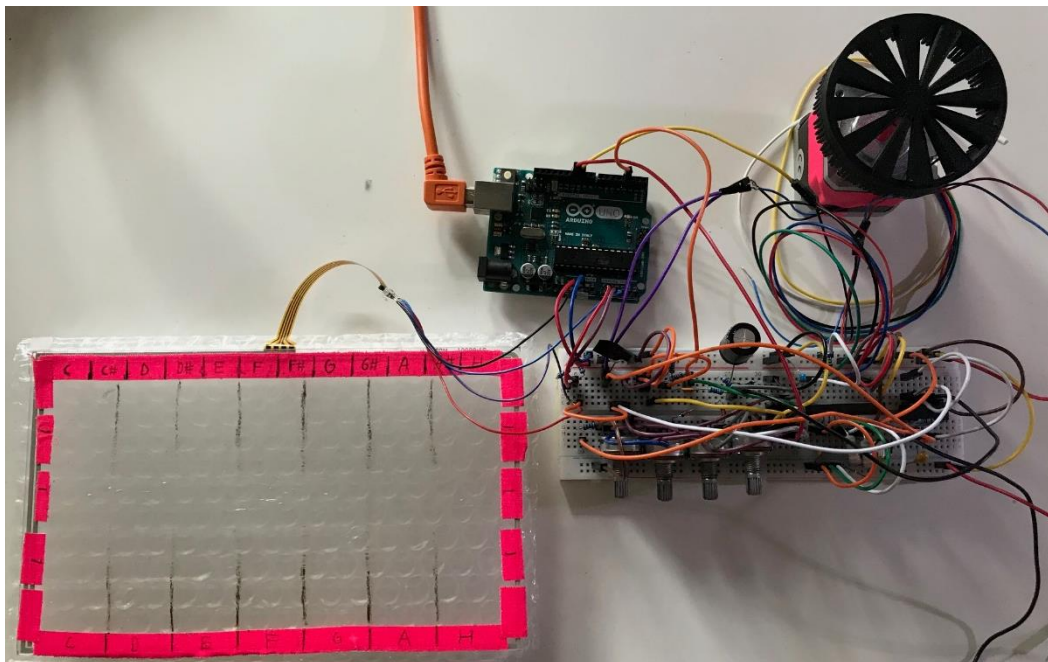
Páčkové přepínače jsou zapojeny jako jednoduchý digitálně analogový převodník připojený na analogově digitální převodník mikrokontroleru, díky čemuž je možné určit jaká je kombinace pozic těchto přepínačů. Ty slouží pro nastavení rozlišení dotykové vrstvy pro oba možné dotyky nezávisle na sobě, a to přepnutím přepínače do jedné ze tří pozic, kdy první umožňuje hru pouze v celých tónech (7 dílků), druhá pak tónů půlových (12 dílků) a poslední nabízí hru mikrotonální, avšak ta má nepříliš přesné rozlišení omezené rozdělením na přibližně 200 dílku na nastavenou oktávu. Poslední významnou hráčem nastavitelnou částí nástroje je generátor ADSR obálky. (Attack, doba náběhu, Decay, doba ustálení, Sustain, úroveň ustálení a Release což je doba dozvuku po puštění tónu). Ta byla vytvořena za pomoci časovače 555, respektive 556, kdy je obvod založen na návrhu pana Jonathana Jackyho a to z důvodu nevyužití těchto integrovaných obvodů v nynějším stavu práce oproti původnímu návrhu. Celý obvod je v příloze 7. [11, 16]



### 3.1.2 Průběh konstrukce

#### a) Obvodová řešení

Veškeré obvodové řešení bylo postupně testováno a upravováno na nepájivém poli, jak je vidět na obrázku 3.8. Odzkoušení nástroje jako celku však vzhledem k velikosti jeho dílčích částí bohužel nebylo možné. Výsledné zapojení je možné vidět v přílohách 6 a 7, kde první z nich obsahuje zapojení logické části nástroje (ovládací prvky, spínání LED diod, atd), druhá pak části analogové, tedy celkové zpracování zvukového signálu.



**Obr. 3.8** Zapojení hlavních částí nástroje při jejich vývoji a testování

#### b) Výroba korpusu

Tělo nástroje se nepodařilo (vzhledem k vzniklým omezením) vyrobit, avšak samotná výroba již započala. Pro výrobu těla bylo vzhledem k nabízené ceně zvoleno dřeva akátového, a to i přes jeho tvrdost. Prvním krokem, který je možné vidět na obrázku 3.9, bylo naměření a slepení hranolů k sobě ve dvou vrstvách, které však slepeny nejsou. Jelikož se na krku nástroje budou po dokončení nacházet ovládací prvky, bylo potřeba krk podélně rozpůlit, vyfrézovat a vyvrtat otvory pro potenciometry. Po propojení všech částí se krk opět slepí, popřípadě spojí jinou metodou. Jako další krok by následovalo vyfrézování dutiny pro uložení veškerých částí nástroje. Dále pak vyvrtání děr pro ovládací prvky, dotykovou plochu, přívod napájení a výstup zvukového signálu. Před

finální kompletací by bylo vhodné dřevo ošetřit vhodnou impregnací či jinou povrchovou úpravou.



Obr. 3.9: Výroba těla nástroje

### 3.2 Možnosti a obsluha nástroje

Jelikož se nepodařilo zkonstruovat tělo nástroje, jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, nebylo možné odzkoušet jeho plné ovládní, a nelze tedy s jistotou říct, jaké uživatelské možnosti celkový návrh nabízí. Při konstrukci a následných pokusech se samotná změna barvy LED diod projevila jen nepatrně, stále však plní alespoň estetickou funkci. Zajímavou původně neplánovanou vlastností nástroje je neobvyklým způsobem fungující pulzně šířková modulace generovaného signálu, kterou obstarává způsob napájení LED diod, jenž mělo v počátcích návrhu zajišťovat pouze změnu dynamiky hry. Po zjištění této vlastnosti byli přidány ovládací prvky pro změny frekvence této modulace, což rozšiřuje možnosti nástroje. Největší předností nástroje však zůstává především způsob ovládní a s ním spojená možnost mikrotonální hry. Na druhou stranu se bohužel během vývoje nepodařilo zprovoznit zapojení s vyšším zdrojem napětí, aby nástroj disponoval původně plánovaným rozsahem 7-8 oktáv, obdobně jako tomu je u klavíru. Zůstává tak prozatím rozsah pouze v rozmezí 5-6 oktáv. Tento drobný a do budoucna řešitelný problém je však kompenzován harmonickými složkami, u kterých si hráč může dle libosti nastavit jejich vzájemné poměry. Využitím harmonické složky je tedy možné dosáhnout rozsahu 6-7 oktáv. V situacích, kdy je měněna výška oktávy, a to převážně pak ve vyšších polohách, je při větších intervalech znát lehké glissando. Nástroj povolna zvyšuje rychlost otáček krokového motoru, aby nedošlo ke ztrátě kroku a následnému zaseknutí rotoru.

## ZÁVĚR

První část práce je zaměřena na dělení nástrojů, aby bylo možné zařadit nástroj této práce. Dále se práce zabývá historií fotoelektrických nástrojů, načež navazuje samotný princip fungování těchto nástrojů. Dále jsou rozebrány jednotlivé komponenty fotoelektrických nástrojů.

Druhá část se věnuje možnostem přepracování a úpravám těchto nástrojů. Výsledkem této části je návrh celkového konceptu experimentálního nástroje a zároveň i dílčích obvodových částí.

Praktická část se zabývá samotnou realizací navrhovaného nástroje, který byl dříve v práci navrhnut. Zkonstruovaný nástroj se drží původní konceptuální předlohy, avšak prošel zásadní proměnou a vývojem, čímž se podařilo dosáhnout lepších nežli původně plánovaných výsledků. Nástroj vyniká jednak velice atypickým způsobem ovládní a celkovým způsobem interakce, dále pak svým designem propojujícím zvuk a světla. V neposlední řadě samozřejmě samotný zvuk, který sice není nějak obzvláště neobvyklý, avšak ve výsledném spojení až dvojnásobné pulzně šířkové modulace, jemného glissanda a mikrotonální hry je přeci jen jistým způsobem specifický.

# LITERATURA

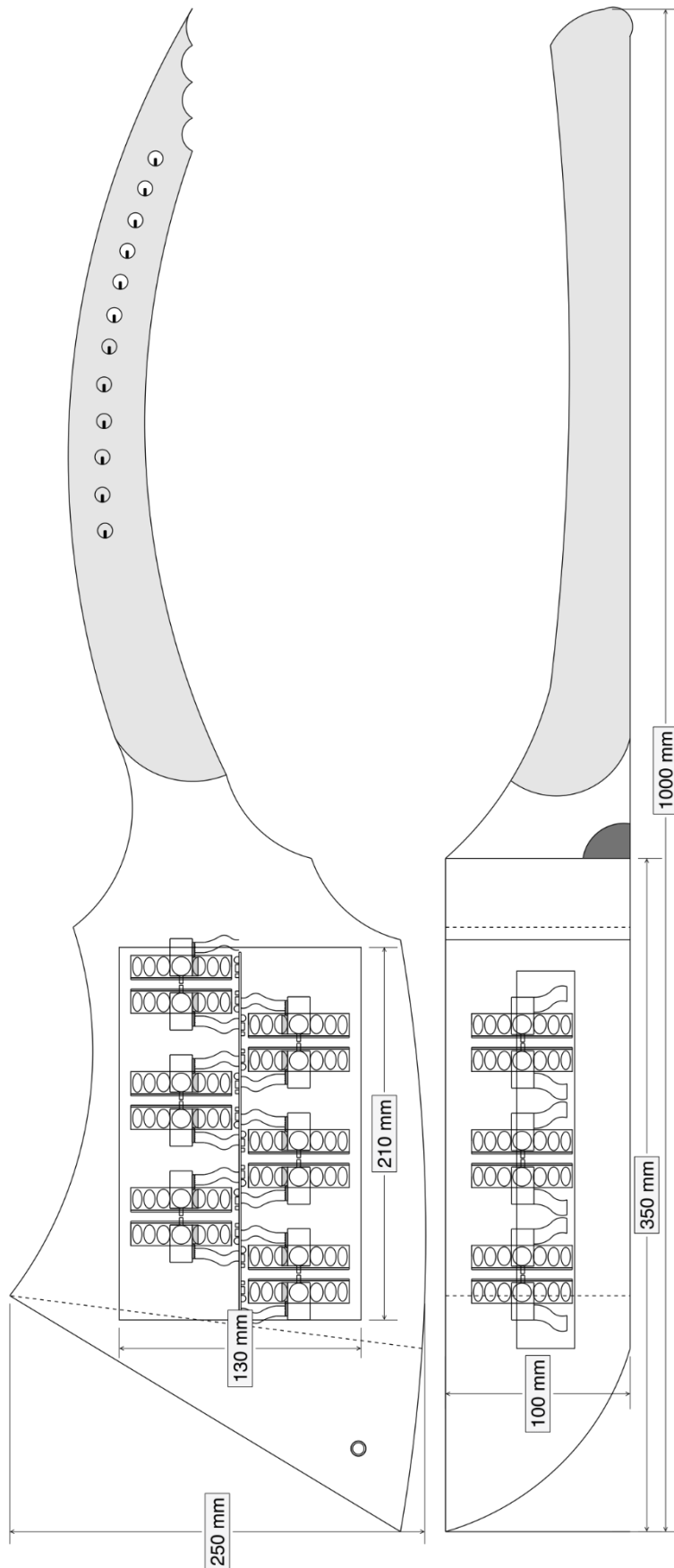
- [1] Sachsova–Hornbostelova klasifikace hudebních nástrojů. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: [cs.wikipedia.org/wiki/Sachsova–Hornbostelova\\_klasifikace\\_hudebních\\_nástrojů](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sachsova–Hornbostelova_klasifikace_hudebních_nástrojů)
- [2] GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti*. Praha: Uvnitř, 2007. ISBN 978-80-239-8446-0.
- [3] CRAB, Simon. 120 Years of Electronic Music. *120Years.net* [online]. 2019 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://120years.net/tag/photoelectric>
- [4] SMITH PH.D., Steven W. Continuous Signal Processing: The Fourier Series. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* [online]. 2011 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.dspguide.com/ch13/4.html>
- [5] ASPENCORE. Light Sensors. *Electronics tutorials* [online]. 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: [https://www.electronicstutorials.ws/io/io\\_4.html](https://www.electronicstutorials.ws/io/io_4.html)
- [6] Fotorezistor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotorezistor>
- [7] Fotodioda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotodioda>
- [8] Fototranzistor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fototranzistor>
- [9] The celluloid disks of the Superpiano for creating tones and harmonics. In: *120Years.net* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://i2.wp.com/120years.net/wordpress/wp-content/uploads/Superpiano-blackened-celluloid-disks-for-creating-sound-rich-in-harmonics-left-or-with-few-harmonics-right.-Circa-1935.jpg>
- [10] Rhythmicon Discs. In: *120Years.net* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://i2.wp.com/120years.net/wordpress/wp-content/uploads/rhythmicondiscs.png>

- [11] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. (ATMEL). *ATmega328P* [online katalogový list]. 2015 [cit. 2020-6-7]. Dostupné z: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf)
- [12] TAELMAN, Johannes. A DIY resistive ribbon sensor: Better, multi-touch version. *Ooooo.be* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://www.ooooo.be/devices/ribbon4/ribbon4.htm>
- [13] BEIJING HAIHUA BOYUAN TECHNOLOGY DEVELOPMENT CO. LTD. *THB7128-E* [online katalogový list]. 9 s. [cit. 2020-6-7]. Dostupné z: <http://www.cuteminds.com/images/download/files/datasheets/THB7128%20Instructions.pdf>
- [14] HAGMAN, Brett. *Arduino Tone Library* [online]. The MIT License (MIT), 2016 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://github.com/bhagman/Tone>
- [15] BRADLEY, David Allan. *Power Electronics*. 2nd. Abingdon: CRC Press, 2009. ISBN 0412571005.
- [16] JACKY, Jonathan. Two-chip generator shapes synthesizer's sounds. *Electronics*. 1980, (#11), 137-138. Dostupné také z: <https://www.yusynth.net/archives/Electronics/J-Jacky-ADSR-1980.pdf>

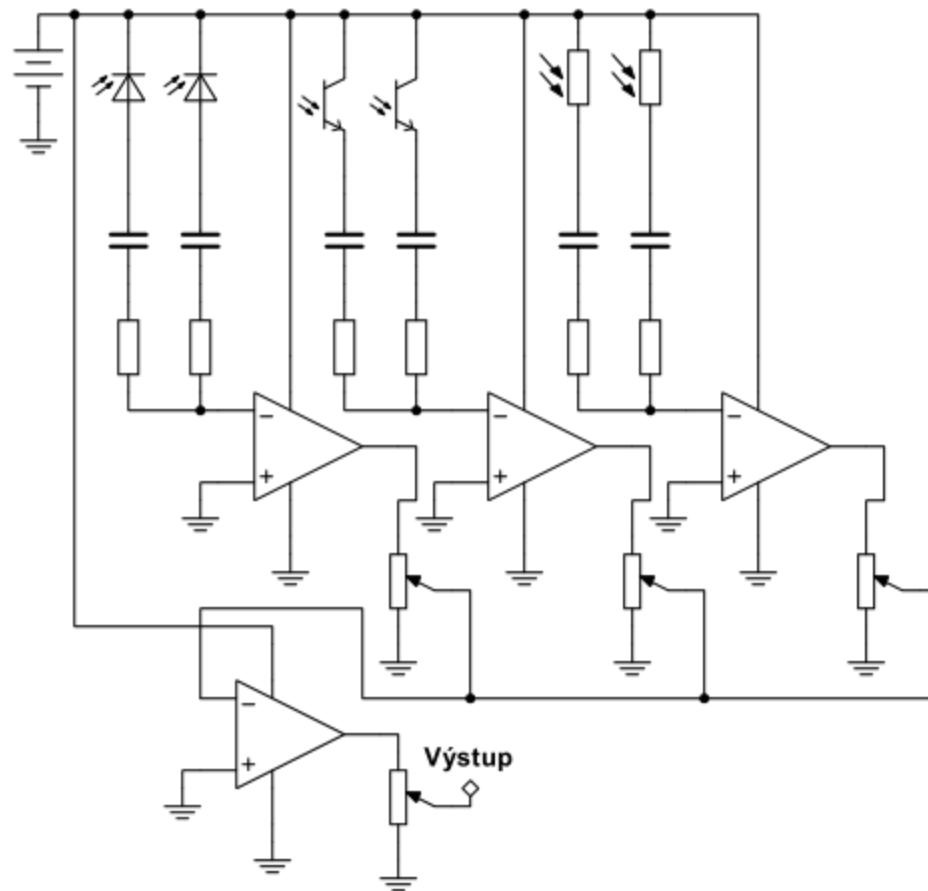
## Seznam příloh

Příloha 1 Návrh nástroje .....	39
Příloha 2 Schéma zapojení snímačů .....	40
Příloha 3 Schéma zapojení LED diod .....	41
Příloha 4 Schéma zapojení DC a krokového motoru.....	42
Příloha 5 Schéma zapojení ovládání .....	43
Příloha 6 Logická část schéma obvodového řešení nástroje.....	44
Příloha 7 Analogová část schéma obvodového řešení nástroje .....	45
Příloha 8 Program mikrokontroleru .....	46

# Příloha 1 Návrh nástroje

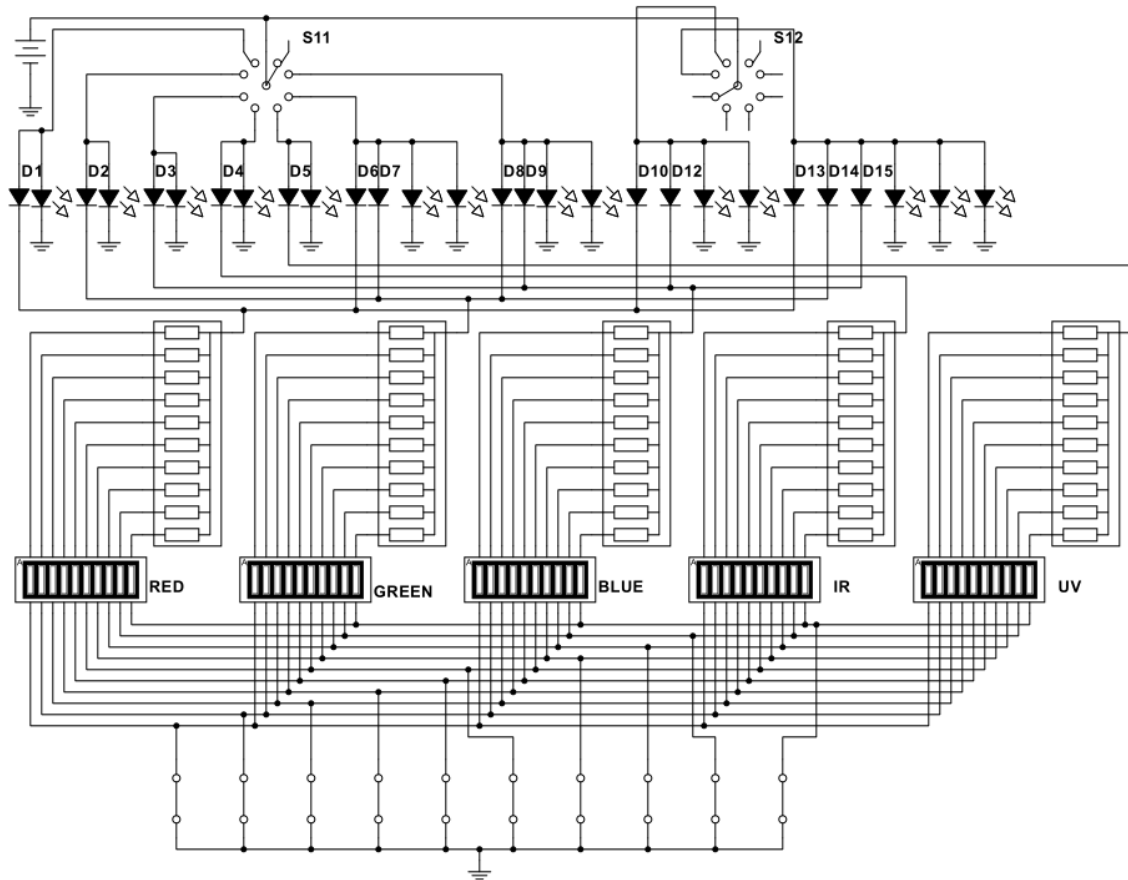


## Příloha 2 Schéma zapojení snímačů

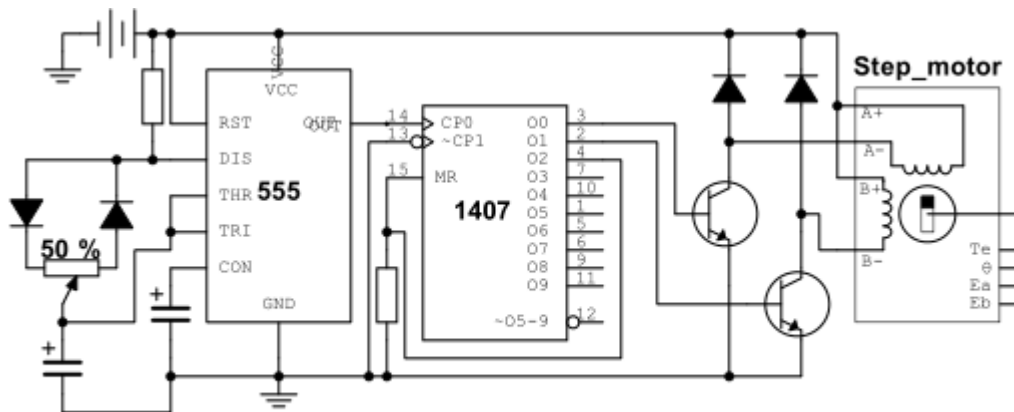
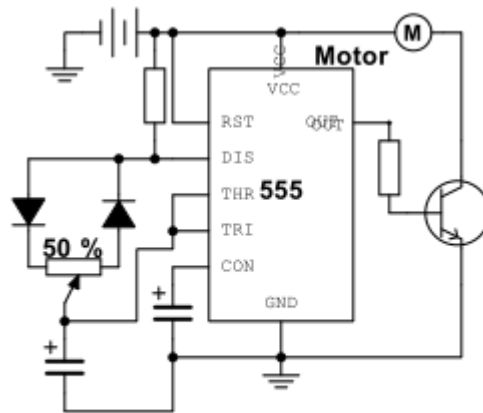




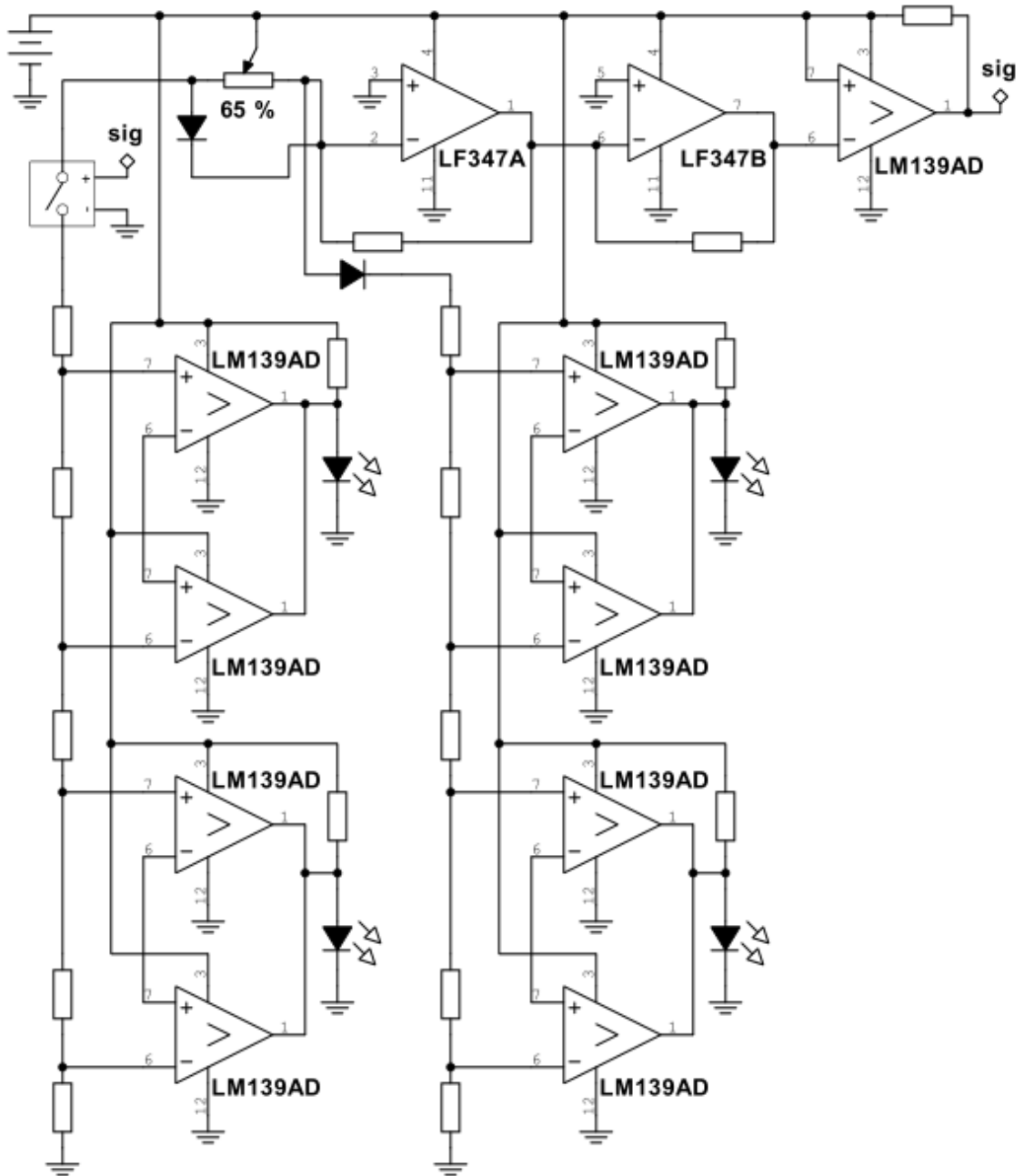
## Příloha 3 Schéma zapojení LED diod



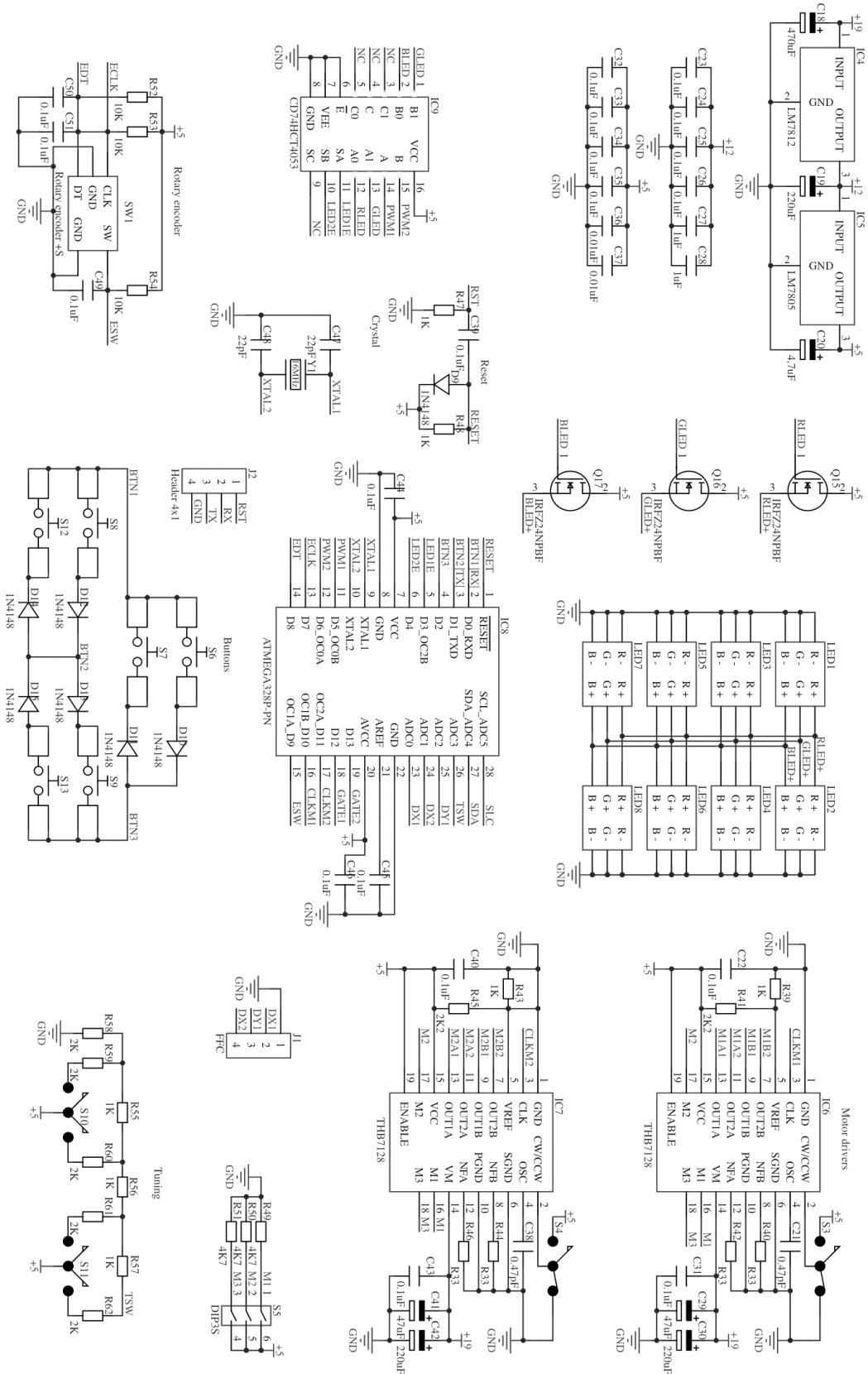
## Příloha 4 Schéma zapojení DC a krokového motoru



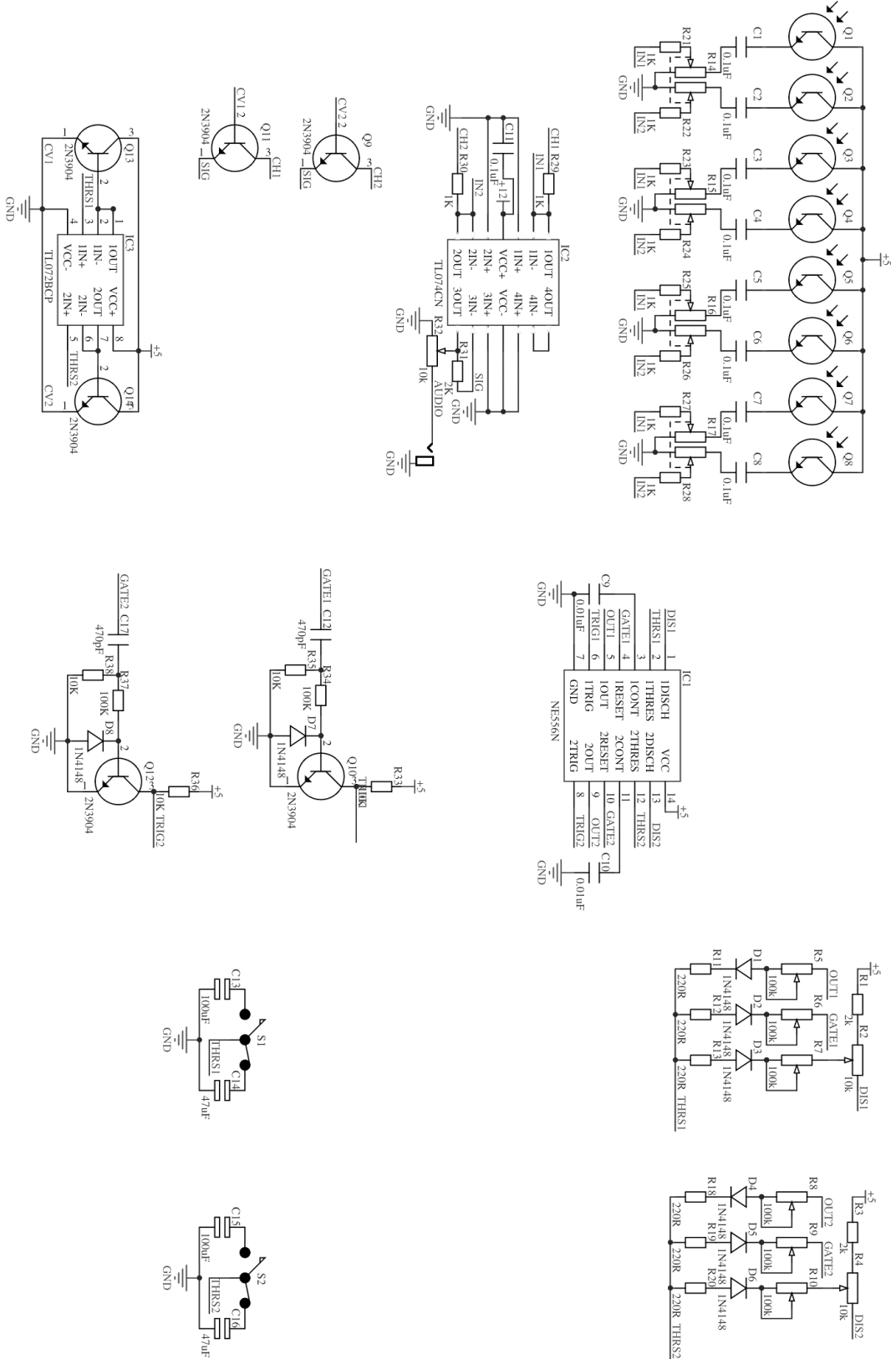
## Příloha 5 Schéma zapojení ovládání



# Příloha 6 Logická část schéma obvodového řešení nástroje



# Příloha 7 Analogová část schéma obvodového řešení nástroje



## Příloha 8 Program mikrokontroleru

```
#include <Tone.h>

#define X1          A0
#define X2          A1
#define Y1          A2
#define Tuning      A3
#define SDA         A4
#define SLC         A5
#define eSwitchPin 0
#define ePinA       1
#define ePinB       2
#define Mux1        3
#define Mux2        4
#define LED1        5
#define LED2        6
#define Buttons1    7
#define Buttons2    8
#define Buttons3    9
#define CLK1        10
#define CLK2        11
#define Gate1       12
#define Gate2       13

Tone Tone1;
Tone Tone2;

byte eLast, eSwitchLast, Octave1, Octave2, PWM;
int ePos, eSpeed, Vel, t1, t2;

void setup() {
    TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000001;
    pinMode(eSwitchPin, INPUT_PULLUP);
    pinMode(ePinA, INPUT_PULLUP);
    pinMode(ePinB, INPUT_PULLUP);
    pinMode(Buttons1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(Buttons2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(Buttons3, INPUT_PULLUP);
    pinMode(Gate1, OUTPUT);
    pinMode(Gate2, OUTPUT);
    pinMode(LED1, OUTPUT);
    pinMode(LED2, OUTPUT);
    pinMode(Mux1, OUTPUT);
    pinMode(Mux2, OUTPUT);
    Tone1.begin(CLK1);
    Tone2.begin(CLK2);
}

void loop() {
    eSwitch();
    Encoder();
    Color();
    Settings();
}
```

```

int eSwitch(){
    byte eSwitch = digitalRead(eSwitchPin);

    if (eSwitch == HIGH){
        if (eSwitchLast == LOW){
            eSwitchLast = HIGH;
        }
        else if (eSwitchLast == HIGH){
            eSwitchLast = LOW;
        }
    }
    return 0;
}
int Encoder(){
    byte eNow = digitalRead(ePinA);
    if (eLast == LOW && eNow == HIGH) {
        if(eSwitchLast==LOW)
            ePos = (digitalRead(ePinB) == LOW)?ePos--:ePos++;
        else if(eSwitchLast==HIGH)
            eSpeed = (digitalRead(ePinB) == LOW)?eSpeed--:eSpeed++;
    }
    ePos=(ePos<1)?1533:ePos;
    ePos=(ePos>1533)?1:ePos;
    eLast = eNow;
    return 0;
}
int Color(){
    // LED PWM value
    byte PWM1,PWM2;
    // Colour value
    byte Val = ePos%256;
    byte Case = ePos/256;

    digitalWrite(Mux1, (Case>2 && Case<4));
    digitalWrite(Mux2, Case<2);
    analogWrite(LED1, ((Case%2==0)?((Case>4)?Val:255-
Ys):((Case>4)?255-Ys:255-Val-Ys)));
    analogWrite(LED2, ((Case%2==0)?((Case>4)?255-
Ys:Val):((Case>4)?255-Val-Ys:255-Ys)));
}
int Settings(){
    //1
    pinMode(Buttons1, OUTPUT);
    digitalWrite(Buttons1, LOW);
    digitalRead(Buttons2); //OctUp1
    digitalRead(Buttons3); //PWMpreUp !! if Button2 & 3 > OctUp2

    if (Buttons2==LOW && Octave1<64) Octave1<<;
    if (Buttons3==LOW){
        if (Buttons2==LOW && Octave2<64) Octave2<<;
        else if (PWM<5) PWM++;
    }

    pinMode(Buttons1, INPUT_PULLUP);
    //2
    pinMode(Buttons2, OUTPUT);
    digitalWrite(Buttons2, LOW);

```

```

digitalRead(Buttons1); //OctDown1
digitalRead(Buttons3); //OctUp2

if (Buttons1==LOW && Octave1>1) Octave1>>;
if (Buttons3==LOW && Octave2<64) Octave2<<;

pinMode(Buttons2, INPUT_PULLUP);
//3
pinMode(Buttons3, OUTPUT);
digitalWrite(Buttons3, LOW);
digitalRead(Buttons1); //PWMpreDown !! if Button1 & 2 >
OctDown1
digitalRead(Buttons2); //OctDown2

if (Buttons1==HIGH){
    if (Buttons2==HIGH && Octave1>1) Octave1>>;
    else if (PWM>1) PWM--;
}
if (Buttons2==HIGH && Octave2>1) Octave2>>;

pinMode(Buttons3, INPUT_PULLUP);

if (PWM=5) TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000001;
else if (PWM=4) TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000010;
else if (PWM=3) TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000011;
else if (PWM=2) TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000100;
else TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000101;
return 0;
}
int Touch_screen() {
pinMode(Y1,OUTPUT);
digitalWrite(Y1,LOW);
pinMode(X1,INPUT);
digitalWrite(X1,LOW);
pinMode(X2,INPUT);
digitalWrite(X2,LOW);

int A = analogRead(X1);
int B = analogRead(X2);

pinMode(Y1,INPUT);
digitalWrite(Y1,LOW);
pinMode(X1,OUTPUT);
digitalWrite(X1,HIGH);
pinMode(X2,OUTPUT);
digitalWrite(X2,HIGH);

int G = analogRead(Y1);

int T = analogRead(Tuning);

int X1s = 0;
int X2s = 0;

if (A>1000&&B>1000) {
    digitalWrite(Gate1,LOW);
    digitalWrite(Gate2,LOW);
}

```



```

while (t1<(175*Octave1)){
Tone1.play(t1);
t1=t1+10;}
while (t1>(175*Octave1)){
Tone1.play(ti);
t1=t1-10;}
while (t2<(175*Octave2)){
Tone1.play(t2);
t2=t2+10;}
while (t2>(175*Octave2)){
Tone1.play(t2);
t2=t2-10;}
}
else if (A+B>800){
digitalWrite(Gate1,HIGH);
digitalWrite(Gate2,LOW);
Ys = map(G,20,250,20,0);
if (T==128||T==640||T==385){
X1s = map(B,470,247,0,100);
}
else {
if (B>470) X1s=131;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>460) X1s=139;
else if (B>450) X1s=147;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>435) X1s=156;
else if (B>420) X1s=165;
else if (B>410) X1s=175;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>400) X1s=185;
else if (B>385) X1s=196;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>365) X1s=208;
else if (B>340) X1s=220;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>325) X1s=233;
else X1s=247;
}
while (t1>(X1s*Octave1)){
Tone1.play(t1);
t1=t1-10;}
while (t1<(X1s*Octave1)){
Tone1.play(t1);
t1=t1+10;}
while (t2<(175*Octave2)){
Tone1.play(t2);
t2=t2+10;}
while (t2>(175*Octave2)){
Tone1.play(t2);
t2=t2-10;}
}
else if (A+B<800){
digitalWrite(Gate1,HIGH);
digitalWrite(Gate2,HIGH);
Ys = map(G,0,600,20,0);
if (T==128||T==640||T==385){
X2s = map(B,470,247,0,100);
}
else{
if (B>400) X2s=131;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>390) X2s=139;

```

```

else if (B>380) X2s=147;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>365) X2s=156;
else if (B>350) X2s=165;
else if (B>340) X2s=175;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>330) X2s=185;
else if (B>315) X2s=196;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>295) X2s=208;
else if (B>270) X2s=220;
else if ((T==64||T==321||T==577)&&B>255) X2s=233;
else X2s=247;
}
if (T==512||T==640||T==577) {
  X1s = map(B,470,247,0,100);
}
else {
  if (A>400) X1s=247;
  else if ((T==259||T==321||T==385)&&A>390) X1s=233;
  else if (A>380) X1s=220;
  else if ((T==259||T==321||T==385)&&A>365) X1s=208;
  else if (A>350) X1s=196;
  else if (A>340) X1s=185;
  else if ((T==259||T==321||T==385)&&A>330) X1s=175;
  else if (A>315) X1s=165;
  else if ((T==259||T==321||T==385)&&A>295) X1s=156;
  else if (A>270) X1s=147;
  else if ((T==259||T==321||T==385)&&A>255) X1s=139;
  else X1s=131;
}
while (t1>(X1s*Octave1)){
  Tone1.play(t1);
  t1=t1-10;}
while (t1<(X1s*Octave1)){
  Tone1.play(t1);
  t1=t1+10;}
while (t2<(X2s*Octave2)){
  Tone1.play(t2);
  t2=t2+10;}
while (t2>(X2s*Octave2)){
  Tone1.play(t2);
  t2=t2-10;}
}
}

```