

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Laserová harfa

Bc. Petr Holý

Diplomová práce

2020

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Holý**
Osobní číslo: **I17176**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Laserová harfa**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhněte a realizujte elektronický hudební nástroj laserová harfa. V teoretické části se zabývejte způsoby syntézy tónů a rozborů vlastností tónů. Dále popište způsoby volby konkrétních tónů, které mají být přehrány. V praktické části proveďte analýzu tónů vybraných hudebních nástrojů a tóny syntetizujte. Dále navrhnete hardwarové řešení elektronické harfy včetně desky plošných spojů. Výsledkem práce bude funkční hudební nástroj elektronická harfa s volitelnou bankou syntetizovaných tónů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] MARTINOVSKÝ, Petr. *Elektronická laserová harfa*. Praha, 2014. Středoškolská technika. Střední průmyslová škola dopravní, a.s.

[2] SYROVÝ, Václav. *Hudební signál a jeho syntéza*. Živá hudba 1986 [online]. [cit. 29. 11. 2018].

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Roleček

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

15. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019



L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Jan Píďa, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2018

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 5. 2020

Petr Holý

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí laserové 2D harfy s aditivním syntezátorem. Jsou v ní popsány základní vlastnosti zvuku a různé způsoby jeho syntézy. Součástí komplexního návrhu je návrh aditivního syntezátoru s DDS funkčními generátory, návrh řídicího obvodu a návrh rámové harfy, který zahrnuje výběr vhodných senzorů vzdálenosti, senzorů laserového paprsku a laserových modulů.

KLÍČOVÁ SLOVA

laserová harfa, syntezátor, elektronika, programování,

TITLE

Laser harp

ANNOTATION

This diploma thesis deals with designing and a construction of a 2D laser harp with an additive synthesizer. There are described basic characteristics of sound and different ways of synthesis. The part of the complex design is the design of the additive synthesizer with DDS functional generators, the design of the control circuit and the design of the framed harp, which contains selection of suitable range sensors, sensors of a laser beam and laser modules.

KEYWORDS

Laser harp, synthesizer, electronics, programming

OBSAH

1	Úvod.....	11
2	ZÁKLADNÍ FUNKCE A TYPY LASEROVÝCH HARF	12
2.1	Typy harf a jejich funkce	12
3	DRUHY ZVUKOVÉ SYNTÉZY.....	14
3.1	Aditivní syntéza	14
3.2	Rozdílová (subtraktivní) syntéza.....	14
3.3	Modulační syntéza	15
3.4	Tvarová syntéza	16
3.5	Modelující metody syntézy	17
4	ANALÝZA ZVUKU NÁSTROJŮ.....	18
5	KONCEPT FUNKČNÍ LASEROVÉ HARFY.....	23
6	SYNTEZÁTOR.....	25
6.1	Koncept aditivního syntezátoru.....	25
6.2	AD9833	26
7	DETEKCE VZDÁLENOSTI	29
7.1	Funkce detekce vzdálenosti u laserové harfy	29
7.2	HC-SR04	30
7.3	Sharp GP2Y0A60SZLF	31
7.4	VL53L0X	34
8	NÁVRH DPS A KONSTRUKCE	36
8.1	Řídící DPS.....	36
8.2	DPS syntezátoru	38
8.3	Konstrukce	39
9	PROGRAM.....	43
10	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI.....	47
11	ZÁVĚR	49

12	Použitá literatura	51
----	--------------------------	----

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 - typy laserových harf.....	12
Obrázek 2 - viditelné spektrum [12].....	13
Obrázek 3 - frekvenční spektrum obdélníkového a pilového průběhu [3].....	15
Obrázek 4 - amplitudová a kruhová modulace [13].....	16
Obrázek 5 - frekvenční spektrum tónů A (880 Hz) a A (1760 Hz) – zobcová flétna.....	18
Obrázek 6 - frekvenční spektrum tónů G (196 Hz) a D (293,7 Hz) – saxofon.....	19
Obrázek 7 - frekvenční spektrum tónů G (392 Hz) a D (587,3 Hz) – klarinet.....	19
Obrázek 8 - frekvenční spektrum tónů G-A2 - lesní roh (levá část), tóny C1 (flétna) a C1S1 (klarinet) s různou dynamikou (pravá část) [4].....	20
Obrázek 9 - frekvenční spektra tónů stupnice C dur – akustická kytara.....	21
Obrázek 10 - frekvenční spektra tónů C s rozdílnou dynamikou – akustická kytara.....	21
Obrázek 11 - vzorky tónu A - v čase (levý graf), spektrogram signálu (pravý graf) – akustická kytara.....	22
Obrázek 12 - a) rozmístění tónů stupnice C dur na laserové harfě b) koncept komponent jedné „struny“.....	23
Obrázek 13 - senzor laserového paprsku [14].....	24
Obrázek 14 – laserový modul 532nm.....	24
Obrázek 15 – blokové schéma aditivního syntezátoru.....	25
Obrázek 16 – elektrické schéma aditivního syntezátoru.....	26
Obrázek 17 – modul s DDS AD9833 [15].....	26
Obrázek 18 – princip funkce DDS[16].....	27
Obrázek 19 – blokové schéma AD9833 [5].....	28
Obrázek 20 – funkce závislosti vzdálenosti ruky od senzoru na výstupní základní frekvenci syntezátoru.....	29
Obrázek 21 – senzor vzdálenosti HC-SR04 [17].....	30
Obrázek 22 – princip funkce senzoru vzdálenosti HC-SR04 [17].....	30
Obrázek 23 – senzor vzdálenosti Sharp GP2Y0A60SZLF [18].....	31
Obrázek 24 – princip funkce senzoru vzdálenosti Sharp GP2Y0A60SZLF [19].....	31
Obrázek 25 – závislost výstupního napětí na vzdálenosti (Sharp GP2Y0A60SZLF) [9].....	32
Obrázek 26 – nelineární regrese naměřených dat.....	33
Obrázek 27– modul se senzorem vzdálenosti VL53L0X [20].....	34
Obrázek 28 – naměřené hodnoty vzdálenosti oproti hodnotám reálným [10].....	35

Obrázek 29 – schéma řídicí desky	36
Obrázek 30 – návrh řídicí desky (není zobrazen polygon země ve vrchní vrstvě).....	37
Obrázek 31 – osazená řídicí deska.....	37
Obrázek 32 – návrh desky syntezátoru (není zobrazen polygon země ve vrchní vrstvě).....	38
Obrázek 33 – osazená deska syntezátoru.....	39
Obrázek 34 – laserová harfa a plastový box s řídicí elektronikou.....	40
Obrázek 35 – osazení laserových modulů s drivery	40
Obrázek 36 – plastový box s řídicí elektronikou a syntezátorem	41
Obrázek 37 – osazení modulů se senzory vzdálenosti VL53L0X.....	41
Obrázek 38 – osazení senzorů laserového paprsku	42
Obrázek 39 – princip komunikace s DDS AD9833 [5].....	43
Obrázek 40 - funkce závislosti vzdálenosti ruky od senzoru na výstupní základní frekvenci syntezátoru.....	44
Obrázek 41 – výstupy jednotlivých harmonických tónu C (261 Hz) ze syntezátoru	47
Obrázek 42 – výstup ze syntezátoru - 1) součet všech harmonických s maximální amplitudou, 2) součet první a šesté harmonické s maximální amplitudou	48
Obrázek 43 - laserová harfa	49
Tabulka 1 - naměřené referenční hodnoty výstupního napětí pro definované vzdálenosti	32

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

2D	Two-dimensional
A/D	Analogově digitální převodník
AM DSB SC	Amplitude modulation double-sideband suppressed-carrier
API	Application Programming Interface
D/A	Digitálně analogový převodník
DDS	Direct digital synthesis
DPS	Deska plošných spojů
FM	Frequency modulation
I/O	Input/output
IR	Infrared
OZ	Operační zesilovač
PSD	Position sensitive detector
ROM	Read-only memory
STFT	Short-time Fourier transform
ToF	Time-of-flight

1 ÚVOD

Cílem práce je návrh a konstrukce 2D laserové harfy a syntezátoru tónů pro zmíněnou harfu. Laserová harfa je efektní hudební nástroj, na který se hraje tím způsobem, že při přerušení jednotlivých laserových paprsků („strun“) hraje zdroj zvuku (např. syntezátor) definované tóny. Jeden ze stanovených cílů práce je snímání vertikální pozice přerušení paprsku - tzv. 2D funkce, která nám může poskytovat nespočet možných softwarových konfigurací nástroje, který je schopen díky této funkci disponovat velmi širokým využitím.

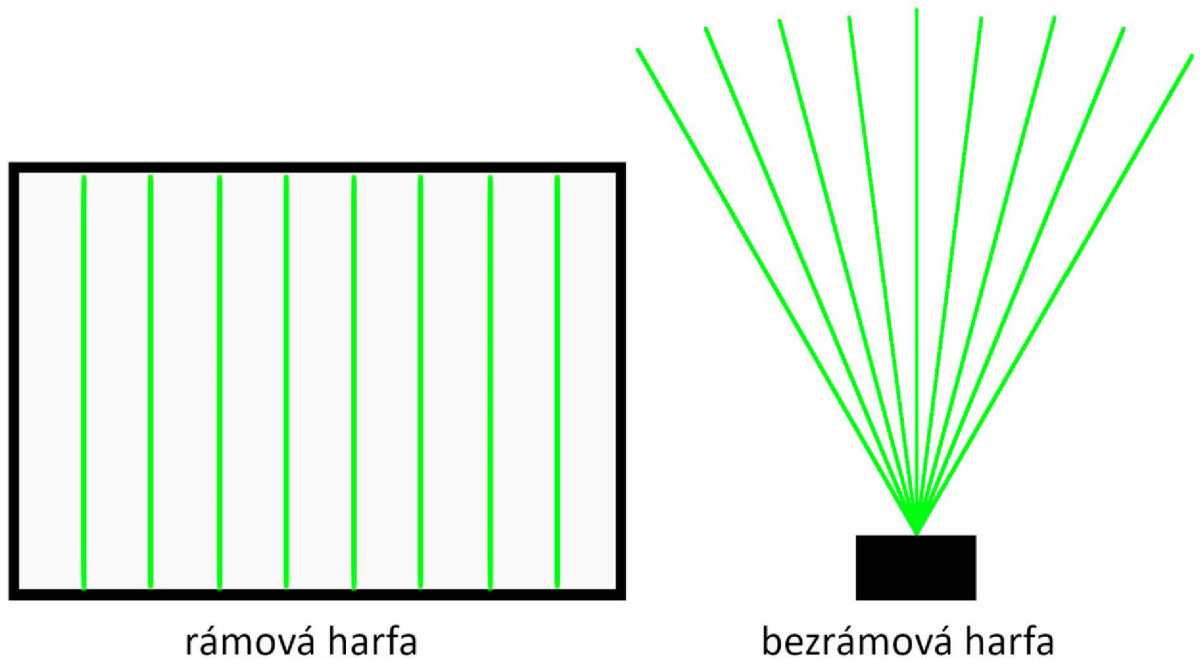
V teoretické části práce jsou představeny různé druhy laserových harf a popsána jejich funkce. Následně jsou uvedeny odlišné druhy syntéz zvuku a jejich hlavní principy. Součástí návrhu syntezátoru je rozbor základních vlastností tónů. V této části práce jsou následně spektrálně analyzovány tóny z různých hudebních nástrojů. V další kapitole je představen komplexní koncept funkční laserové harfy, a sice rozmístění čidel laserového paprsku, čidel vzdálenosti a laserů. V této kapitole je také uveden koncept 2D funkce harfy s využitím senzorů vzdálenosti. Součástí návrhu syntezátoru je zhotovení jeho blokového schématu. Následuje podrobná analýza tří různých čidel vzdálenosti pro požadovanou 2D funkci.

V praktické části je blokové schéma syntezátoru přepracované do schématu elektrického a je vytvořeno schéma základní řídicí desky. Z těchto schémat jsou následně navrženy desky plošných spojů. Následuje popis a dokumentace konstrukce laserové harfy včetně plastového boxu s řídicí elektronikou, ve kterém jsou instalovány osazené DPS. V závěru praktické části je popsán způsob programování řídicí desky. Tato kapitola obsahuje celkový popis chodu programu (komunikace s periferiemi, popis jednotlivých algoritmů atd.). Posledním bodem je ověření funkčnosti syntezátoru, kde je správnost funkce syntezátoru vyhodnocována na základě zobrazení jeho výstupu na osciloskopu při různém nastavení parametrů syntézy.

2 ZÁKLADNÍ FUNKCE A TYPY LASEROVÝCH HARF

2.1 Typy harf a jejich funkce

Laserová harfa je hudební nástroj, který proslavil v osmdesátých letech minulého století například francouzský umělec Jean Michel Jarre. Tento nástroj můžeme rozdělit na dvě dílčí části, a to na samostatnou harfu a zdroj zvuku harfy. Laserové harfy mohou být buď rámové nebo bezrámové viz obrázek 1 [1].



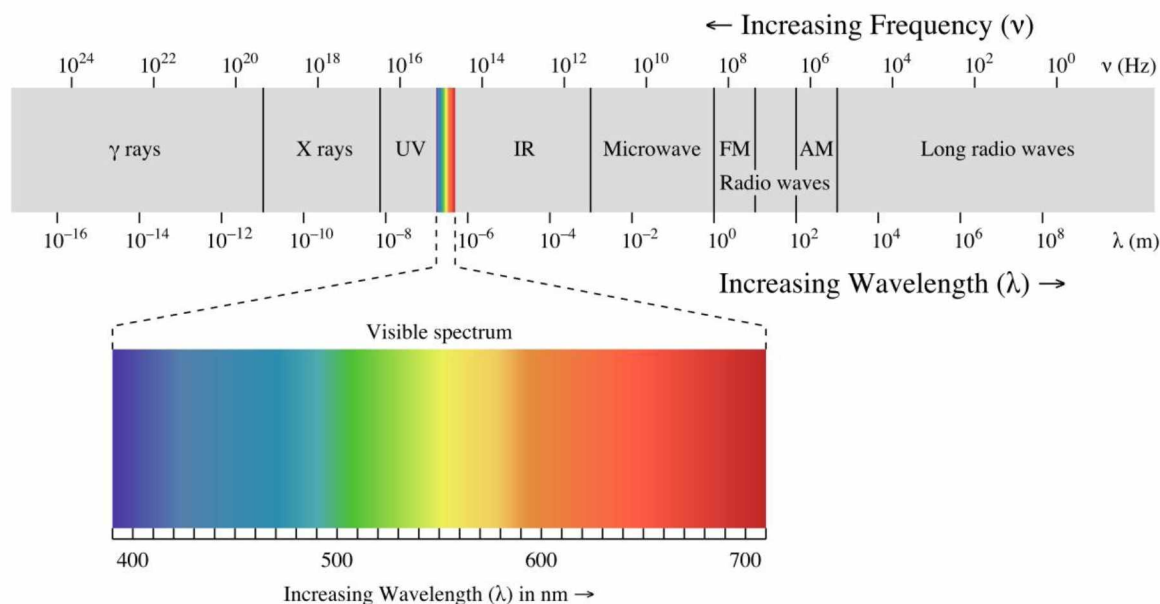
Obrázek 1 - typy laserových harf

Jak je z obrázku 1 patrné, rozdíly v základních konstrukcích laserové harfy jsou značné.

Bezrámová harfa je technicky složitější, jelikož je většinou koncipována tak, že používá pouze jeden zdroj laserového paprsku, který se „rozdělí“ do několika dalších paprsků. Tohoto rozdělení paprsku je docíleno pomocí pozičně ovladatelného zrcátka, na které je namířen zmiňovaný laser. Zrcátko se naklápí do různých definovaných pozic a laser je zapnutý pouze v tu dobu, kdy je zrcátko přesně v těchto pozicích. Mezi těmito pozicemi je přepínáno velmi rychle, proto nelze přepínání zachytit lidským okem a všechny paprsky se nám jeví tak, jako kdyby svítily nepřetržitě. Pokud některý paprsek přerušíme například rukou, odražené světlo od dlaně je zachyceno světelným senzorem, který je časově synchronizován s ovládáním zrcátka. Lze tedy zjistit, v jaké pozici bylo zrcátko při detekci odraženého světla neboli který paprsek byl přerušen [1].

Rámový typ harfy je často realizován pomocí několika laserů, kde detekce přerušení paprsku je zajištěna například pomocí optických bran u jednotlivých laserů (strun) [1].

Zelená barva paprsků laserů se volí z důvodu maximální citlivosti lidského oka pro vlnovou délku 555 nm (žlutozelené světlo) viz obrázek 2 [2].



Obrázek 2 - viditelné spektrum [13]

Další ne zcela častou funkcí laserové harfy může být detekce místa, kde byl paprsek přerušen. To znamená detekci vzdálenosti, která rozšiřuje možnosti samotného nástroje. Té se dá docílit několika způsoby, například ultrazvukovým nebo infračerveným senzorem vzdálenosti [1].

Druhou neméně důležitou částí tohoto nástroje je zdroj výsledného zvuku. Harfa může být připojena například k syntezátoru, sampleru, nebo počítači [1].

Tato diplomová práce se bude zabývat návrhem a konstrukcí rámové laserové harfy s detekcí vzdálenosti a syntezátoru, jehož funkce a vlastnosti budou popsány dále.

3 DRUHY ZVUKOVÉ SYNTÉZY

3.1 Aditivní syntéza

Aditivní (součtová) syntéza je jeden z nejstarších způsobů generování zvuku, kterou proslavili zejména varhany Hammond u kterých je využívána způsobem, že se pomocí táhel dají k základnímu tónu přidat i další subharmonické (celočíslný zlomek původní frekvence) a harmonické (celočíslný násobek původní frekvence). Zlepšení aplikace této metody syntézy přinesly až digitální syntezátory. Ty umožňují skládání až 128 harmonických. Jako další příklady nástrojů se součtovou syntézou, lze uvést například Kawai K-5 a K-5000, Synclavier, Synergy, sampler Korg DSS-1, sampler E-mu Emax 1 apod [3].

Její princip spočívá v prostém součtu harmonických sinusových i neharmonických složek. Uplatňuje se zde tzv. Fourierovský přístup. Aditivní syntetizátor je tvořen několika oscilátory a řízenými zesilovači. Jednotlivé složky tedy mají různou frekvenci, amplitudu a mohou mít i různý fázový posun. Aditivní syntézu lze popsat tímto vzorcem:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

kde,

$f(t)$ – je syntetizovaný signál,

N – je počet harmonických (nebo subharmonických) + základní tón,

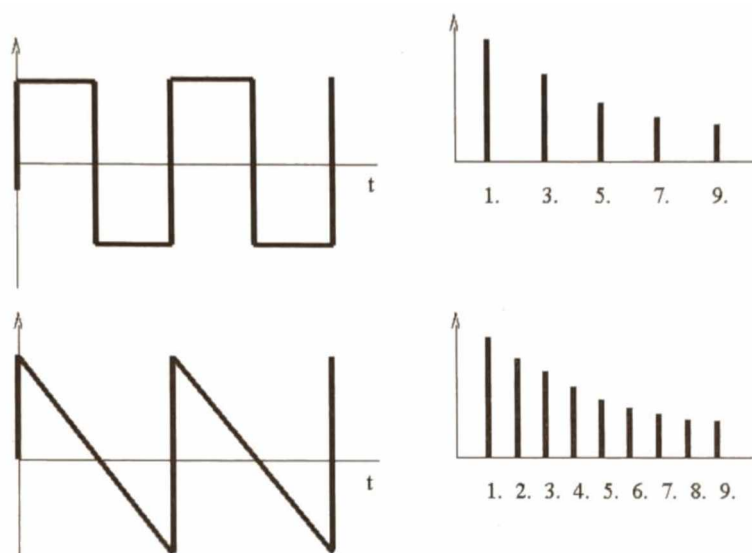
ω_k – je úhlová frekvence k-té složky,

A_k – je amplituda k-té složky,

φ_k – je fázový posun k-té složky [3].

3.2 Rozdílová (subtraktivní) syntéza

Další možností, jak syntetizovat zvuk je rozdílová syntéza, jejíž podstata je ve filtrování signálu se spektrem, které je bohaté na harmonické složky. Takový signál může být například obdélníkový, trojúhelníkový, nebo pilový průběh. Frekvenční spektrum obdélníkového průběhu obsahuje pouze liché harmonické složky na rozdíl od pilového, které obsahuje všechny harmonické složky. U obou průběhů ve spektru klesá amplituda harmonických nepřímo úměrně číslu harmonické viz obrázek 3. Filtrace signálu je nejčastěji uskutečňována filtrem typu dolní propust, někdy též horní propust, nebo propust pásmová. Přenosová charakteristika filtru pak „odečítá“ určitou část spektra původního signálu, z čehož plyne i název této syntézy [3].



Obrázek 3 - frekvenční spektrum obdélníkového a pilového průběhu [3]

Typičtí zástupci analogových syntetizátorů s rozdílovou syntézou mohou být například známé nástroje Roberta Mooga (MiniMoog, PolyMoog, Prodigy atd.), ARP (Axxe, 2600, Omni atd.), SCI (Prophet 5) a dále nástroje japonských firem Roland, Yamaha a Korg [3].

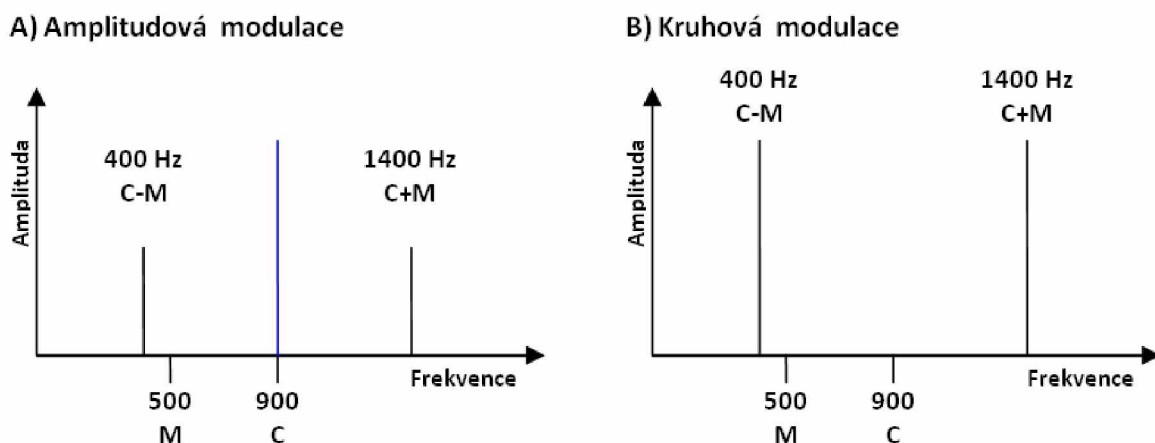
3.3 Modulační syntéza

Modulační syntéza funguje na principu modulace, tedy mění parametr modulovaného signálu (frekvence, amplituda atd.) signálem modulačním. Nejrozšířenějším a nejznámějším typem modulační syntézy je frekvenční modulace. Dále se k syntéze využívá například amplitudová modulace, která však není tolik uplatňována a kruhová modulace, která je častým doplňkem například rozdílové syntézy [3].

Kruhová modulace se od amplitudové modulace liší tím, že má potlačenou nosnou jedná se o takzvanou AM DSB SC (Dual Side Band Supressed Carrier) viz obrázek 4 [3].

Uplatnění frekvenční modulace, jejíž princip je znám již od počátku vývoje radiového přenosu signálů, bylo v hudební oblasti po dlouhou dobu spíše laboratorní záležitostí. Nejúspěšnější byly FM syntetizátory Yamaha, které byly stavěné na bázi specializovaných obvodů. FM modulace dosáhla ze všech modulačních metod největšího komerčního uplatnění [3].

Například u základní řady Yamaha DX a TX FM syntezátory obsahují jednoduché sinusové oscilátory a řízené zesilovače. Oscilátor se zesilovačem tvoří takzvaný operátor. Operátory jsou spojené do schématu (algoritmu), kterých je například v syntezátoru DX-7 celých 32. Operátor může být buď takzvaný nosič, nebo modulátor. Spojením modulátoru a nosiče vznikne základ FM syntézy, která má obrovské zvukové možnosti [3].



Obrázek 4 - amplitudová a kruhová modulace [14]

3.4 Tvarová syntéza

Na rozdíl od předchozích metod syntézy tvarová syntéza nepracuje ve frekvenční oblasti. Tvarové metody pracují tak, že generují a modifikují časový průběh (tvar generovaného signálu). Mezi tyto metody řadíme například nelineární tvarování, které funguje na základě zkreslení sinusového průběhu nelineárním obvodem. Důsledek nelinearity je vznik součtových a rozdílových složek. Výstupní signál je tak obohacen o další harmonické. Další metodou tvarové syntézy může být například metoda aproximační, segmentační, granulační nebo lineárně-tvarová [3].

Poslední zmíněná metoda (lineárně-tvarová) našla na rozdíl od ostatních širší komerční uplatnění. Její princip tkví v záznamu – sejmutí a zpětném přehrání libovolného audiosignálu. Zařízení, které využívá tento typ syntézy se nazývá sampler. Analogový signál je pomocí A/D převodníku pulzně kódovou modulací převeden na signál digitální, který je v přístroji uložen. Samplery obsahují řídicí a číslicově simulované obvody, které jsou podobné obvodům používaným v rozdílové syntéze, a proto jsou plnohodnotnými nástroji s velikými zvukovými možnostmi. Některé typy mohou obsahovat i ještě další možnosti syntézy (součtová, FM). Nástroje (samplery), které využívají lineárně-tvarovou metodu syntézy jsou například: Akai S-1000, E-mu (Emulator (1-4), Emax 1 a 2), Ensoniq (Mirage, EPS, ASR) a spousta dalších nástrojů například od výrobce Korg, Roland a Yamaha [3].

3.5 Modelující metody syntézy

Modelující metody syntézy se od ostatních metod liší tím, že zatímco ostatní zmíněné metody a technologie simulovaly zvuk, tato metoda syntézy se snaží simulovat přímo hudební nástroj. Jedná se o takzvané virtuálně akustické syntezátory. S touto zcela odlišnou koncepcí syntézy přišla v devadesátých letech minulého století firma Yamaha. Nástroje od této firmy série VL-1 byly založeny na matematických modelech velice složité mechanicko-akustické soustavy, kterou může být jakýkoliv hudební nástroj nebo lidské hlasové ústrojí. Jedná se tedy o takzvané „matematické modelování“ a výsledkem výpočetního procesu je komplexní audiosignál. Pro tuto aplikaci se používají rychlé a výkonné signálové procesory, nebo dokonce systém multiprocesorový. Možnosti této syntézy jsou obrovské. Dají se modelovat například i nástroje které reálně neexistují, nebo existovat ani nemohou. Mimo klasickou metodu matematického modelování existuje například ještě syntéza modální, syntéza McIntyre, Schumacher a Woodhous, nebo syntéza vlnovodů [3].

Jak již bylo zmíněno, tato diplomová práce se bude zabývat návrhem a konstrukcí rámové laserové harfy s detekcí vzdálenosti a syntezátoru. Pro navrhovaný syntezátor byla zvolena aditivní metoda syntézy [3].

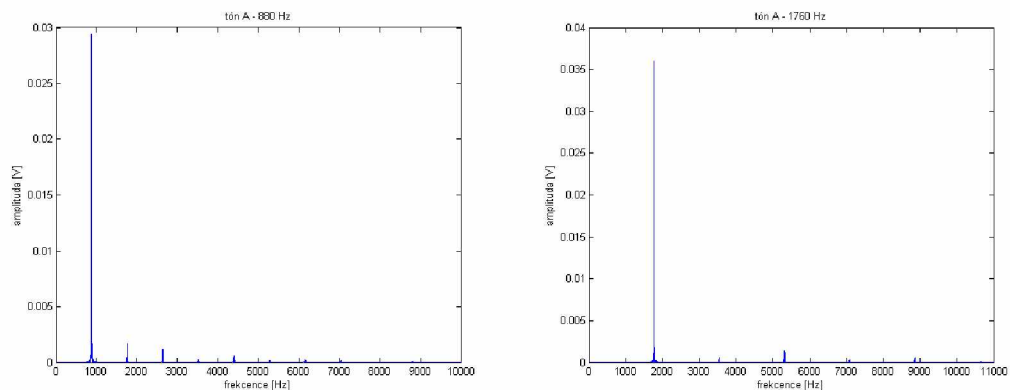
4 ANALÝZA ZVUKU NÁSTROJŮ

V této kapitole budou analyzovány základní vlastnosti zvuku hudebních nástrojů.

Přesto, že dva nástroje vydávají stejný tón, jsme schopni je od sebe zcela jistě rozeznat, což je dáno jejich odlišnou barvou zvuku. Barva libovolného zdroje zvuku je způsobena vyššími harmonickými frekvencemi, jejichž amplitudy a počet ji definují [4].

Velmi významnou prací týkající se analýzy problematiky barvy tónů jsou zajisté zákony barvy zvuku od E. Schumanna z roku 1929, které důkladně rozebírají vlastnosti barev zvuků dechových nástrojů. Schumann publikuje 4 zákony, a sice zákon formantových oblastí, zákon formantových intervalů, zákon akustického posuvu a zákon akustického skoku [4].

Pro spektrální analýzu zvuků byly nahrány tóny 4 různých nástrojů na mikrofon SHURE SM57. Na obrázku 5 je zobrazeno frekvenční spektrum dvou různých tónů zahráných na zobcovou flétnu. Z frekvenční analýzy, která byla realizována pomocí programu MATLAB je zřejmé, že zvuk zobcové flétny není bohužel nijak bohatý na vyšší harmonické složky.



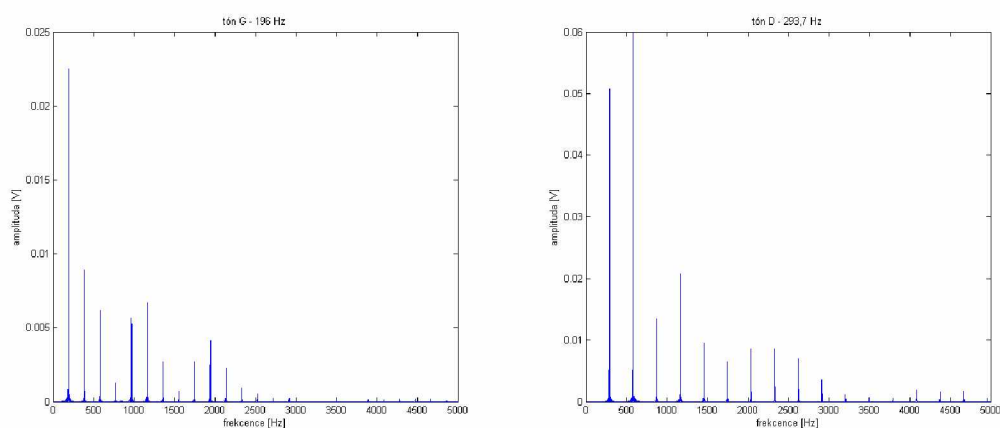
Obrázek 5 - frekvenční spektrum tónů A (880 Hz) a A (1760 Hz) – zobcová flétna

Dalším zdrojem zvuku pro frekvenční analýzu byl tenorový saxofon viz obrázek 6. Na rozdíl od zobcové flétny si můžeme všimnout, že je zde velký počet vyšších harmonických s poměrně velkými amplitudami. I přesto, že se jedná o stejný nástroj, je z frekvenčního spektra patrné, že jednotlivé vyšší harmonické v poměru k základní harmonické nemají v případě dvou různých tónů stejnou amplitudu. Stejně tak tomu je i u klarinetu viz obrázek 7.

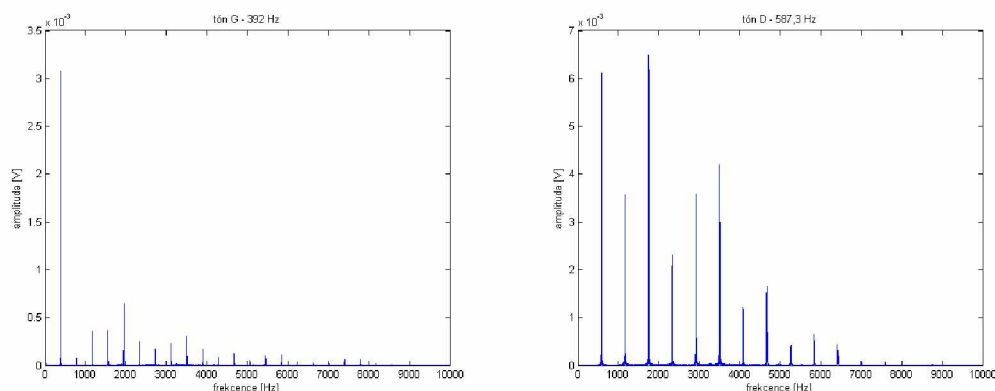
Tato vlastnost je popsána v Shumannově prvním zákoně formantových oblastí. Formantová oblast je interval, kde se nachází lokální maximum (harmonická složka s největší amplitudou). Zvyšuje-li se výška tónů a dynamika je konstantní, zůstává špička (maximum) určené

formantové oblasti na stejné vyšší harmonické do překročení horní hranice oblasti viz obrázek 8 levý graf [4].

Tento zákon tedy popisuje závislost výšky tónu na jeho barvě. Výška tónu však není jediný faktor, který ovlivňuje jeho výslednou barvu. Třetí ze Schumannových zákonů (zákon akustického posuvu) popisuje závislost barvy tónu na dynamice. Pokud tedy budeme hrát stejný tón s různou dynamikou docílíme i odlišné barvy tónu viz obrázek 8 grafy v pravé části [4].



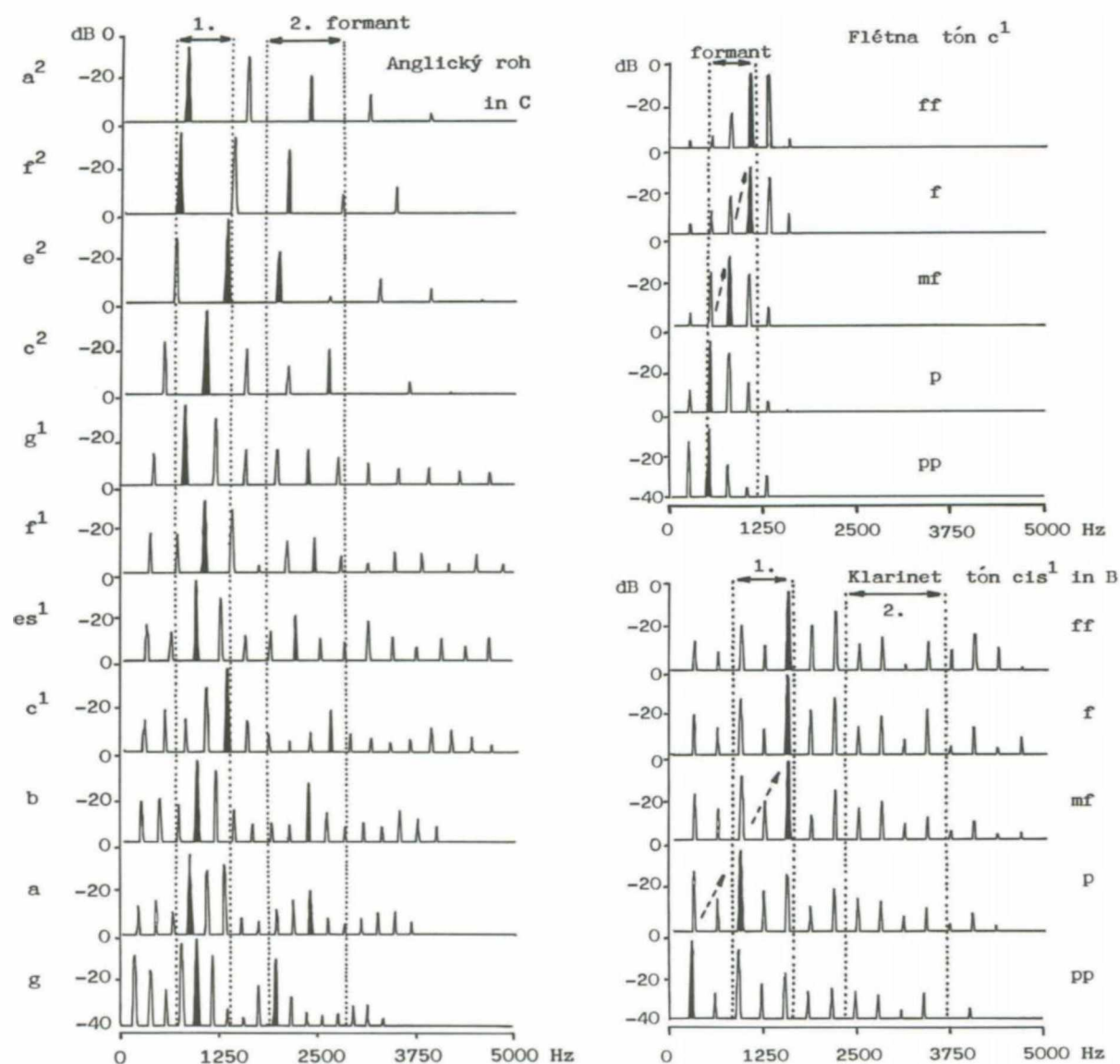
Obrázek 6 - frekvenční spektrum tónů G (196 Hz) a D (293,7 Hz) – saxofon



Obrázek 7 - frekvenční spektrum tónů G (392 Hz) a D (587,3 Hz) – klarinet

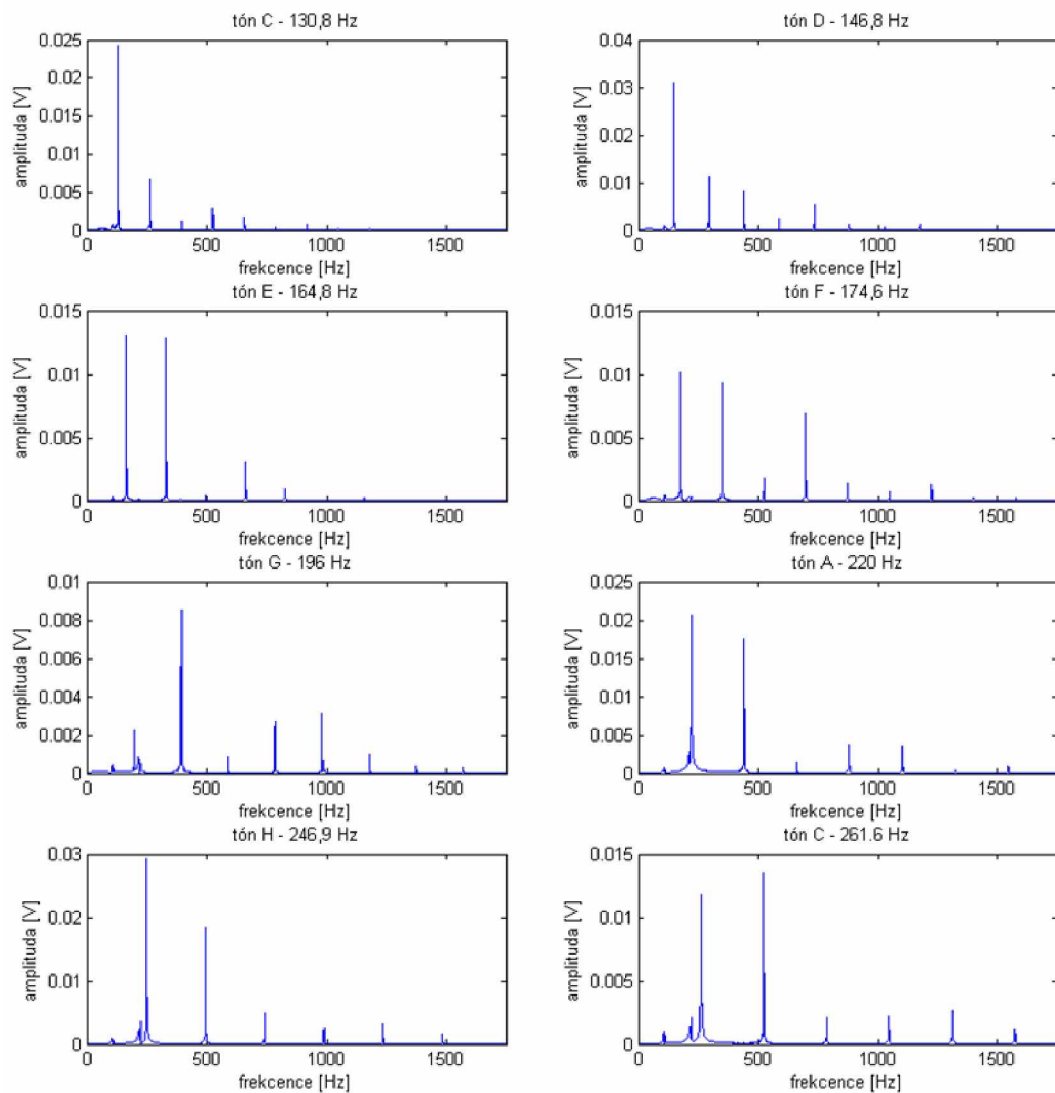
Čtvrtým nástrojem, který byl nahráván pro analýzu byla klasická akustická kytara s nylonovými strunami. Platnost Schumannových zákonů by se měla vztahovat pouze na dechové nástroje, ale jak je z obrázku 9 (frekvenční spektrum stupnice C dur) patrné, i zde se s výškou tónu mění poměry amplitud vyšších harmonických ku základní frekvenci tónu, tudíž dochází ke změně jeho barvy [4].

Na obrázku 10 lze vidět frekvenční spektrum stejného tónu akustické kytary, ale zahráného s jinou dynamikou. Rozdíly ve spektrech vypovídají o platnosti závislosti barvy tónu na jeho dynamice. U akustické kytary můžeme tedy také pozorovat změny barev tónů při změně výšky nebo dynamiky.

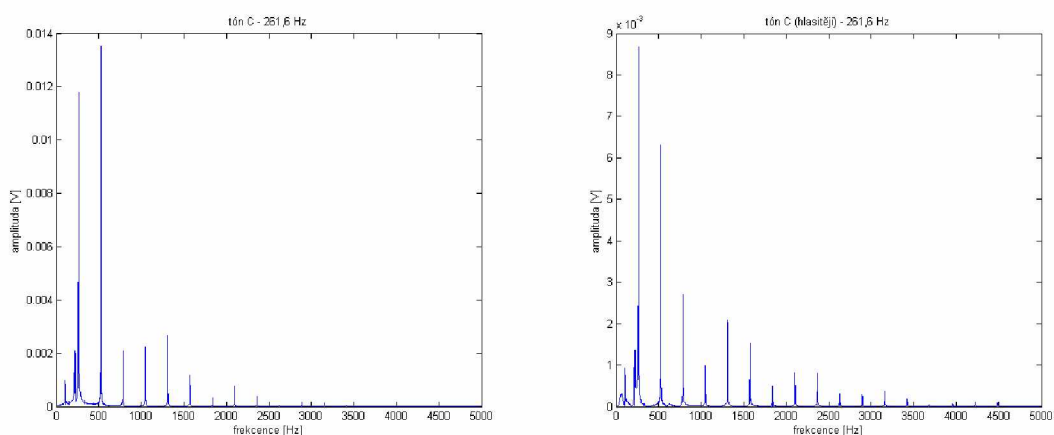


Obrázek 8 - frekvenční spektrum tónů G-A2 - lesní roh (levá část), tóny C1 (flétna) a CIS1 (klarinet) s různou dynamikou (pravá část) [4]

Dechové nástroje se od strunných (drnkacích a kladívkových) liší v tom, že je u nich možné nějakou dobu „držet tón“ a změny frekvenčního spektra v čase nebudou tak veliké. U zmíněných strunných nástrojů však po úderu do struny dochází k postupnému útlumu tónu, což znamená změnu frekvenčního spektra v čase a tím pádem i změnu barvy tónu v čase viz spektrogram na obrázku 11, kde je tento jev dobře viditelný.



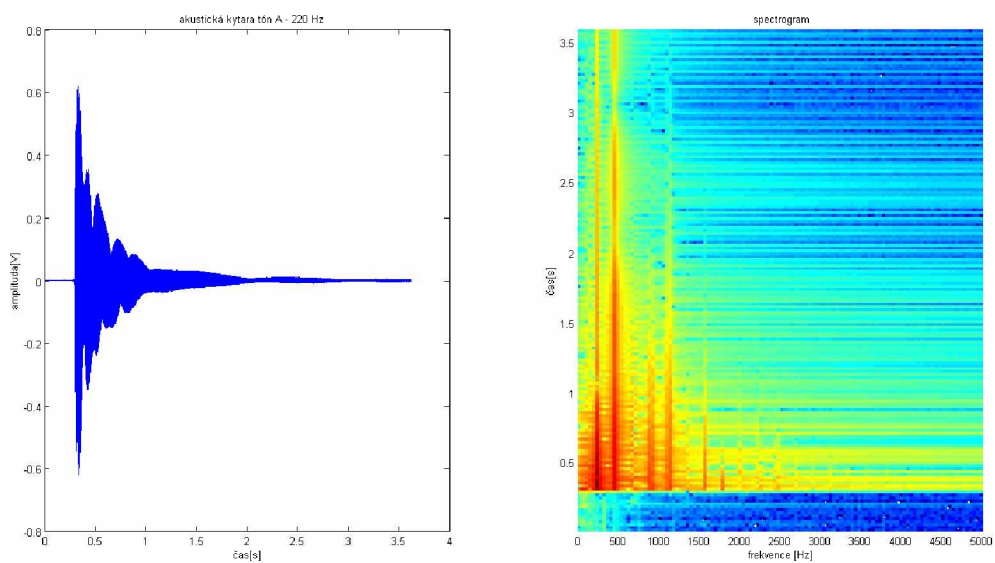
Obrázek 9 - frekvenční spektra tónů stupnice C dur – akustická kytara



Obrázek 10 - frekvenční spektra tónů C s rozdílnou dynamikou – akustická kytara

Spektrogram používá takzvanou STFT (short-time Fourier transform) pro analýzu frekvenčního spektra signálu v čase. Jeho výpočet a vykreslení bylo realizováno v programu

MATLAB, kde bylo zvoleno obdélníkové výběrové okno o velikosti 1024 vzorků, překrytí o velikosti 102 vzorků, což nám při 159597 vzorcích signálu dává 172 časových úseků.

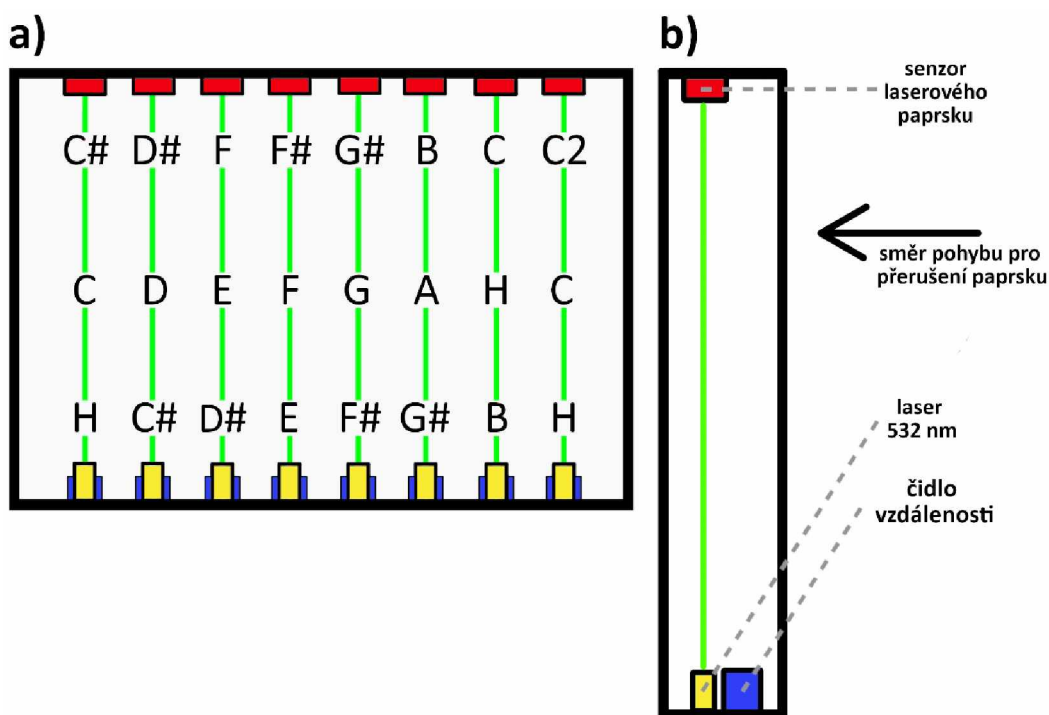


Obrázek 11 - vzorky tónu A - v čase (levý graf), spektrogram signálu (pravý graf) – akustická kytara

5 KONCEPT FUNKČNÍ LASEROVÉ HARFY

Cílem práce je tedy zhotovit laserovou harfu s aditivním syntezátorem a detekcí vzdálenosti. Laserová harfa bude mít osm strun (laserů). Co se týče využití čidel vzdálenosti, je zde velmi mnoho možností konfigurace nástroje. V této práci bude zvoleno takové nastavení nástroje, že po přerušení libovolné „struny“ ve středním pásmu bude syntezátor hrát základní tón příslušící dané struně. Pokud budeme ruku posouvat vertikálně směrem nahoru, přeladí se plynule syntezátor na tón, který bude o půltón vyšší než tón základní. Při pohybu ruky dolů se analogicky dostaneme na tón o půltón nižší viz obrázek 12 a), na kterém jsou pro ilustraci zvoleny základní tóny stupnice C dur.

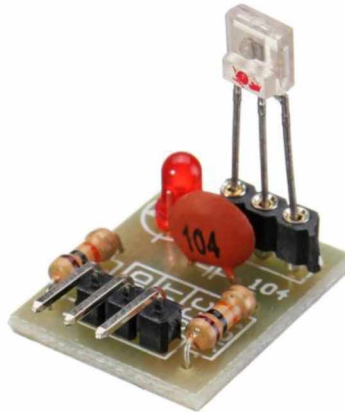
Pokud přerušíme paprsek v horním pásmu struny, které začíná deset centimetrů pod horním rámem, bude syntezátor hrát tón o půltón vyšší, než je základní tón dané „struny“. Pokud přerušíme paprsek v dolním pásmu struny, které končí deset centimetrů od spodního rámu (čidla vzdálenosti), bude syntezátor hrát tón o půltón nižší, než je základní tón.



Obrázek 12 - a) rozmístění tónů stupnice C dur na laserové harfě b) koncept komponent jedné „struny“

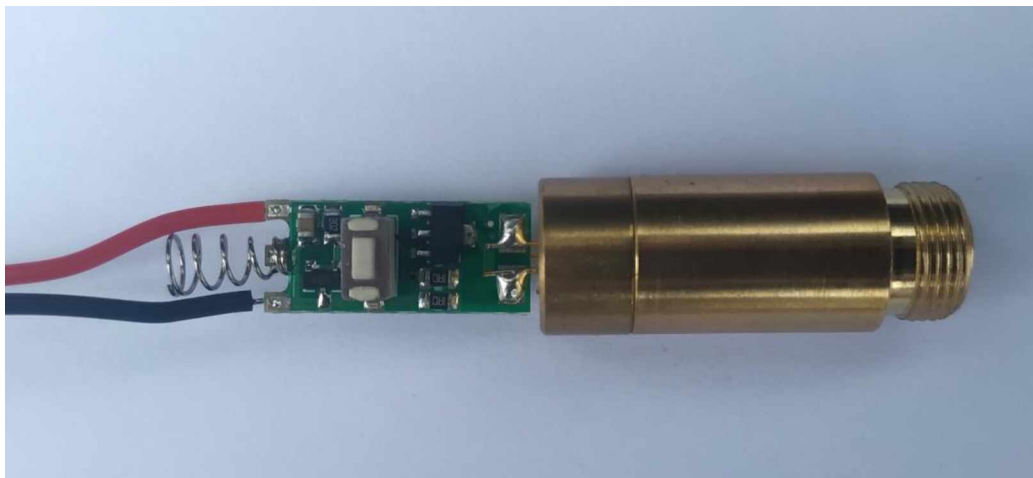
Každá struna se z komplexního pohledu bude skládat ze tří základních komponent viz obrázek 12 b). Bude tedy obsahovat senzor laserového paprsku pro vytvoření optické brány, čidlo vzdálenosti pro možnost získat informaci o poloze ruky a samostatný laser. Veškeré informace z laserové harfy budou dále zpracovány a vyhodnoceny procesorem, který na jejich základě bude řídit aditivní syntezátor.

Aditivní syntezátor se bude skládat z šesti generátorů harmonických průběhu a sumačního zesilovače. U každé harmonické bude možné nastavit její amplitudu.



Obrázek 13 - senzor laserového paprsku [15]

Jako senzor laserového paprsku byl vybrán modul s čidlem IS0203 viz obrázek 13. Laserový modul s výkonem 50 mW a vlnovou délkou 532 nm, který bude v práci použit je zobrazen níže na obrázku 14. Skládá se z polovodičového laseru (laserové diody) umístěné v mosazném pouzdře, čočky pro kolimaci paprsku a driveru.

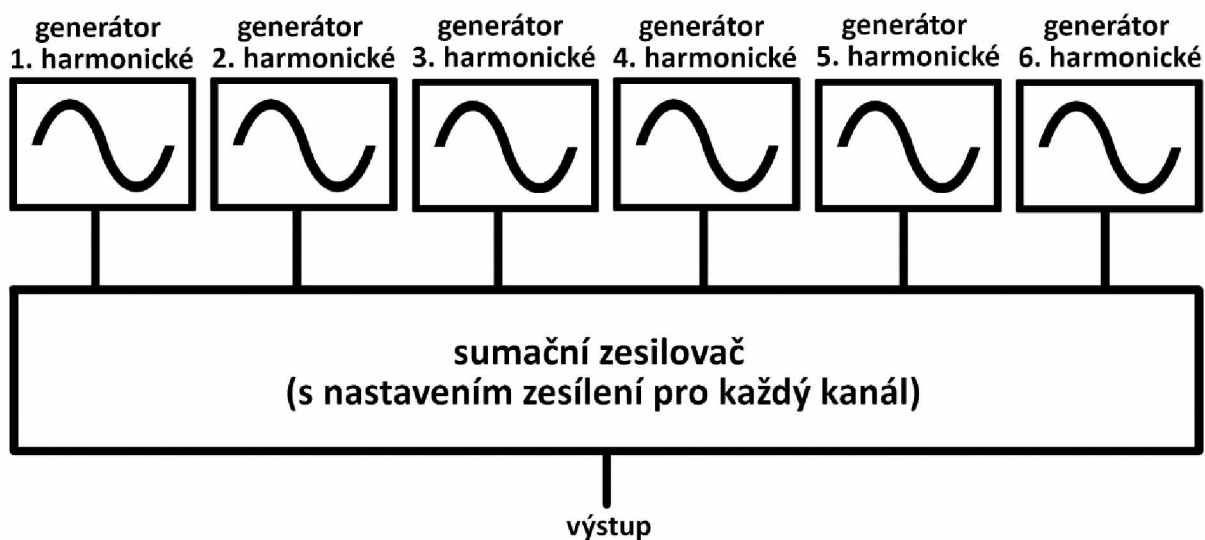


Obrázek 14 – laserový modul 532nm

6 SYNTEZÁTOR

6.1 Koncept aditivního syntezátoru

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole syntezátor bude obsahovat 6 generátorů harmonického průběhu s možností nastavení amplitudy viz blokové schéma na obrázku 15. Generátory budou realizovány integrovaným obvodem AD9833, který funguje na bázi DDS (direct digital synthesis) [5].



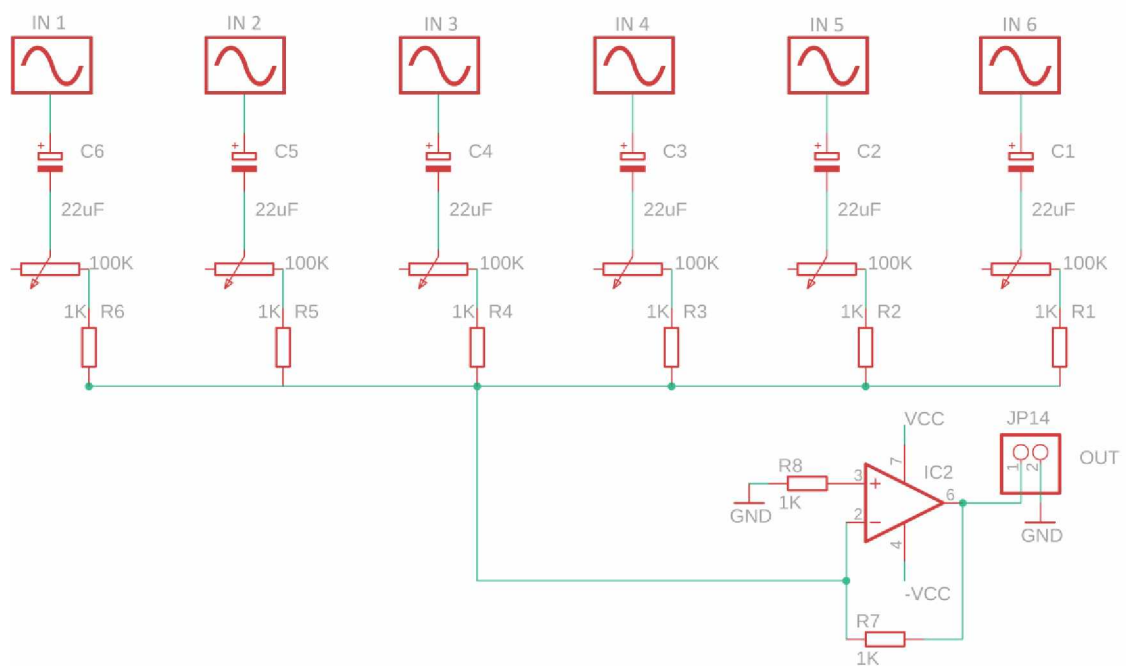
Obrázek 15 – blokové schéma aditivního syntezátoru

Komplexní syntezátor se tedy bude skládat z generátorů harmonických funkcí a sumačního zesilovače. Za každým generátorem se bude nacházet elektrolytický kondenzátor pro odstranění stejnosměrné složky ze signálu a potenciometr 100 k Ω v sérii s odporem 1 k Ω pro nastavování amplitudy. Ve zpětné vazbě sumačního zesilovače bude odpor s hodnotou 1 k Ω viz schéma na obrázku 16 [6].

Operační zesilovač v aplikaci sumačního zesilovače bude mít definované napětí na výstupu:

$$U_{výst} = -R_z \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \frac{U_4}{R_4} + \frac{U_5}{R_5} + \frac{U_6}{R_6} \right)$$

Ze vzorce je zřejmé, že pokud bude mít u určitého kanálu potenciometr nulový odpor bude amplituda příslušné harmonické na výstupu syntezátoru rovna amplitudě, kterou má signál na výstupu z AD9833. Při zvyšování odporu potenciometru bude amplituda signálu klesat až do zesílení $A = -\frac{1}{101}$ [6].

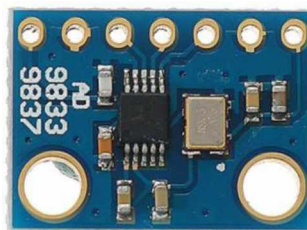


Obrázek 16 – elektrické schéma aditivního syntezátoru

Pro syntezátor byl vybrán operační zesilovač OPA197, jehož symetrické napájení bylo při testování obvodů realizováno integrovaným obvodem TMA 0505D, což je převodník stejnosměrného napětí [7]. Tento obvod však přinášel nežádanou interferenci na výstupu syntezátoru. Pro správnou funkci OZ byl tedy přidán další externí zdroj o napětí 5 V pro vytvoření symetrického napájení.

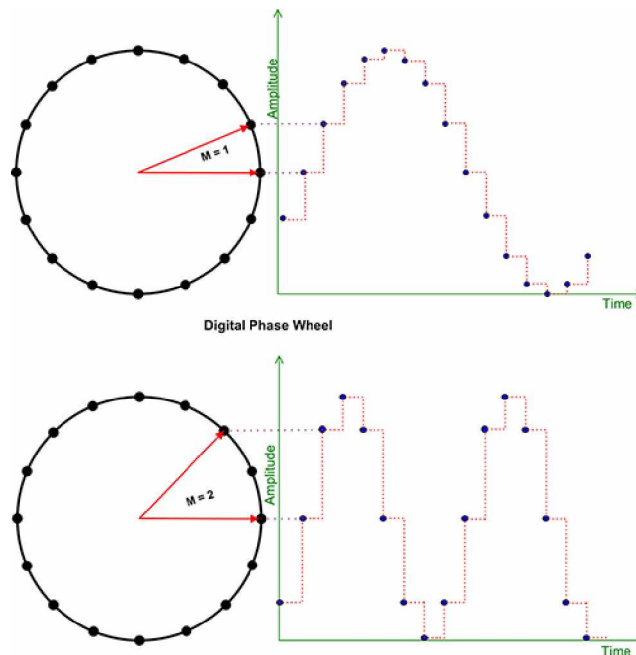
6.2 AD9833

AD9833 je programovatelný generátor funkcí, které jsou tvořeny metodou DDS (direct digital synthesis). Tato metoda umožňuje generování funkcí s jedním pevným zdrojem referenčních hodin. AD9833 umožňuje generovat harmonické, obdélníkové a pilovité průběhy až do frekvence 12.5 MHz. Integrovaný obvod se skládá ze čtyř základních částí, a sice číslicově řízeného oscilátoru s fázovým modulátorem, paměti ROM obsahující hodnoty amplitud harmonického průběhu, D/A převodníku a regulátoru viz obrázek 19 [5].



Obrázek 17 – modul s DDS AD9833 [16]

Číslicově řízený oscilátor s fázovým modulátorem se skládá z dvou frekvenčních registrů, 28-bitového fázového akumulátoru a fázových registrů, které slouží pro nastavení ofsetu fáze. Nastavovat ofset fáze v této aplikaci nebude potřebné. Zmíněné frekvenční registry $FREQ0$ a $FREQ1$ jsou možné vstupy do fázového akumulátoru. Fázový akumulátor škáluje rozsah od 0 do 2π . Nastavujeme-li určitou frekvenci, měníme tím velikost kroku, se kterým se pohybujeme po rozsahu fázového akumulátoru. Čím větší frekvence, tím větší krok, a naopak viz obrázek 18 [5].



Obrázek 18 – princip funkce DDS[17]

Nastavení tohoto kroku samozřejmě závisí i na frekvenci referenčních hodin u AD9833. U modulů, které budou pro syntezátor použity viz obrázek 17 jsou krystaly 25 MHz. Pro výpočet velikosti kroku tedy použijeme následující rovnici:

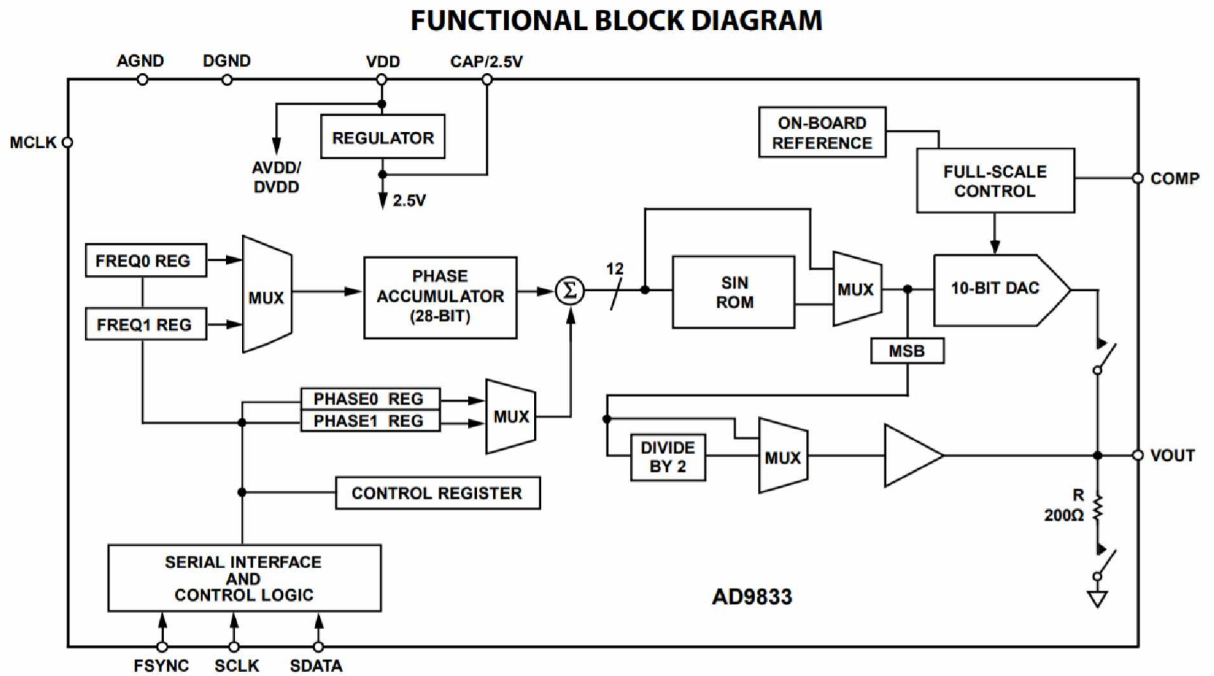
$$f = \Delta\text{Phase} * f_{MCLK} / 2^{28}$$

kde f je požadovaná frekvence, ΔPhase je zmíněný krok a f_{MCLK} je frekvence referenčních hodin. Po dosazení dostáváme pro výpočet kroku tento vztah:

$$\Delta\text{Phase} = \frac{2^{28}}{25 * 10^6} * f$$

Druhou částí integrovaného obvodu AD9833 je paměť ROM obsahující hodnoty amplitud harmonického průběhu, která používá informaci o fázi pro adresování „tabulky“ hodnot amplitud, do kterých tuto informaci konvertuje [5].

Konvertovaná informace o fázi do příslušné digitální reprezentace amplitudy je v další části, kterou je D/A převodník, převedena na odpovídající analogové napětí. D/A převodník generuje signál o mezivrcholové hodnotě napětí cca 0,6 V [5].

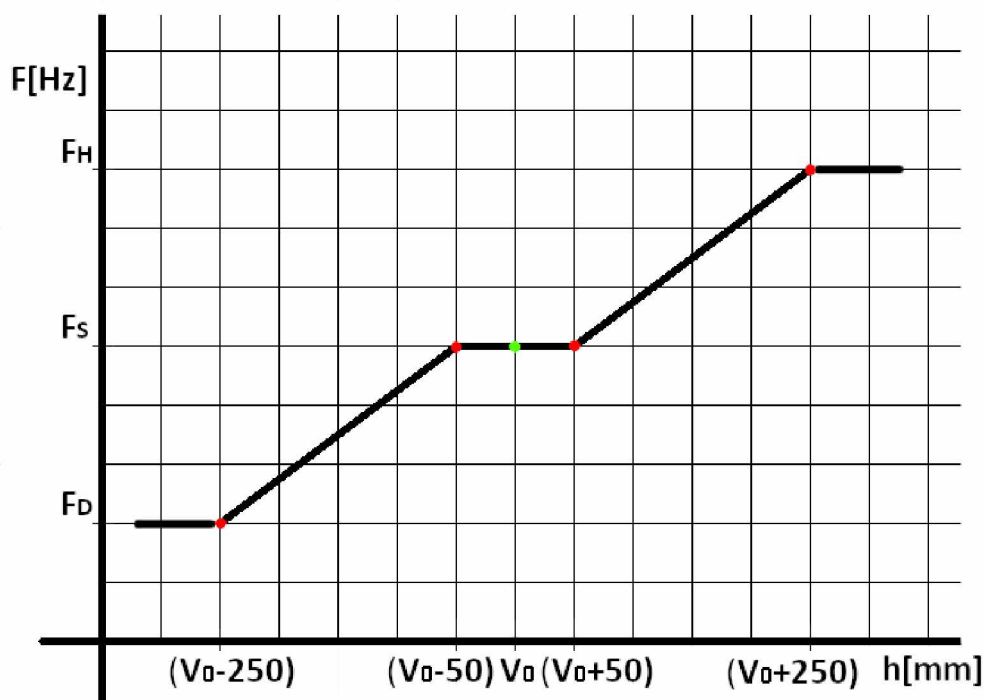


Obrázek 19 – blokové schéma AD9833 [5]

7 DETEKCE VZDÁLENOSTI

7.1 Funkce detekce vzdálenosti u laserové harfy

Detekce vzdálenosti přerušení paprsku u laserové harfy velmi rozšiřuje její možnosti. Informace, kde byl konkrétní paprsek přerušen bude v této práci použita pro spojitě přeladování frekvence všech generátorů jednotlivých harmonických složek v aditivním syntezátoru.



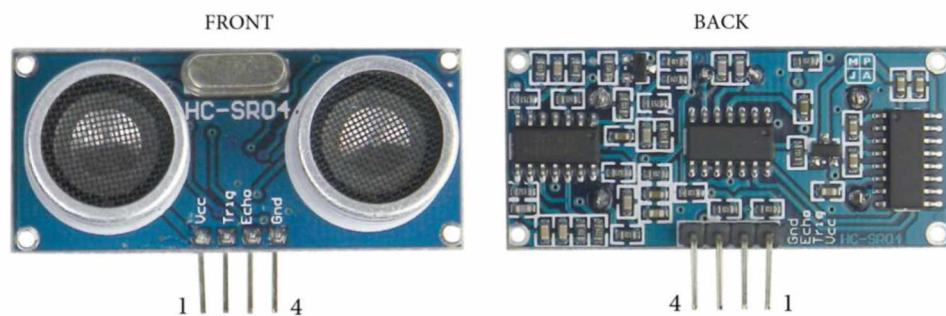
Obrázek 20 – funkce závislosti vzdálenosti ruky od senzoru na výstupní základní frekvenci syntezátoru

Koncept funkce přeladování generátorů je takový, že po přerušení libovolného laseru v libovolné výšce syntezátor generuje frekvenci předem nastaveného základního tónu na této „struně“. V této výšce se zároveň vytvoří střed pásma širokého deset centimetrů. Při pohybu v tomto pásmu se frekvence nemění. Po překročení hranice tohoto pásma bude docházet buď k plynulému zvyšování nebo snižování frekvence viz obrázek 20. Při vzdálení se od jedné z hranic středového pásma o 20 cm se frekvence zvýší nebo sníží o definované maximum – půltón a dále je konstantní. Jelikož rozdíly mezi frekvencemi základních tónů a tóny o půltón vyšších či nižších nejsou konstantní a paprsek laseru je vždy přerušen v jiné výšce, je potřeba tuto závislost mezi frekvencí a výškou vždy po přerušení paprsku vypočítat. Vstupem do funkcí pro výpočet předpisu dvou potřebných přímek budou: frekvence základního tónu, frekvence tónu sníženého o půltón, frekvence tónu zvýšeného o půltón a výška, ve které byl paprsek přerušen.

Vzorce pro výpočet závislosti mezi frekvencí a výškou a jejich odvození jsou obsaženy v kapitole 8. Čidla vzdálenosti, která byla testována pro tuto aplikaci, jsou popsány spolu se svými vlastnostmi dále.

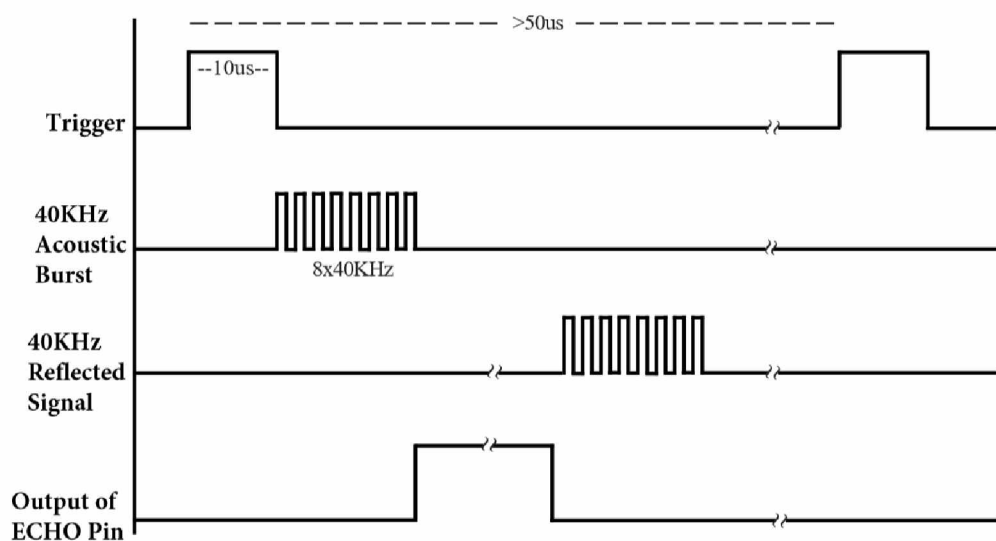
7.2 HC-SR04

Jedno z nejrozšířenějších čidel pro měření vzdálenosti je jednoznačně čidlo HC-SR04. Modul obsahuje vysílač a přijímač ultrazvukového signálu. Vzdálenost je modulem vypočítána na základě délky časového intervalu mezi vysláním a přijmem signálu [8].



Obrázek 21 – senzor vzdálenosti HC-SR04 [18]

Po krátkém pulsu (minimální délky 10us) na pinu „Trigger“ modul nastaví log.1 na pin Echo a vyšle ultrazvukový signál, který má frekvenci 40 KHz a rychlost přibližně 343 m/s ve vzduchu (při 20 °C). Po přijetí odraženého signálu je na Echo pin nastavena log.0. Z délky pulsu na pinu Echo lze vypočítat vzdálenost objektu, od kterého se signál odrazil [8].



Obrázek 22 – princip funkce senzoru vzdálenosti HC-SR04 [18]

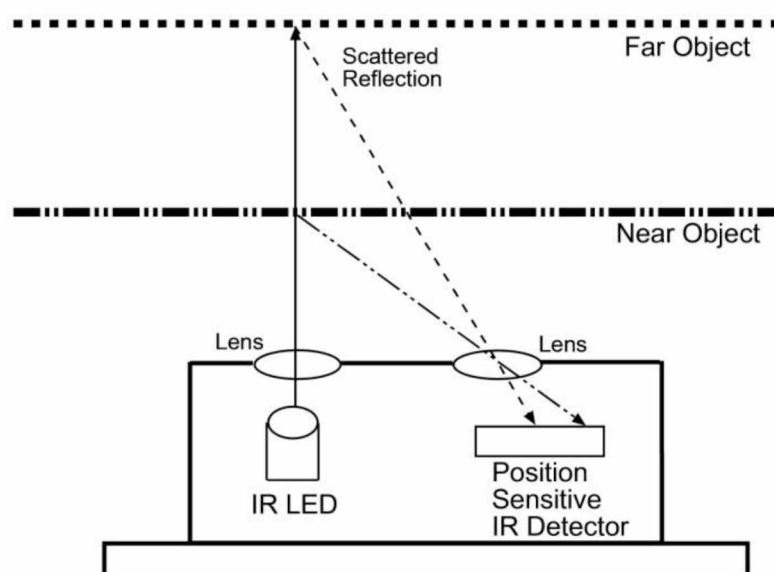
Po testování čidla vzdálenosti HC-SR04 bylo rozhodnuto o nevhodnosti čidla pro tuto aplikaci. Největším problémem byl malý obsah plochy, od které se ultrazvukový signál odrazil, což je v našem případě lidská ruka. Docházelo tak k velmi nepřesnému měření, s kterým nebylo možné dál pracovat a získávat z něj kýženou informaci.

7.3 Sharp GP2Y0A60SZLF

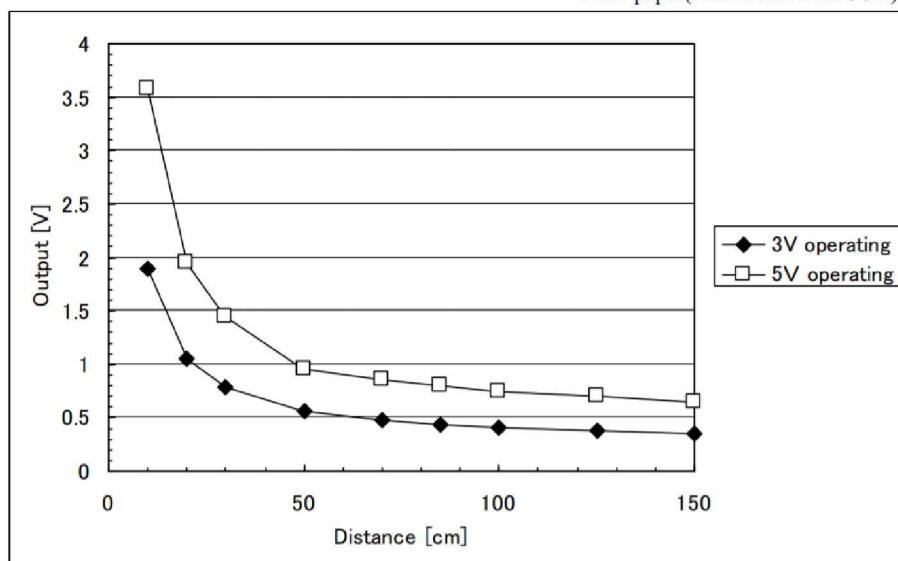


Obrázek 23 – senzor vzdálenosti Sharp GP2Y0A60SZLF [19]

Druhým testovaným čidlem pro detekci vzdálenosti byl modul Pololu se senzorem Sharp GP2Y0A60SZLF. Senzor Sharp GP2Y0A60SZLF kombinuje integrovaný PSD (position sensitive detector), infračervenou diodu a obvod pro zpracování signálů. Senzor má nelineární analogový výstup viz obrázek 25 a deklarovaný rozsah detekce 10 až 150 cm. Princip měření je takový, že IR dioda vyzařuje světelné pulsy, které se odrážejí od překážek a dopadají na PSD. Úhel odrazu je závislý na vzdálenosti objektu, od kterého se paprsek odrazil. Z pozice dopadu paprsku na PSD lze pak tento úhel vypočítat spolu s požadovanou vzdáleností objektu [9].



Obrázek 24 – princip funkce senzoru vzdálenosti Sharp GP2Y0A60SZLF [20]



Obrázek 25 – závislost výstupního napětí na vzdálenosti (Sharp GP2Y0A60SZLF) [9]

Nedostatek, který byl zjištěn u výše zmíněného čidla HC-SR04, tento senzor neměl. Obsah plochy lidské ruky pro odraz byl u tohoto senzoru v požadované aplikaci dostatečný.

U senzoru Sharp GP2Y0A60SZLF byly následně naměřeny referenční hodnoty napětí v definovaných vzdálenostech viz tabulka 1.

vzdálenost [cm]	napětí [mV]	vzdálenost [cm]	napětí [mV]
10	3439	46	1092
12	3008	48	1058
14	2592	50	1038
16	2317	52	1009
18	2097	54	975
20	1960	56	960
22	1803	58	940
24	1690	60	926
26	1617	62	911
28	1523	64	877
30	1440	66	862
32	1396	68	862
34	1347	70	842
36	1288	72	813
38	1239	74	813
40	1190	76	788
42	1156	78	774
44	1127	80	774

Tabulka 1 - naměřené referenční hodnoty výstupního napětí pro definované vzdálenosti

Z katalogového listu senzoru víme, že závislost vzdálenosti a výstupního napětí má povahu lineární lomené funkce, která má obecný předpis [9]:

$$y = \frac{ax + b}{cx + d}$$

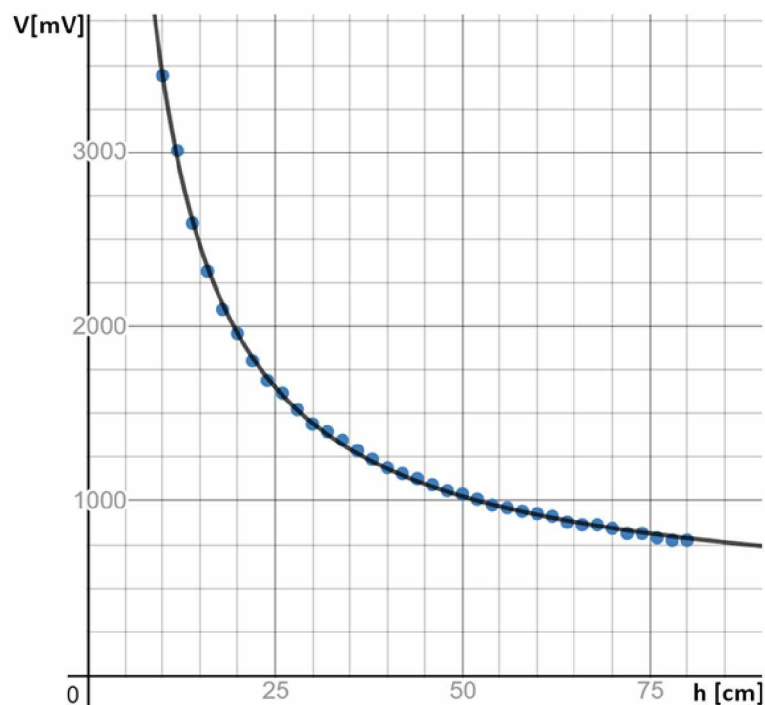
Pomocí serveru DESMOS byly vypočítány potřebné parametry a byla provedena nelineární regrese naměřených dat viz obrázek 26. Výsledná závislost výstupního napětí a vzdálenosti pro senzor Sharp má následující tvar:

$$x \in < 10; 80 >$$

$$y = \frac{460,396x + 39587,8}{1,20534x + 0,772352}$$

I přesto, že funkce závislosti je známá, senzor je charakteristický výstupem, který je zatížený řadou nepřesných měření. Tento problém by šel případně řešit v softwarové části práce, a sice navržením vhodného filtru, který by mohl být například mediánový.

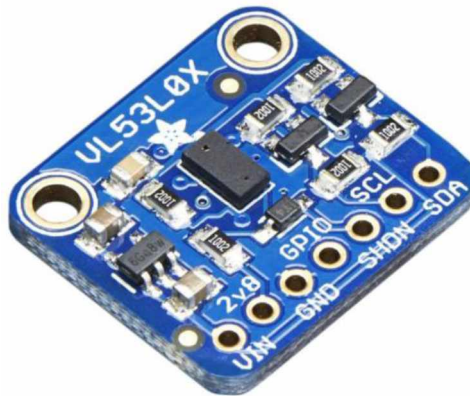
Následující analyzované čidlo vzdálenosti VL53L0X však tuto vlastnost nemá, a tak senzor Sharp GP2Y0A60SZLF nebyl vybrán pro tuto aplikaci.



Obrázek 26 – nelineární regrese naměřených dat

7.4 VL53L0X

Třetím testovaným senzorem vzdálenosti bylo čidlo VL53L0X, jehož princip měření je podobný jako u HC-SR04, ale namísto ultrazvukového signálu je vysílán laserový paprsek o vlnové délce 940nm. Jedná se tedy o takzvaný ToF (Time of Flight) senzor, který měří vzdálenost až do dvou metrů. Měření jsou řízena a zpracovávána integrovaným procesorem [10].



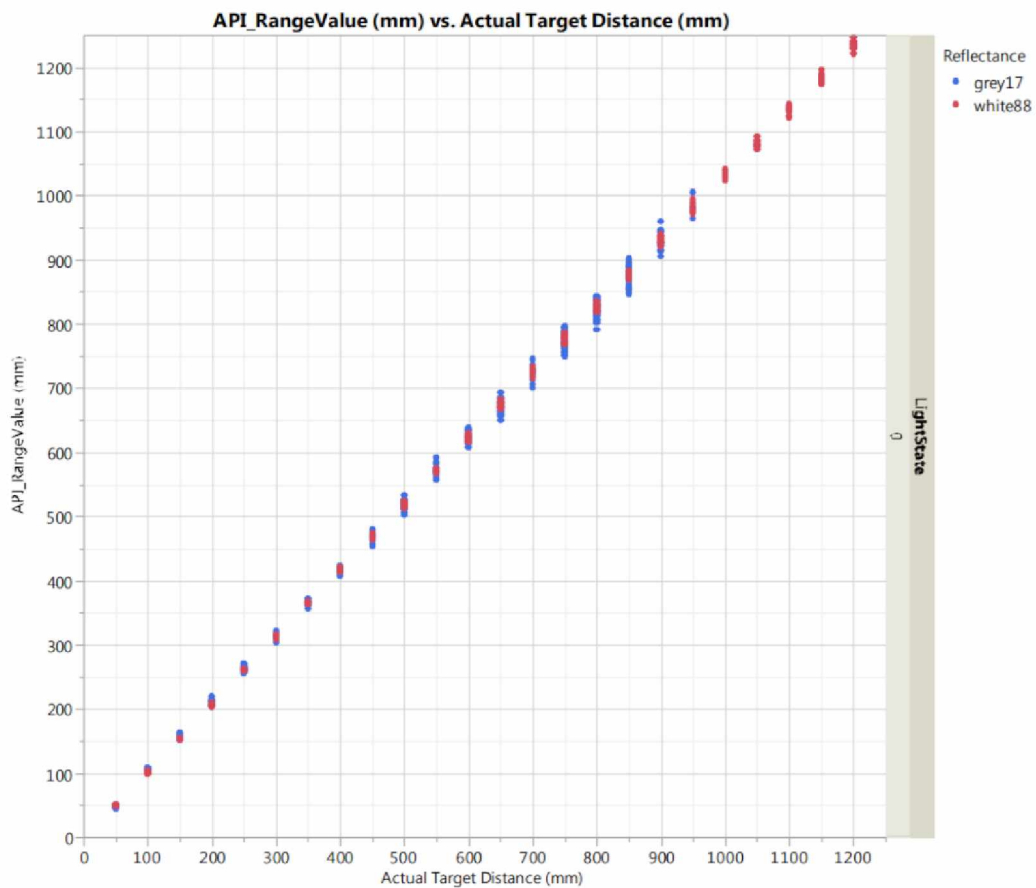
Obrázek 27

Obrázek 27– modul se senzorem vzdálenosti VL53L0X [21]

VL53L0X je ze všech tří testovaných senzorů nejvíce precizní a pokročilý. Pro komunikaci s řídicím procesorem je zde zvoleno I2C rozhraní. Výrobce poskytuje API (Application Programming Interface) a manuál pro práci s těmito knihovnamy [10].

Při zapojení více VL53L0X na jednu I2C sběrnici je potřeba nastavit všem senzorům odlišnou adresu, která je volatelná, což znamená, že je potřeba tento proces provést vždy na začátku programu [10].

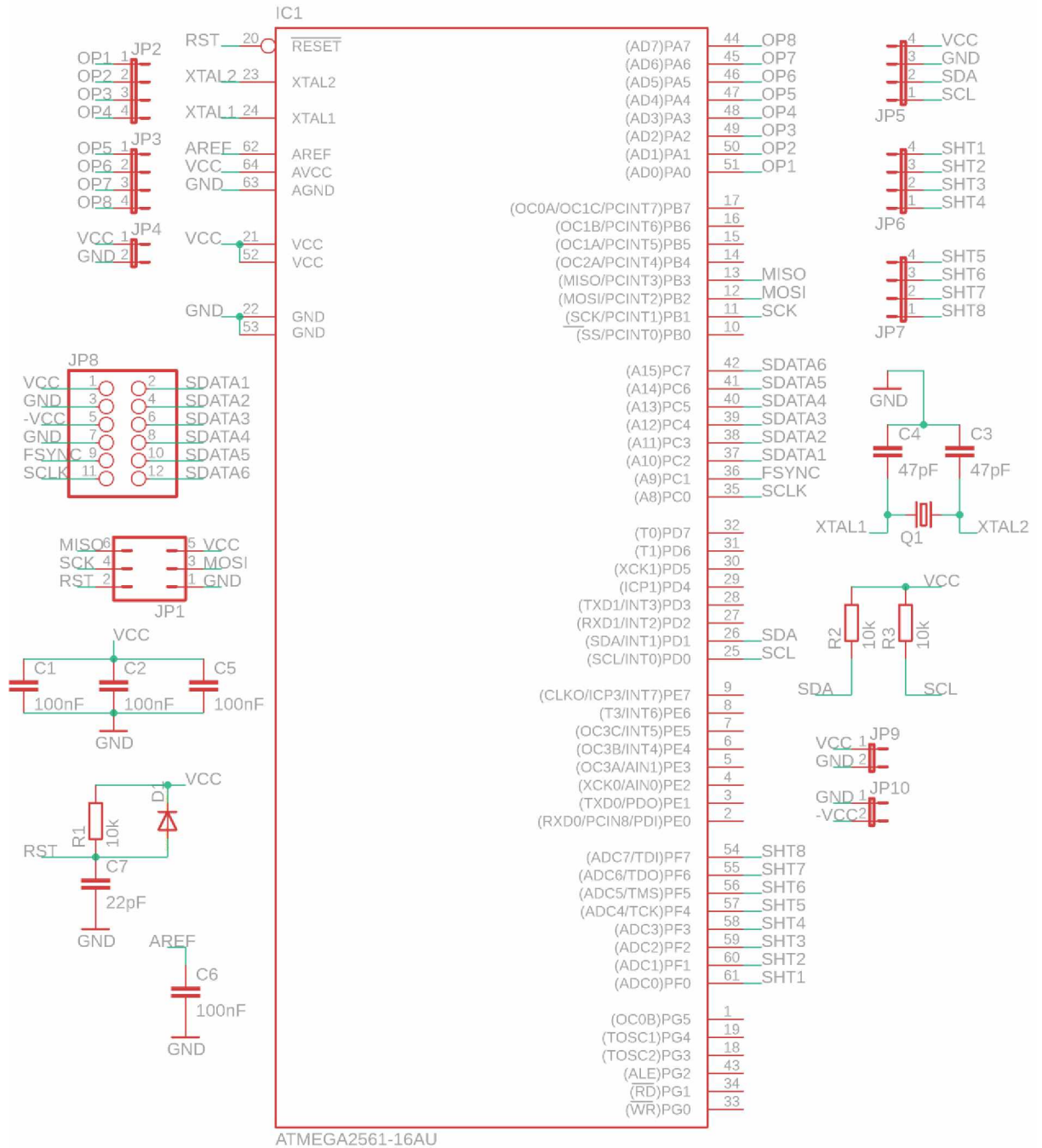
VL53L0X je i přes složitější obsluhu bezkonkurenčně nepřesnější a pro požadovanou aplikaci nejvhodnější a bude tedy použit.



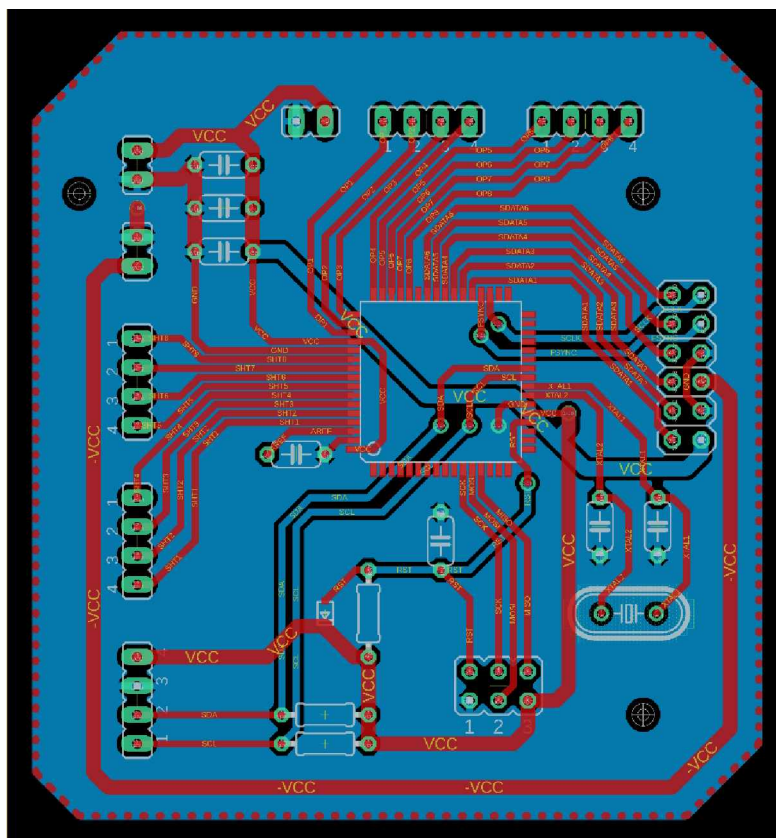
Obrázek 28 – naměřené hodnoty vzdálenosti oproti hodnotám reálným [10]

8 NÁVRH DPS A KONSTRUKCE

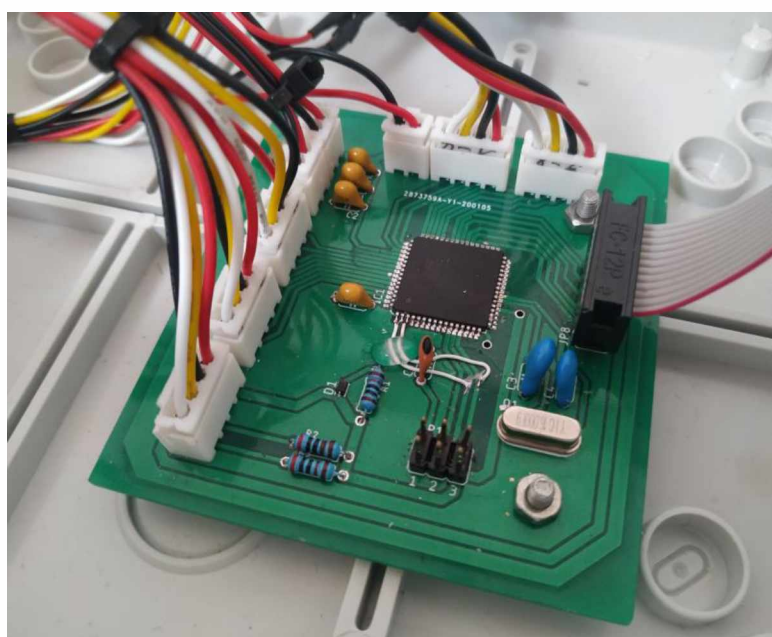
8.1 Řídicí DPS



Obrázek 29 – schéma řídicí desky



Obrázek 30 – návrh řídicí desky (není zobrazen polygon země ve vrchní vrstvě)



Obrázek 31 – osazená řídicí deska

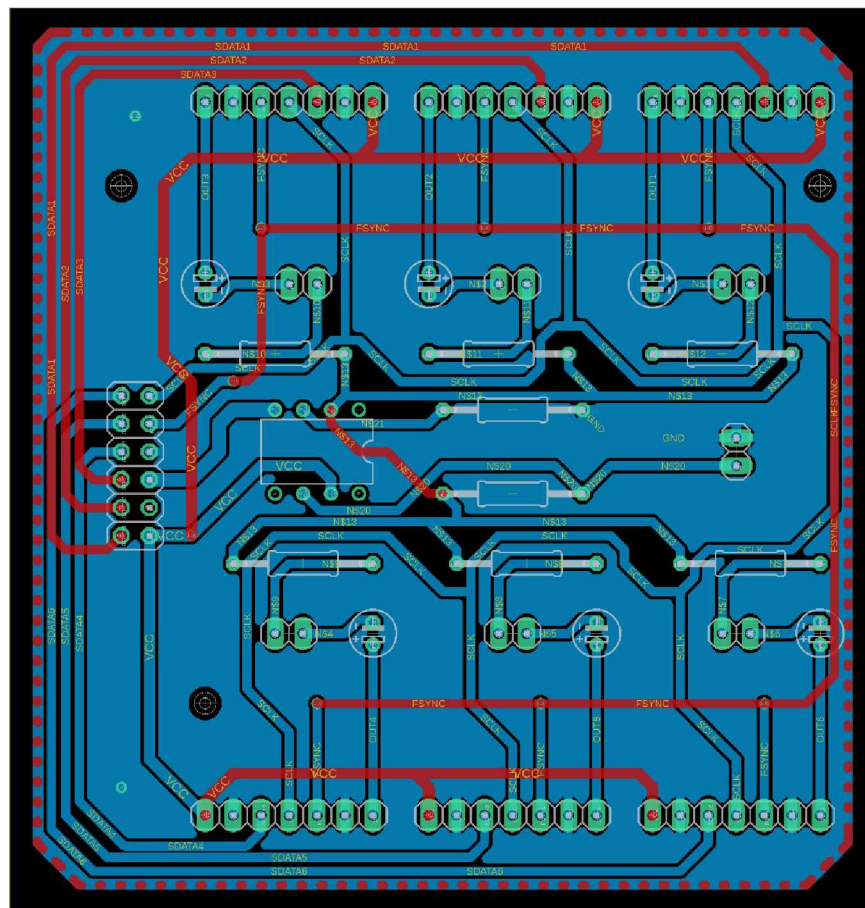
Pro řízení laserové harfy byl vybrán osmibitový procesor ATmega2561. Pro zvýšení frekvence procesoru na 16 MHz je přidán externí krystalový rezonátor. Na řídicí DPS jsou konektory pro komunikaci s čidly vzdálenosti VL53L0X a s čidly laserového paprsku včetně napájení těchto

periferií. Dále se zde nachází konektor, který spojuje řídicí DPS s DPS aditivního syntezátoru viz schéma na obrázku 29 [11].

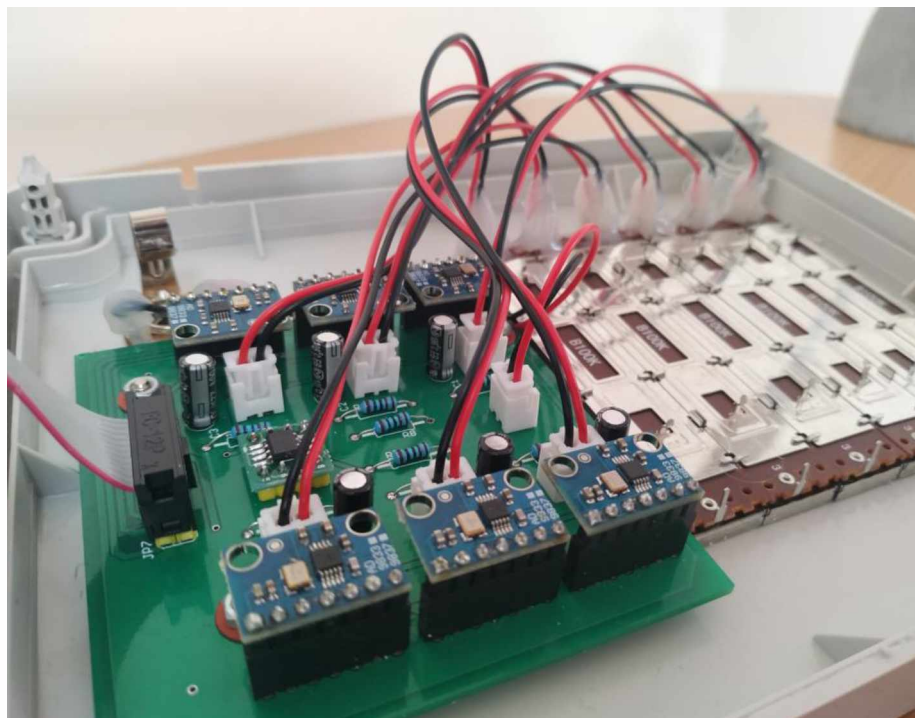
Pro návrh řídicí DPS laserové harfy byl použit program EAGLE. Byla navržena oboustranná DPS viz obrázek 30, kde pro větší přehlednost není zobrazen polygon země ve vrchní vrstvě.

8.2 DPS syntezátoru

Návrh DPS syntezátoru bude vycházet ze schématu na obrázku 16. Bude se zde nacházet již zmíněný konektor pro připojení k řídicí DPS. Dále zde budou konektory pro moduly DDS AD9833, pro připojení potenciometrů a konektor pro výstupní signál syntezátoru. Byla navržena oboustranná DPS, jejíž návrh je na obrázku 32 a opět je pro větší přehlednost zobrazen bez polygonu země ve vrchní vrstvě.



Obrázek 32 – návrh desky syntezátoru (není zobrazen polygon země ve vrchní vrstvě)



Obrázek 33 – osazená deska syntezátoru

8.3 Konstrukce

Konstrukce rámu laserové harfy byla zhotovena ze dvou závitových tyčí a dvou kovových L-profilů. Závitové tyče byly vsunuty do betonových odlitků viz obrázek 34. Řídící elektronika byla instalována do plastového boxu, kde byl vyřezán otvor pro kabely, napájení, výstupní konektor a tahové potenciometry viz obrázek 36. Na víčku plastového boxu s řídicí elektronikou je namontována DPS syntezátoru, tahové potenciometry a konektor pro výstupní signál. S řídicí deskou, která se nachází uvnitř boxu je víčko spojeno pouze jedním PFL konektorem, který je umístěn právě na DPS syntezátoru.

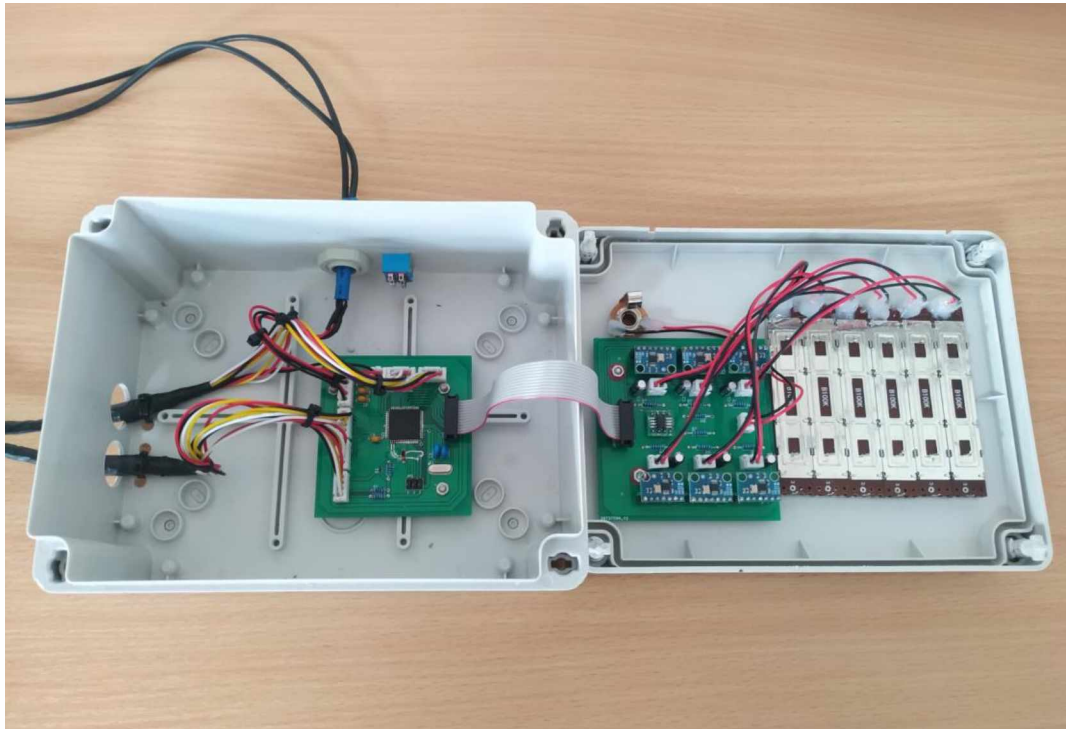
Způsob uchycení jednotlivých laserů a jejich driverů je patrný z obrázku 35. Distribuce napájení pro lasery byla řešena pomocí měděné vodivé pásky. Tato páska byla použita také pro distribuci napájení u čidel vzdálenosti, čidel laserového paprsku a jako datová sběrnice pro komunikaci s čidly vzdálenosti skrze I2C rozhraní viz obrázek 37.



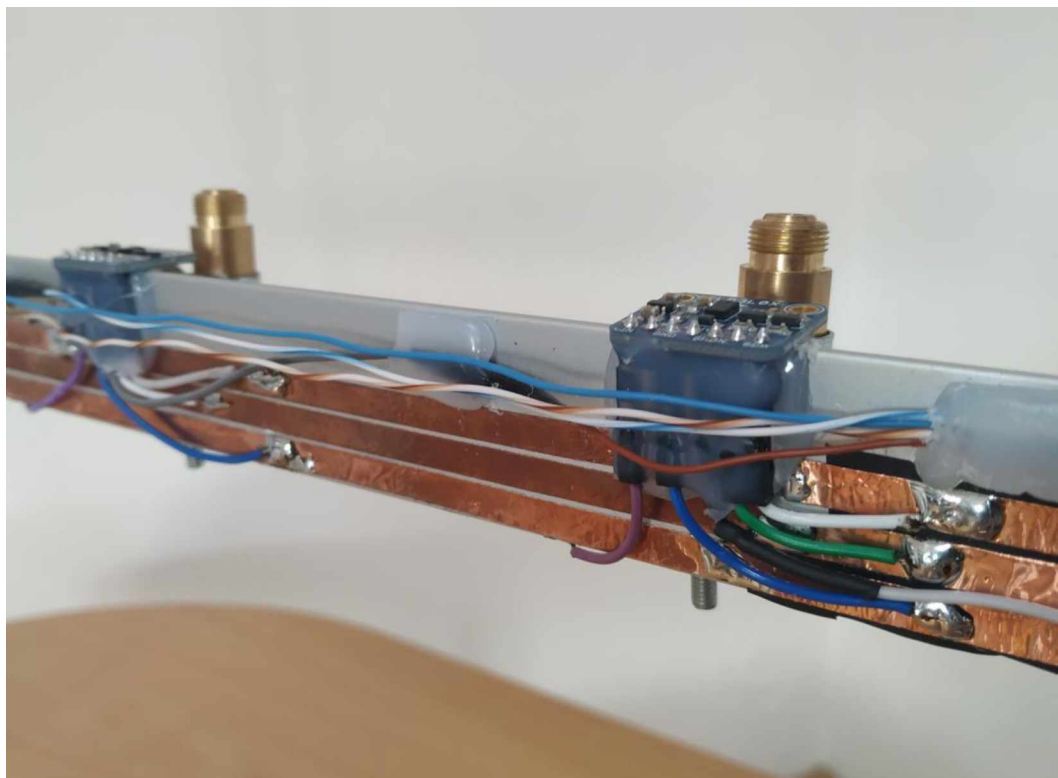
Obrázek 34 – laserová harfa a plastový box s řídicí elektronikou



Obrázek 35 – osazení laserových modulů s driverem



Obrázek 36 – plastový box s řídicí elektronikou a syntezátorem



Obrázek 37 – osazení modulů se senzory vzdálenosti VL53L0X



Obrázek 38 – osazení senzorů laserového paprsku

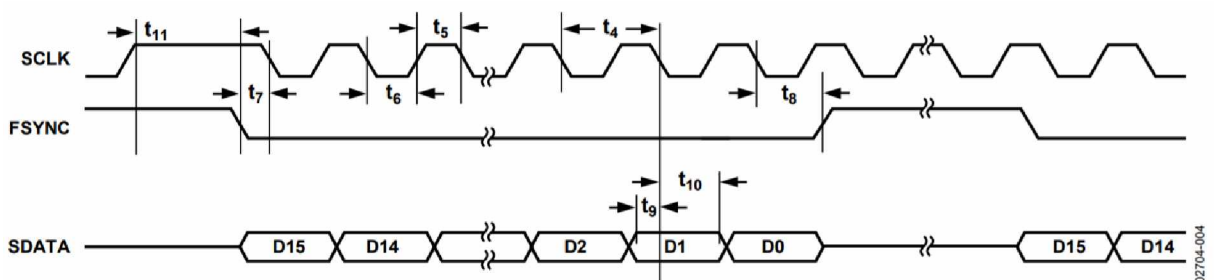
9 PROGRAM

Program byl psán v programu Atmel Studio v programovacím jazyce C. V následujících řádcích bude vysvětlen algoritmus, kterým je laserová harfa řízena.

Po základním nastavení jednotlivých I/O pinů je inicializována I2C komunikace, kde je nastavena její frekvence na 100 KHz. Dále jsou inicializovány všechny čidla VL53L0X. Jak již bylo zmíněno, výrobce tohoto čidla vzdálenosti poskytuje API (Application Programming Interface) a manuál pro práci s těmito knihovny. Byla tedy převzata redukovaná verze této komplexní knihovny spolu s knihovnou pro zmíněnou I2C komunikaci s čidlem [12].

Algoritmus inicializace více čidel VL53L0X je takový, že jsou nejdříve všechny resetovány přivedením log. 0 na pin SHDN. Poté je přivedením log.1 na tento pin „probuzeno“ libovolné čidlo, kterému je jeho výchozí adresa změněna na novou. Následně je totéž provedeno se všemi čidly postupně. VL53L0X má volatilní paměť, což znamená, že jednotlivé adresy jsou po odpojení napájení opět resetovány na adresu výchozí, a tudíž je nutné tento proces provést vždy při inicializaci na začátku programu.

Po inicializaci čidel vzdálenosti jsou inicializovány všechny DDS moduly. Tyto moduly komunikují pomocí SPI, které je však v programu řešeno softwarově. SCLK (hodiny) a FSYNC (vymezuje začátek a konec rámce dat viz obrázek 39) jsou pro moduly společné, SDATA nikoliv. Na pin SDATA je tedy při zápisu u všech modulů nastaven příslušný bit a poté je na pin SCLK nastavena log.0 následovaná log.1. Tento způsob komunikace umožňuje nastavovat frekvence všech DDS zároveň v jeden časový okamžik.



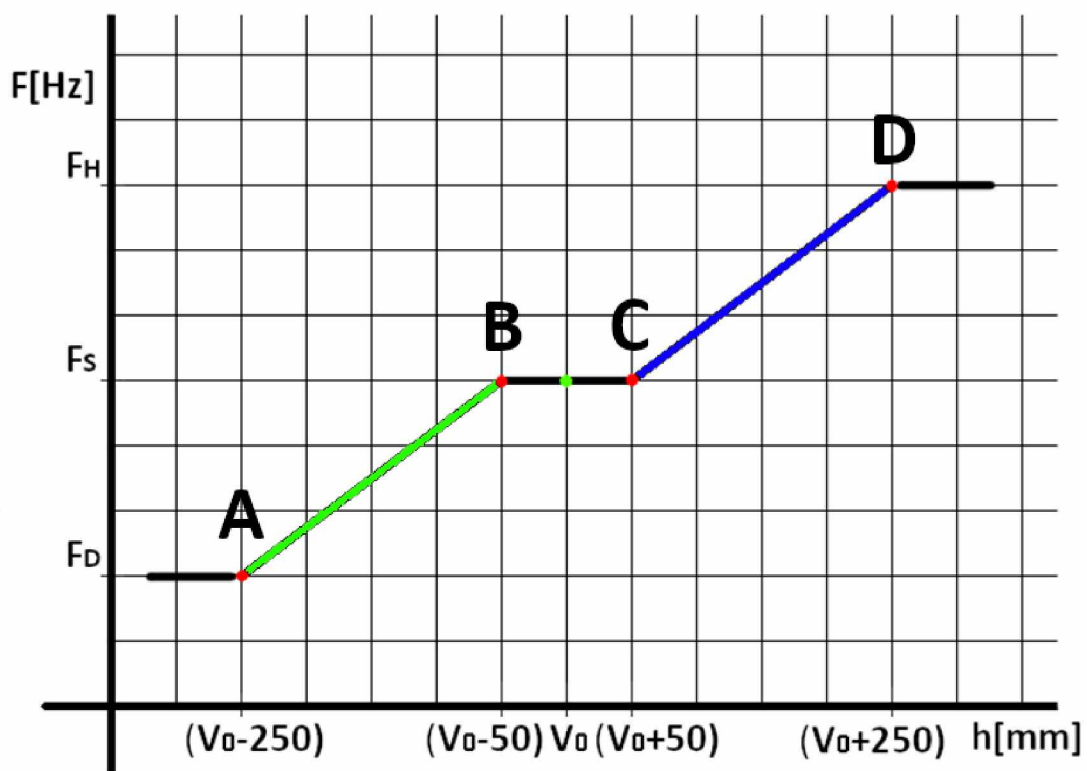
Obrázek 39 – princip komunikace s DDS AD9833 [5]

Po inicializaci DDS modulů je nastaven časovač. Je zvolen osmibitový časovač v normálním módu s nastavením hodnoty předděličky na 1024 a počáteční hodnotu čítání na 100. Při nastavení přerušování tohoto časovače při jeho přetečení dostáváme časový interval o přibližné délce 1 ms, který bude dále využit pro akce vyžadující konkrétní časový interval.

V nekonečné smyčce programu dochází neustále ke kontrole optických bran harfy. Je zde definováno devět možných stavů, které mohou nastat. Osm stavů přísluší přerušením jednotlivých laserových paprsků, devátý stav nastává, pokud není ani jeden laser blokován. Jedná se o monofonní nástroj, tudíž vždy hraje syntezátor pouze jeden tón.

Jako defaultní stav je nastaven stav devátý, při kterém je nastavena výstupní frekvence syntezátoru na 0 Hz. Vždy, když se v průběhu programu tento aktuální stav změní na jiný, je přenastavena základní frekvence syntezátoru na příslušnou frekvenci tónu této „struny“, nebo na 0 Hz v případě, kdy není žádný paprsek přerušen. Pokud je tedy přerušen laserový paprsek, který reprezentuje například komorní A, je nastavena základní frekvence syntezátoru na 440 Hz a dalších pět vyšších harmonických na k-té násobky této frekvence, což znamená, že DDS moduly jsou nastaveny na generování harmonických průběhů o frekvencích: 440 Hz, 880 Hz, 1320 Hz, 1760 Hz, 2200 Hz a 2640 Hz.

Po nastavení základní frekvence tónu struny při každé změně stavu optických bran je zároveň změřena vzdálenost přerušení paprsku od čidla VL53L0X. Tato vzdálenost v programu reprezentuje vzdálenost V_0 viz graf na obrázku 40. Následně jsou opakovaně měřeny vzdálenosti a výsledná frekvence je nastavována podle vztahů níže odvozených.



Obrázek 40 - funkce závislosti vzdálenosti ruky od senzoru na výstupní základní frekvenci syntezátoru

Pro výpočet frekvence v závislosti na výšce (viz obrázek 40) je tedy třeba odvodit předpis dvou přímk. Pro výpočet předpisu přímky lze použít dva body, které pro první přímku (na obrázku 40 vyznačená zeleně) jsou:

$$B[V_0 - 50, F_s] \text{ a } A[V_0 - 250, F_D]$$

Směrový vektor přímky získáme odečtením bodu A od bodu B:

$$B - A = [(V_0 - 50) - (V_0 - 250), F_s - F_D] = [200, F_s - F_D]$$

$$\vec{u} = (200, F_s - F_D)$$

Normálový vektor určíme díky faktu, že jeho skalární součin se směrovým vektorem musí být roven nule.

$$\vec{n} = (F_s - F_D, -200,)$$

Z něho můžeme určit koeficienty a a b obecné rovnice:

$$ax + by + q = 0$$

Obecná rovnice má tedy následující tvar, z něhož vypočítáme dosazením bodu B koeficient q :

$$(F_s - F_D) * (V_0 - 50) - 200 * F_s + q = 0$$

$$q = 200 * F_s - (F_s - F_D) * (V_0 - 50)$$

Po dosazení koeficientu q do obecné rovnice přímky dostáváme:

$$(F_s - F_D) * x - 200 * y + 200 * F_s - (F_s - F_D) * (V_0 - 50) = 0$$

$$- (F_s - F_D) * (V_0 - 50 - x) + 200 * F_s = 200y$$

$$y = \frac{- (F_s - F_D) * (V_0 - 50 - x)}{200} + F_s$$

To je výsledný vztah pro výpočet závislosti mezi frekvencí a místem přerušení paprsku. Podrobný komplexní popis této závislosti je popsán v kapitole č. 6. Je to tedy funkce, do které vstupují tři proměnné. V_0 je výchozí poloha (vzdálenost ruky od senzoru VL53L0X po přerušení laserového paprsku), F_s je základní frekvence tónu příslušící dané struně a F_D je frekvence tónu o půltón níže.

Vztah pro výpočet druhé přímky (na obrázku 40 vyznačená modře) dostáváme z výše uvedeného postupu analogicky:

$$C[V_0 + 50, F_S] \text{ a } D[V_0 + 250, F_H]$$

$$D - C = [(V_0 + 250) - (V_0 + 50), F_H - F_S] = [200, F_H - F_S]$$

$$\vec{u} = (200, F_H - F_S)$$

$$\vec{n} = (F_H - F_S, -200,)$$

$$ax + by + q = 0$$

$$(F_H - F_S) * (V_0 + 50) - 200 * F_S + q = 0$$

$$q = 200 * F_S - (F_H - F_S) * (V_0 + 50)$$

$$(F_H - F_S) * x - 200 * y + 200 * F_S - (F_H - F_S) * (V_0 + 50) = 0$$

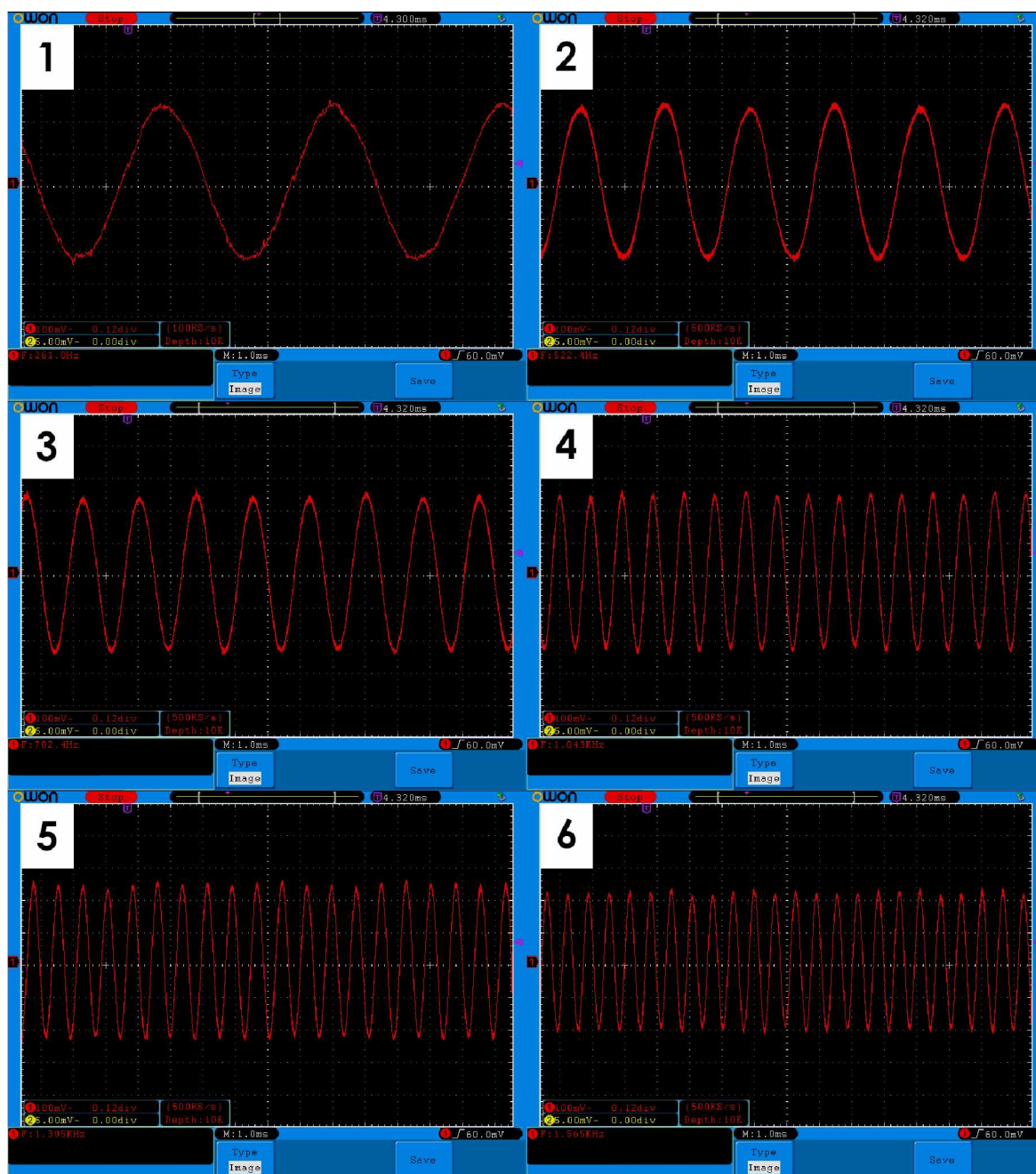
$$-(F_H - F_S) * (V_0 + 50 - x) - 200y + 200 * F_S = 0$$

$$(F_H - F_S) * (V_0 + 50 - x) - 200 * F_S = -200y$$

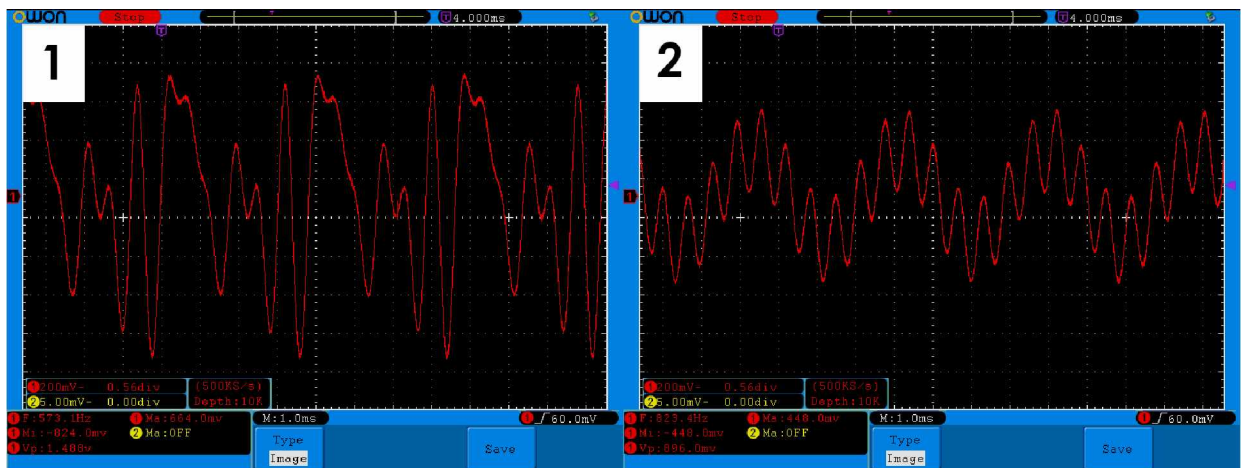
$$y = \frac{-(F_H - F_S) * (V_0 + 50 - x)}{200} + F_S$$

10 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

Po napsání a odladění programu byla ověřována funkčnost nástroje. Byla zjištěna správná funkce optických bran i senzorů vzdálenosti. Pro zjištění správné funkce aditivního syntezátoru bylo potřeba na jeho výstup připojit osciloskop a provést měření. Na obrázku 41 jsou v grafech 1-6 zobrazeny průběhy harmonických které jsou generovány při přerušení první „struny“ a nastavené stupnici C dur - tón C (261 Hz). Na grafu 1 je zobrazena základní harmonická a na grafu 2-6 jsou její k-té násobky. U jednotlivých měření byly vždy tahovými potenciometry maximálně utlumeny ostatní aktuálně neměřené výstupy z DDS generátorů.



Obrázek 41 – výstupy jednotlivých harmonických tónu C (261 Hz) ze syntezátoru



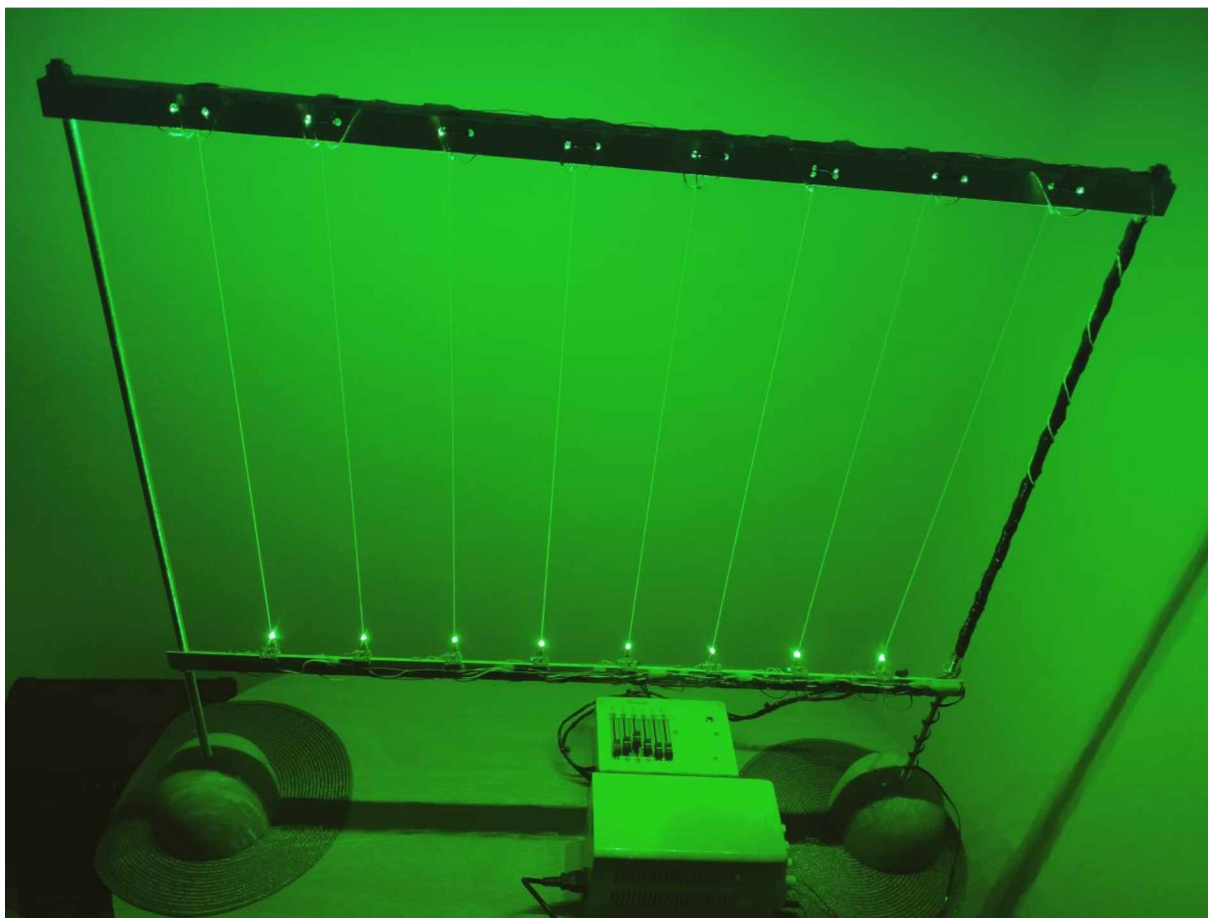
Obrázek 42 – výstup ze syntezátoru - 1) součet všech harmonických s maximální amplitudou, 2) součet první a šesté harmonické s maximální amplitudou

Pro ověření funkce syntézy byl následně měřen průběh signálu na výstupu při součtu všech těchto složek s jejich maximální amplitudou. Tento průběh je zobrazen na obrázku 42 graf 1. Dále byl změřen průběh, který je lépe představitelný, a sice součet první a šesté harmonické, který je na obrázku 42 graf 2. Díky těmto měřením byla potvrzena správnost funkce aditivního syntezátoru.

11 ZÁVĚR

V práci byly probrány základní funkce a typy laserových harf. Dále byly rozebrány druhy zvukových syntéz a pro navrhovaný syntezátor byla zvolena syntéza aditivní. Byly zmíněny základní vlastnosti tónů nástrojů a provedena frekvenční analýza vlastních nahrávek. Následně byl zvolen koncept laserové harfy, navrhnout aditivní syntezátor a vybrán senzor pro detekci vzdálenosti. Po zhotovení elektrických schémat, návrhu DPS a jejich osazení byla laserová harfa konstruována. Posledním krokem bylo napsání programu, jeho odladění a oživení obvodů. Finální podoba laserové harfy je zobrazena na obrázku 43.

Výsledkem práce je funkční hudební nástroj elektronická harfa s aditivním syntezátorem. Co se týče zajímavějšího uživatelského přístupu k nástroji, nebyla nakonec zvolena banka zvuků nástrojů, mezi kterými by bylo možné přepínat, ale možnost ručního nastavení amplitudy každé harmonické pomocí tahových potenciometrů. Na nástroji se tímto způsobem dá teoreticky nastavit nekonečně mnoho zvuků.



Obrázek 43 - laserová harfa

Čidla vzdálenosti by do budoucna mohla být využita nejenom pro změnu frekvence, ale také pro aplikování určitého zvukového efektu. Změna výšky, ve které ruka přerušuje paprsek by mohla ovlivňovat například frekvenci tlumení signálu u efektu tremolo apod. Další přínosnou modifikací nástroje by mohlo být ukládání jednotlivých kombinací nastavení amplitud harmonických, kterého by šlo docílit pomocí využití digitálních potenciometrů v kombinaci s klasickými.

12 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Laser harp* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_harp
- [2] *Spectral sensitivity of the human eye* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.gigahertz-optik.de/en-us/basics-light-measurement/light-color/spectr-sens-eye/>
- [3] URBAN, Ondřej. *Instrumentář elektroakustického zvuku*. V Praze: Akademie múzických umění, 2007. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-115-5.
- [4] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [5] *Analog devices. Low Power, 12.65 mW, 2.3 V to 5.5 V, Programmable Waveform Generator AD9833* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9833.pdf>
- [6] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. *Elektronické prvky*. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN isbn978-80-7300-426-2.
- [7] TRACO POWER. *DC/DC Converters TMA Series, 1 Watt* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.tracopower.com/products/tma.pdf>
- [8] *HCSR04 Ultrasonic Sensor* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://s-o.webnode.cz/_files/200001547-3ef073fea3/hcsr04.pdf
- [9] *Sharp GP2Y0A60SZ0F/GP2Y0A60SZLF* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.sharpsde.com/fileadmin/products/Optoelectronics/Sensors/Specs/GP2Y0A60SZLF_TI_OP13005EN.pdf
- [10] *ST VL53L0X. World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor*. [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l0x.pdf>
- [11] *Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V* [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- [12] *C Makefile library for VL53L0X time-of-flight distance sensor* [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://github.com/yetifrisstlama/vl53l0x-non-arduino>
- [13] *EM spectrum* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum.svg
- [14] *Metody zvukové syntézy* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/metody-zvukove-syntezy>

- [15] *Laser Sensor Module* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: https://www.banggood.com/Laser-Sensor-Module-Board-Non-modulator-Tube-For-Arduino-Laser-Receiver-Transmitter-p-1359947.html?cur_warehouse=CN
- [16] *AD9833 PROGRAMMABLE MICROPROCESSOR SERIAL INTERFACE MODULE SINE SQUARE WAVE DDS SIGNAL GENERATOR* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://alexnl.com/product/ad9833-programmable-microprocessor-serial-interface-module-sine-square-wave-dds-signal-generator/>
- [17] *The Basics of Direct Digital Synthesizers (DDSs) and How to Select and Use Them* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.digikey.ca/en/articles/the-basics-of-direct-digital-synthesizers-ddss>
- [18] *HC-SR04 User Guide* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: https://www.mpja.com/download/hc-sr04_ultrasonic_module_user_guidejohn.pdf
- [19] *Pololu Carrier with Sharp GP2Y0A60SZLF Analog Distance Sensor 10-150cm, 5V* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://www.snailshop.cz/ir-vzdalenost/1506-pololu-carrier-with-sharp-gp2y0a60szlf-analog-distance-sensor-10-150cm-5v.html>
- [20] *Pololu Carrier With Sharp GP2Y0A60SZLF Analog Distance Sensor* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.rhydolabz.com/wiki/?p=12850>
- [21] *Dálkoměr VL53L0X ToF, 5V, Adafruit* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/dalkomer-vl53l0x-tof-5v-adafruit-3317/p/30129218>