

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Peter Takács



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

NOVÁ ELEKTRONIKA PRO LASEROVOU HARFU

NEW ELECTRONICS FOR LASER HARP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Peter Takács

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Peter Takács

ID: 221023

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Nová elektronika pro laserovou harfu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je navrhnout novou elektroniku pro stávající laserovou harfu. Nová elektronika musí obsahovat napájecí obvody, zesilovač s možností změny hlasitosti, generátor páry a mikrokontrolérovou jednotku. Zmíněná jednotka bude ovládat všechny funkce harfy a to snímat brnknutí na laserové struně, přehrávat tóny, generovat efekty.

1. Proveďte literární rešerši a internetový průzkum.
2. Navrhněte a popište vlastní řešení.
3. Napište firmware.
4. Implementujte novou elektroniku do stávající harfy.
5. Oživte je a všechny jeho funkce řádně otestujte.
6. Napište návod pro ovládání.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 23.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
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

Táto práca sa zaoberá návrhom elektroniky pre laserovú harfu. Práca zahŕňa prieskum histórie digitálnych hudobných nástrojov navrhnutých od počiatkov elektronickej hudby. Ďalej sa diskutuje o výhodách a nevýhodách rôznych typov konštrukcií. Táto práca stručne popisuje najbežnejšie typy syntézy zvuku a zahŕňa návrh obvodu audio zosilňovača. Sú opísané rôzne typy výstupov tohto digitálneho zariadenia. Zaoberá sa napájaním celého obvodu a prevodmi napätia pre jednotlivé obvody. Diskutuje sa o výhodách a nevýhodách niekoľkých optických snímačov s rôznymi charakteristikami. Práca tiež popisuje kroky návrhu hornopriepustného filtra na odfiltrovanie nežiaduceho svetla z okolia. Súčasťou tejto bakalárskej práce je aj jednoduchý systém generátora pary, ktorý distribuuje vodnú paru do prostredia. Ďalej je v práci popísaná aj činnosť mikrokontroléra ovládajúceho jednotlivé prvky. Práca popisuje aj spôsob obsluhy zhotoveného zariadenia.

Kľúčové slová

MIDI, Laserové diódy, Optické snímače, Horný priepust, Mikrokontrolér, Zosilňovač, Generátor pary

Abstract

The aim of this thesis is to describe in detail the design of the electronics of a laser harp. This thesis does research on the history of digital musical instruments designed since the very beginning of electronic music. Furthermore, this paper debates over the advantages and disadvantages of the laser harp designs. This thesis lists the most common types of sound synthesis and includes the design of a power amplifier circuit. It writes about the output types this digital device has. The design of the power supply circuit and other necessary circuits, such as voltage converters, which are responsible for providing the correct voltages for all the various circuits and devices are also thoroughly detailed. The paper reviews the advantages and disadvantages of several optical sensors with different characteristics. This thesis also describes the steps of designing a High-Pass filter to filter out the unwanted ambient light. This documentation also describes a simple mist generator system, which distributes water vapor into the air. Moreover, it also describes the role of the microcontroller in this circuit and how it controls the individual elements. The thesis describes how to operate the device.

Keywords

MIDI, Laser diodes, Optical sensors, High-Pass filter, Microcontroller, Amplifier, Mist generator system

Bibliografická citácia

TAKÁCS, Peter. *Nová elektronika pro laserovou harfu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Bakalárska práca. Vedúci práce: prof. Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

VYHLÁSENIE

Meno a priezvisko študenta:	<i>Peter Takács</i>
VUT ID študenta:	<i>221023</i>
Typ práce:	<i>Bakalárska práca</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma záverečnej práce:	<i>Nová elektronika pro laserovú harfu</i>

Vyhlasujem, že som svoju záverečnú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia S 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa:

.....

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Zoltánovi Szabóovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa:

.....

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ÚVOD	10
1. LASEROVA HARFA	11
1.1 HISTÓRIA.....	11
1.2 TYPY KONŠTRUKCIÍ.....	12
1.2.1 Laserové harfy s jedným laserom.....	12
1.2.2 Laserové harfy so stacionárnymi lasermi	13
1.3 TYPY VÝSTUPOV	14
1.3.1 Zvukový výstup: mono reproduktor	14
1.3.2 Zvukový výstup: Audio Jack 3,5 mm.....	14
1.3.3 Digitálne výstupy cez sériovú komunikáciu	14
2. ELEKTRONICKÉ OBVODY	16
2.1 NAPÁJACIE OBVODY.....	16
2.1.1 Napájanie audio čipu	16
2.1.2 Napájací obvod 3,3 V.....	17
2.1.3 Napájanie mikrokontroléra Teensy	18
2.1.4 Napájanie audio zosilňovača a ventilátora.....	18
2.2 OPTICKÉ SNÍMAČE.....	18
2.2.1 Fototranzistor typu SFH 300 OSRAM.....	19
2.2.2 Fototranzistor LTR-323DB LITEON.....	21
2.2.3 Fototranzistor QSD123 ONSEMI	21
2.2.4 Fototranzistor PT-A1-AC-5-HE-850 TOKEN.....	21
2.2.5 Fototranzistor TEPT4400 VISHAY	22
2.3 HIGH-PASS FILTER	23
2.3.1 Alternatívne riešenie.....	25
2.4 GENERÁTORY ZVUKU – TYPY SYNTÉZÁTOROV.....	25
2.4.1 Oscilátory.....	26
2.4.2 Digitálne oscilátory.....	26
2.4.3 Wavetable Oscillator.....	27
2.4.4 Granular Synthesis.....	27
2.4.5 Multiwave Oscillators	27
2.4.6 Additive Synthesis.....	27
2.5 ZOSILŇOVAČ	27
2.5.1 Ochrana proti skratu.....	28
2.5.2 Tepelná ochrana	28
2.5.3 Návrh zosilňovacieho obvodu.....	28
2.6 GENERÁTOR PARY.....	29
2.7 MIKROKONTROLÉR	29
3. FIRMWARE	31
3.1 DEFINOVANIE AUDIO OBJEKTOV	31
3.2 KALIBRÁCIA ROZSAHOV AD PREVODNÍKU	32
3.3 KONTROLA PRÍTOMNOSTI LASEROV V PROGRAME MIKROKONTROLÉRA	32

3.4	HLAVNÝ CYKLUS	33
3.4.1	<i>MIDI formát a metóda zahratie tónu.....</i>	33
3.4.2	<i>Schopnosť hrať tiché a staccato noty.....</i>	34
4.	ZREALIZOVANIE NOVEJ ELEKTRONIKY.....	36
4.1	SCHÉMA ZAPOJENIA	36
4.2	TESTOVANIE NAVRHNUTÝCH ZAPOJENÍ	36
4.2.1	<i>Skúška fototranzistorov.....</i>	37
4.2.2	<i>Skúška napájacích obvodov.....</i>	37
4.2.3	<i>Skúška zosilňovacieho obvodu</i>	37
4.2.4	<i>Test citlivosti fototranzistora na červený laser a na okolité svetlo.....</i>	37
4.3	MONTÁŽ PCB.....	37
4.3.1	<i>Spájkovanie napájacích obvodov.....</i>	38
4.3.2	<i>Montáž zosilňovacieho obvodu</i>	38
5.	NÁVOD NA POUŽITIE	39
5.1	POPIS OBSLUHY.....	39
5.2	TYPY PORÚCH A ICH ODSTRÁNENIE.....	40
5.2.1	<i>Po zapnutí je počuť hlučné rušenie z reproduktoru.....</i>	40
5.2.2	<i>Po zapnutí harfa nereaguje.....</i>	40
5.2.3	<i>Elektrická porucha.....</i>	40
6.	ZÁVER	41
	LITERATÚRA	42
	ZOZNAM PRÍLOH.....	45

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1: Príklad typického MIDI systému a komunikácie medzi zariadeniami. [3]	12
Obrázok 2: Lúče jedného RGB laserového modulu.	13
Obrázok 3: Zapojenie LM2576 navrhnuté podľa dokumentácie. [5]	17
Obrázok 4: Reprezentácia elektromagnetických vlnových dĺžok.....	19
Obrázok 5: Citlivosť SFH 300 OSRAM proti vlnovej dĺžke. [9].....	20
Obrázok 6: Citlivosť SFH 300 OSRAM v závislosti na uhlu dopadajúceho svetla. [9]	20
Obrázok 7: Citlivosť LTR-323DB LITEON proti vlnovej dĺžke. [10].....	21
Obrázok 8: Citlivosť QSD123 ONSEMI v závislosti na uhlu dopadajúceho svetla. [11].....	22
Obrázok 9: Citlivosť PT-A1-AC-5-HE-850 TOKEN proti vlnovej dĺžke. [12].....	22
Obrázok 10: Relatívna citlivosť TEPT 4400 proti vlnovej dĺžke. [13].....	23
Obrázok 11: Vzorové zapojenie derivačného článku.	23
Obrázok 12: Vzorové zapojenie laserovej diódy.....	24
Obrázok 13: Navrhnutá zosilňovacia časť obvodu s čipom NTE1380.....	28
Obrázok 14: Mikrokontrolér Teensy 4.1. [15]	30
Obrázok 15: Príklad vytvárania pripojení pomocou Audio System Design Tool.	31
Obrázok 16: Funkcia sily tónu, kde $K=4$	35
Obrázok 17: Blokovaná schéma elektrického obvodu.	36
Obrázok 18: Skúšobná optická závora.	38
Obrázok 19: Hlavný vypínač, napájací konektor a ovládanie hlasitosti.	39

ÚVOD

Umenie je jedným z najvoľnejších spôsobov komunikácie. Keďže najjednoduchší spôsob prenosu myšlienok je audiovizualita, informácie určené pre publikum sú predovšetkým zvukové a vizuálne.

Vyjadrenie emócií a myšlienok prostredníctvom umenia je zvláštne, pretože tento spôsob spracovania informácií je pre všetkých divákov subjektívnym zážitkom a limituje ho len kreativita jednotlivca. Dnes predovšetkým dominujú digitálne nahrávky, ktoré sú pri každom prehrávaní rovnaké. Mnoho filmov a hudieb si vyžaduje, aby jednotlivec pozrel alebo vypočul viac ako raz, aby si všimol nuansy a detaily. V tomto prípade sa mení spôsob, akým jednotlivec informácie vníma. V porovnaní s digitálnymi nahrávkami má každý živý koncert a vystúpenie iný emociálny a umelecký zážitok.

Laserová harfa bola vždy veľmi kontroverzným hudobným nástrojom. Všetci však súhlasia, že vystúpenie s ním môže byť skutočne jedinečným zážitkom. Prvé návrhy vznikli v dobe prvých laserových šou. Hlavnou myšlienkou bolo vytvoriť hudobný nástroj, ktorý by bol zároveň aj vizuálnym umením. V tom čase bol laser ešte relatívne nový vynález, podobne ako digitálna hudba. Vizionári tejto doby chceli tieto dve veci spojiť a vytvoriť niečo nové a inovatívne.

Veľkou výhodou laserovej harfy je, že sa jej struny ani po dlhšom čase nerozladia. Zo zvukového hľadiska môže laserová harfa znieť ako tradičná harfa dokonca aj ako syntetizátor. Jediným obmedzením jeho použitia je kvalita prevedenia.

Cieľom práce je navrhnúť novú elektroniku pre stavajúcu laserovú harfu. Elektronika musí obsahovať napájacie obvody, zosilňovač, generátor pary, a mikrokontrolérovú jednotku.

1. LASEROVA HARFA

Tradičná harfa je strunový brnkací hudobný nástroj, pričom laserová harfa je elektrický hudobný nástroj, na ktorom sa hrá bez fyzického kontaktu prerušením jednotlivých laserových lúčov. Digitálny systém používa reproduktory na prehrávanie príslušných tónov. Čo sa týka vzhľadu, rám laserovej harfy môže pripomínať rám tradičnej harfy. Existujú rôzne konštrukcie aj s trojuholníkovým tvarom, ale existujú aj bezrámové harfy: pre divákov viditeľné, len ako niekoľko od seba vetvených lúčov z jedného bodu. Značným prínosom laserovej harfy je hlavne to, že na javisku automaticky púta pozornosť a stáva sa súčasťou laserovej šou. To pomáha posunúť kultúrny zážitok na úplne novú úroveň.

1.1 História

Akustická harfa a lýra je známa po celom svete už od staroveku. Namiesto medených strún sa často používal nylon, vysušené zvieracie črevá a kovy. Harfa bola jedna z prvých hudobných nástrojov. V priebehu histórie sa harfa používala aj ako symbol rôznych vecí a dodnes je populárnym hudobným nástrojom. Vyskytovala sa v šľachtických rodinách, u trubadúrov, ale aj medzi poľovníkmi. Vlastne to nikdy nebol len hudobný nástroj. Harfa sa používala aj na komunikáciu. Bol to stroj, ktorý symbolizoval kvalitu života a slobodu. Síce možno za posledných 3000 rokov prešla transformáciou, jej princíp funkčnosti zostáva podobný.

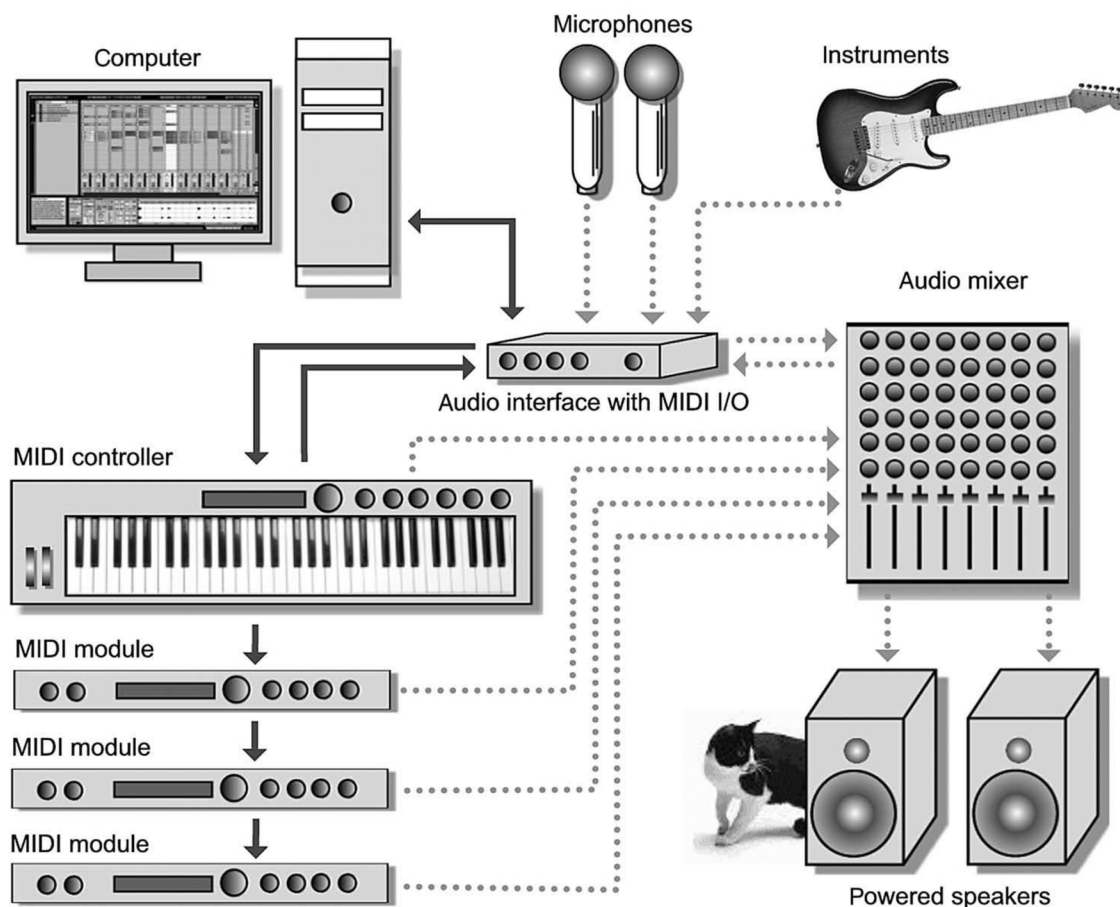
V roku 1928 sa sovietsky vynálezca preslávil svojím vynálezom: Thereminom. Bol to prvý bezkontaktný elektronický hudobný nástroj, ktorý sa stal široko dostupným a rýchlo sa stal šokujúcou senzáciou. Inšpirovali sa ním ďalší vynálezcovia podobných hudobných nástrojov, ako: Ondes Martenot, Trautonium, Persephone, Electronde, Croix Sonore, terpsitone, Haken Continuum a ďalší. Popularita elektrických hudobných nástrojov stále rástla a pravdepodobne urýchlila aj vývoj elektrickej gitary. [1]

Hudobníci chceli najskôr svoje akustické nástroje len zosilniť, no počas tohto vývoja sa zrodili nové elektrické nástroje. Niektoré z nich boli konštrukčne robustné, avantgardné a zvláštne na svoj vek. V roku 1979 Oberheim predstavil svoj prvý plne programovateľný polyfonický klávesový syntetizátor: OB-X [2]. S vynálezom prvých grafických a hudobných čipov sa objavili aj prvé digitálne syntetizátory.

MIDI je štandard, ktorý ako prvý umožnil komunikáciu a synchronizáciu medzi digitálnymi hudobnými nástrojmi. Táto technológia umožňuje previesť akýkoľvek digitálny signál na komunikačné MIDI signály. Kábel je možné použiť na pripojenie MIDI zariadení, ako sú hudobné nástroje, počítače alebo mikrokontroléry. Tieto digitálne signály potom možno použiť na ovládanie akéhokolvek MIDI nástroja.

Koncept laserovej harfy ako digitálneho hudobného nástroja vznikol v 80. rokoch minulého storočia, na začiatku doby novej digitálnej hudby. MIDI komunikácia bola

často implementovaná v prvých projektoch, kde sa na prehrávanie tónov laserovej harfy používal syntetizátor.



Obrázok 1: Príklad typického MIDI systému a komunikácie medzi zariadeniami. [3]

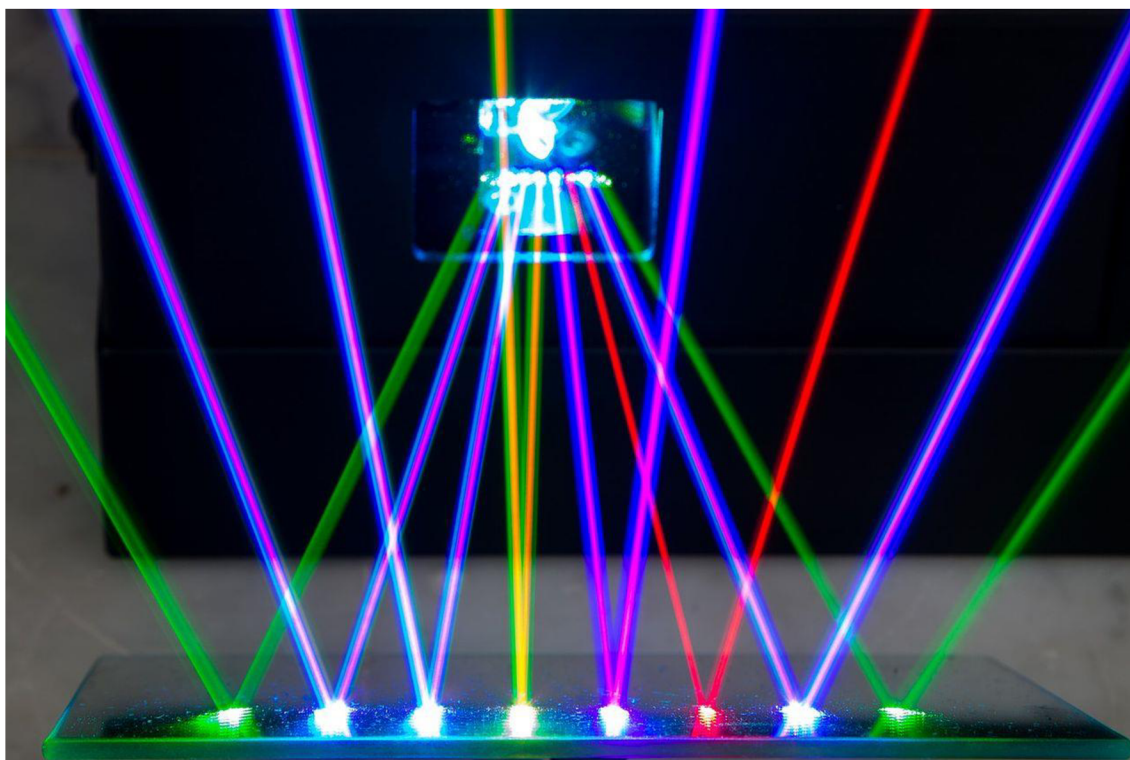
1.2 Typy konštrukcií

Od prvotného konceptu laserovej harfy sa našli dizajnéri po celom svete, ktorí navrhli tento nástroj so svojimi unikátnymi riešeniami. Bolo vyvinutých mnoho rôznych konceptov. Väčšina prvých dizajnérov umiestnila laserové diódy priamo na rámy, ale tento hudobný nástroj sa stal známym až po návrhu bezrámovej verzie. Len tento typ laserovej harfy je možné zakúpiť v komerčnej forme. Väčšinou je dostupná v kompaktnej forme s parným generátorom alebo bez neho. Laserové harfy možno zovšeobecniť na dva typy: jednolaserové harfy a harfy so stacionárnymi lasermi.

1.2.1 Laserové harfy s jedným laserom

Rám nie je podstatnou súčasťou tohto hudobného nástroja. Už skôr sa ukázalo, že nie je potrebné, aby mala harfa väčší počet laserov. Stačí jeden kvalitnejší laser, väčšinou sa

používa RGB laser modul V tomto riešení sa laser otáča vysokou rýchlosťou pomocou jedného motora. Jeho lúč sa odráža od zrkadla nakloneného asi o 45° .



Obrázok 2: Lúče jedného RGB laserového modulu.

Novšie verzie používajú namiesto laserových diód laserový projektor, ktorý dokáže vyžarovať akýkoľvek geometrický tvar. Tieto laserové harfy majú zvyčajne aj kontrolér pre okolité vizuálne efekty. Dokážu meniť farbu jednotlivých lúčov, vizualizovať brnknutie strún, ovládať vedľajšie svetlomety, regulovať generátor pary a spúšťať iné vizuálne „udalosti“ ako napr. videá, animácie či pyrotechniku. Aby bolo možné identifikovať, ktorá struna má znieť, musí mikrokontrolér použiť optické snímače na zistenie aktuálnej polohy motora. Výhodou tohoto dizajnu je, že nemusí mať pevný počet laserových diód, je možné nastaviť podľa pokynov hráča. Toto riešenie je výhodnejšie aj z finančného hľadiska lebo nie je potrebné použiť väčší počet laserov.

V niektorých aplikáciách je implementovaná aj tónová modulácia, ktorá sa vykonáva s výškou ruky hudobníka, od ktorej sa laserové svetlo odráža. Fotodióda tu sleduje nie len okamžiky, kedy sa svetlo odrazí od ruky, ale aj intenzitu svetla.

1.2.2 Laserové harfy so stacionárnymi lasermi

Je jednoduchšie namontovať lasery a snímače na pevne na jednu konštrukciu. V tomto prípade však harfa potrebuje toľko laserov, koľko strún si projekt vyžaduje. Existuje nekonečno veľa druhov rámov.

V tomto dizajne konštrukcia má aj estetickú hodnotu. Tento typ bol vybraný, pretože uľahčuje implementáciu sensorového systému. Bez konštrukčné modely s jedným laserom a sensorom vyžadujú, aby bol viditeľný len laser, prostredie do ktorého vstupuje málo svetla.

V ráme sú lasery umiestnené v otvoroch vyvrtaných v hornej časti a fototranzistory v spodnej časti. Týmto prakticky sa toto zariadenie stáva optickou závorou. Tóny sa prehrávajú prerušením laserov. Na prehrávanie tónov existuje niekoľko metód s rôznymi audio výstupmi.

1.3 Typy výstupov

Forma výstupu závisí od hardvéru alebo v prípade aj od softvéru cieľových zariadení. Pojem audio výstup sa zvyčajne vzťahuje na určité špeciálne konektory, ako sú RCA, XLR konektory na analógových zosilňovačoch. Vstupmi do mikrokontroléra sú napäťové úrovne fototranzistorov a tieto signály spracováva mikrokontrolér naprogramovaný podľa požadovaných výstupov. Digitálne hudobné nástroje môžu mať výstupy: zvukové, ako sú reproduktory, slúchadlá, alebo digitálne, ako napríklad MIDI, I2C/I2S.

1.3.1 Zvukový výstup: mono reproduktor

Na prehrávanie výstupných zvukových signálov cez reproduktor je potrebné výstupný signál zosilniť. Analógový výstup z čipu SGTL5000 je zosilnený, ale jeho zosilňovací výkon je dostatočný len pre slúchadlá a iné menej výkonné zariadenia. V tomto prípade je mikrokontrolér Teensy naprogramovaný na prenos zvukových vln cez digitálnu I2C komunikáciu do audio čipu, ktorého výstup je analógový, a tak zosilnený zosilňovačom.

1.3.2 Zvukový výstup: Audio Jack 3,5 mm

Tento konektor nie je pre tento projekt potrebný, slúži len na testovacie účely. V zapojení sa tento konektor nachádza na výstupe audio čipu a je paralelne zapojený so vstupom zosilňovača. Pre tento výstup bude vhodné pripojiť len slúchadlá kvôli malému výkonu vnútorného zosilňovača audio čipu.

1.3.3 Digitálne výstupy cez sériovú komunikáciu

Mikrokontrolér Teensy je možné programovo nastaviť, aby prehrával zvuky z pamäte. Prípadne je tiež možné generovať zvukové vlny (syntéza) alebo kombinovať vzorky zvukových vln s týmto mikrokontrolérom. Je možné ho naprogramovať tak, aby tieto zvukové vlny preposielal ako dáta cez sériovú komunikáciu. Takéto digitálne signály môžu byť naformátované napríklad ako MIDI výstup pre MIDI komunikáciu. To by umožnilo aj nahrávanie do .mid súborov. Týmto spôsobom je možné nahraté súbory prehrať neskôr alebo ich zdieľať s inými zariadeniami. Ostatné zariadenia ho rozpoznávajú ako zariadenie MIDI a prijímajú jeho dáta vo formáte MIDI. Iný známy typ komunikácie je I2C a I2S.

Je to typ sériovej komunikácie, ktorá je široko používaná a kompatibilná. I2C sa skladá z dvoch vodičov: SDA(sériová dátová zbernica) a SCL(sériová hodinová zbernica). Je určený pre 8-bitovú sériovú dvojsmernú komunikáciu s rýchlosťou až 3,4 Mbit/s v High-speed nastavení. V jednosmernom Ultra-fast móde je možné posielat' dáta rýchlosťou až 5 Mbit/s. Zbernica I2C je určená hlavne na komunikáciu medzi polovodičovými prvkami a perifériami. Tento typ komunikácie je často aplikačne orientovaný. V tejto práci bude použitá I2S komunikácia medzi mikrokontrolérom a audio čipom na posielanie audio dát. Smer prenosu dát sa nikdy nezmení. Na jednu I2C zbernicu je možné pripojiť len obmedzený počet zariadení. Adresovanie a prenos dát je čisto softvérovo riešené. Komunikácia pokračuje, pokiaľ je po každom byte Acknowledge bit. Prijímač môže ponechať bit Acknowledge na LOW, čo naznačuje, že príjem dát zlyhal. S podržaním SCL na LOW zariadenie dokáže vyvolať, aby vysielateľ počkal s posielaním ďalších dát. [16]

2. ELEKTRONICKÉ OBVODY

Pri modulárnom riešení musia byť všetky spojenia medzi modulmi vytvorené pomocou káblami / vodičmi. Výhodou tejto metódy je, že ak sú všetky spoje dobre označené, je ľahké realizovať zmeny, úpravy a nové nápady.

V praxi je však lepšie mať všetky elektronické súčiastky na jednom obvode. Medzi jednotlivými modulmi nie sú potrebné žiadne zbytočné káblové spojenia a je možné mať spoľahlivejšie spoje s nižšou impedanciou. Výhodou oproti modulárnym riešeniam je, že sa musí vyrobiť iba jedna doska plošného spoju. Vytvorením jedného obvodu je možné dosiahnuť menšie rozmery. Plošný spoj môže mať svoje napájacie obvody, generátor zvuku, ovládacie prvky pre generátoru pary, zosilňovací obvod, filtračné obvody a konektory pre optické snímače a lasery.

2.1 Napájacie obvody

Z jedného zdroja je potrebné súčasne napájať audio čip s menovitým napätím 1,8 V a súčasne aj napájať piezočlánok s 24 V. V takýchto prípadoch sa používajú zdroje s viacerými výstupnými napätiami, ktoré sú praktické v tom zmysle, že návrhár už nemusí navrhovať DC/DC meniče, pre rôzne požadované napätia. Na trhu neexistuje typ napájacieho zdroja, ktorý by dokázal produkovať všetky potrebné napätia pre všetky obvody.

Zdroje, ktoré sú na trhu, sú nevyhovujúce z praktického alebo finančného hľadiska. Pre takéto nižšie výkony je vhodné použiť jeden napájací zdroj s výstupom 24 V, čo je požadované napájacie napätie pre ultrazvukový parný generátor. Pre ostatné zariadenia je potrebné a navrhnuť obvody s DC/DC meničmi. Obvody:

- pre audio čip
- pre mikrokontrolér
- pre audio zosilňovač
- pre ventilátor
- pre zariadenia ktoré potrebujú 3,3 V napájanie.

2.1.1 Napájanie audio čipu

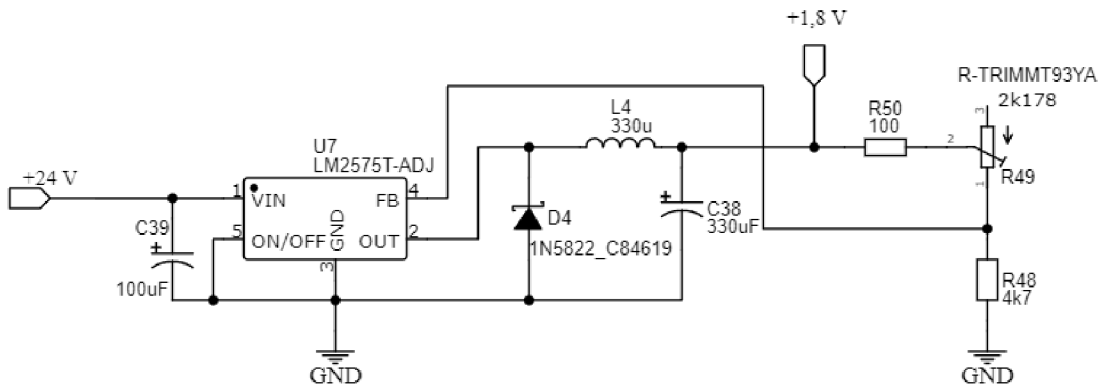
Z dokumentácie zvoleného čipu: SGTL5000 [6] bolo zistené, že pre správnu funkčnosť tohto čipu je ideálne ho napájať s napätím 1,8 V, alebo s 1,62 až 3,6 V. Tento čip má maximálny prúdový odber cca. 200 mA. Tento čip potrebuje zvlášť napájanie analógovej časti, kde bolo zvolené menovité napätie s hodnotou 3,3 V, ktoré je regulované s 600 Ω vinutím kvôli tomu, aby horná limita 3,6 V bola dodržaná aj v krajných prípadoch. Na premenu z napájacieho napätia 24 V na požadovaných 1,8 V bol zvolený DC/DC menič typu LM2575T-ADJ. Pre nastavenie výstupného napätia je potrebné zvoliť rezistor

s hodnotou 2,078 k Ω . Keďže presne takýto rezistor neexistuje bol zvolený trimer typu T93YA472KT20, ktorý má maximálnu nastaviteľnú hodnotu 4,7 k Ω .

Podľa dokumentácie LM2576 [5] je možné vypočítať minimálnu požadovanú kapacitu kondenzátora na výstupe:

$$C_{OUT} \geq 13,300 \frac{V_{IN(Max)}}{V_{OUT} * L(\mu H)} [\mu F] = 13,300 \frac{24}{1,8 * 330} = 266 [\mu F] \quad (2.1)$$

Pre zaručenú stabilitu je potrebné zvoliť kondenzátor s väčšou kapacitou. Bola zvolená 330 μF kondenzátor.



Obrázok 3: Zapojenie LM2576 navrhnuté podľa dokumentácie. [5]

Pre nastavenie výstupného napätia bola najprv zvolená hodnota R1, ktorá musí byť medzi 1 až 5 k Ω . Potom pre výpočet hodnoty R2 bol použitý vzorec z dokumentácie: [5]

$$R2 = R1 \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) = 4700 \left(\frac{1,8}{1,23} - 1 \right) = 2178 [\Omega] \quad (2.2)$$

Trimer je potrebné nastaviť tak, aby spolu s ochranným rezistorom zapojeným sériovo mali spoločne 2178 Ω .

2.1.2 Napájací obvod 3,3 V

Na analógové kontakty mikrokontroléra je možné pripojiť signály s maximálnou amplitúdou 3,3 V. Na prevedenie 24 V na 3,3 V bol zvolený DC/DC menič typu LM2575T-3.3, ktorý má fixné výstupné napätie s hodnotou 3,3 V. Napätie na vstupe digitálnych kontaktov mikrokontroléra bude menšie cca. o 0,3 V, z dôsledku úbytku na fototranzistoroch a impedancií filtračných kondenzátorov.

Regulovanie napájacieho napätia vyššie spomenutej analógovej časti audio čipu bude realizované s cievkou, ktorá má 600 Ω vnútorný odpor. Zvolené lasery vyžadujú tiež 3,3 V napájanie. Jeden laser má príkon 5 mW, čo u 10 kusov je celkovo 50 mW.

Zvýšenie teploty o niekoľko desiatok nm môže znížiť príkon a zvýšiť vlnovú dĺžku vyžarovaného laserového lúča.

2.1.3 Napájanie mikrokontroléra Teensy

Verzia mikrokontroléra 4.1 vyžaduje 5 V napájanie a má maximálny prúdový odber 600 mA. Alternatívne by stačilo aj 3 V cez USB napájanie. V tomto prípade, ale treba odpojiť externé napájanie. DC/DC menič typu LM2576HVT-5.0, ktorý môže mať maximálny príkon na výstupe až 15 W pri 5 V. Vstupné napätie meniča môže byť 4 až 60 V.

2.1.4 Napájanie audio zosilňovača a ventilátora

Ventilátor je možné napájať maximálne 13 V napätím. Maximálny príkon ventilátorovej cievky sa nachádza okolo 990 mW. Na napájanie ventilátora nie sú potrebné žiadne elektrické ochranné obvody.

Pre prevod z 24V na 12V bol zvolený menič: LM2576T-12/NOPB. Tento typ meniča zaručuje stabilných 12 V s maximálnym odberom prúdu 3 A.

Zosilňovač NTE1380 má maximálny výkon 14 W. Tento integrovaný obvod obsahuje ochranu proti skratu a tepelnú ochranu, ktorá rozopne obvod, ak teplota obvodu presiahne 150 °C. Výkon zosilňovača sa automaticky reguluje tak, aby sa dodržiavali pracovné body tranzistorov.[7]

Celkový maximálny elektrický príkon obvodu:

- Laserové diódy: 10*5 mW
- Fototranzistory: 10*2,9 mW
- Teensy 4.1: 500 mW
- SGTL5000: 10 mW
- Generátor pary: 68 W
- Reproduktor: 2 W
- Zosilňovač: 14 W

Maximálny príkon je okolo 84,6 W.

2.2 Optické snímače

Optický znamená bezkontaktný, kde svetlo je médiom. Toto svetlo je elektromagnetické vlnenie s určitou vlnovou dĺžkou. Boli zvolené lasery, ktoré vyžarujú viditeľné červené svetlo v blízkosti 650 nm, ktoré sa môže vplyvom teploty zvýšiť o desiatky nanometrov. Na uľahčenie filtrovania svetla z okolia je možné frekvenčne modulovať laserové diódy mikrokontrolérom cez jeden MOSFET.

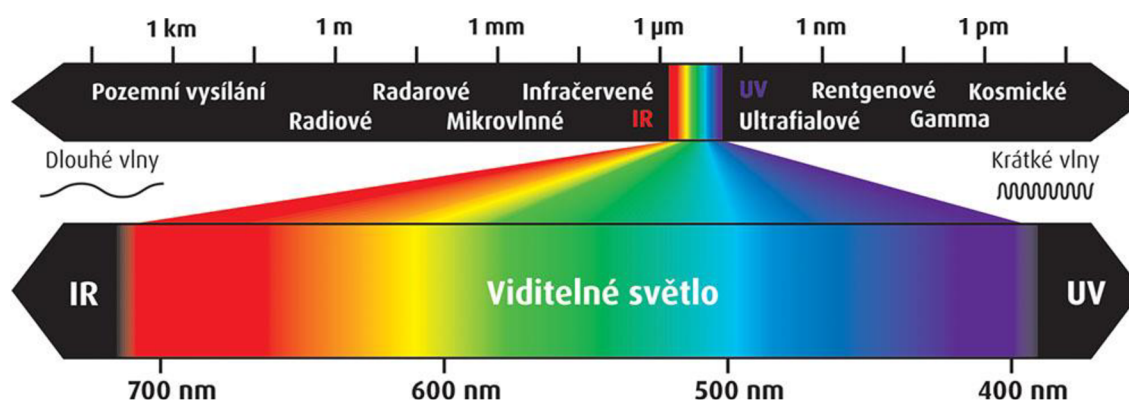
Optické snímače môžu byť založené na rôznych princípoch fungovania. Všeobecne sa delia na 3 typy: fotorezistory, fotodiódy, fototranzistory.

Fotorezistor je vyrobený z polovodičového materiálu. V tme sa správa ako obyčajný rezistor. Keď na fototranzistor dopadne svetlo, z energie fotónu sa generujú elektróny na vodivom pásme a odpor fotorezistora klesne. [8]

Fotodióda má takú istú konštrukciu ako bežná PN dióda. V tme funguje ako spínač vo vypnutom stave, neprepúšťa prúd v opačnom smere. Keď je odkrytý, tak sa prepne do vodivého stavu a prepúšťa prúd. Tento jav sa nazýva fotoelektrický efekt. [8]

Konštrukcia fototranzistora je takmer totožná s konštrukciou bipolárneho tranzistora, len má väčšiu bázu a kolektor. K báze nemusí byť pripojený žiadny vodič s premenlivým potenciálom. Otvorí sa, keď svetlo dopadne na bázu. Jeho hlavnou výhodou oproti fotodióde je, že fotodióda vždy prepúšťa prúd jedným smerom. [8]

Pri výbere fototranzistora však treba zvoliť ten najvýhodnejší, ktorý si úloha vyžaduje. Každý fototranzistor má iné vlastnosti. Rôzne typy puzdier majú rôzne výhody a nevýhody. Zvyčajne sú zafarbené špeciálnou látkou na filtrovanie špecifického rozsahu vlnovej dĺžky. V reálnom svete neexistuje dokonalé riešenie tejto úlohy, iba niekoľko alternatívnych riešení. Na porovnanie, ktorý z nich je pre danú úlohu najvhodnejší, bolo vybraných niekoľko fototranzistorov s rôznymi charakteristikami.

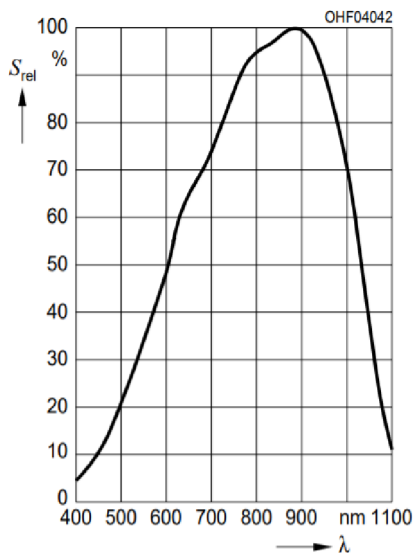


Obrázok 4: Reprezentácia elektromagnetických vlnových dĺžok.

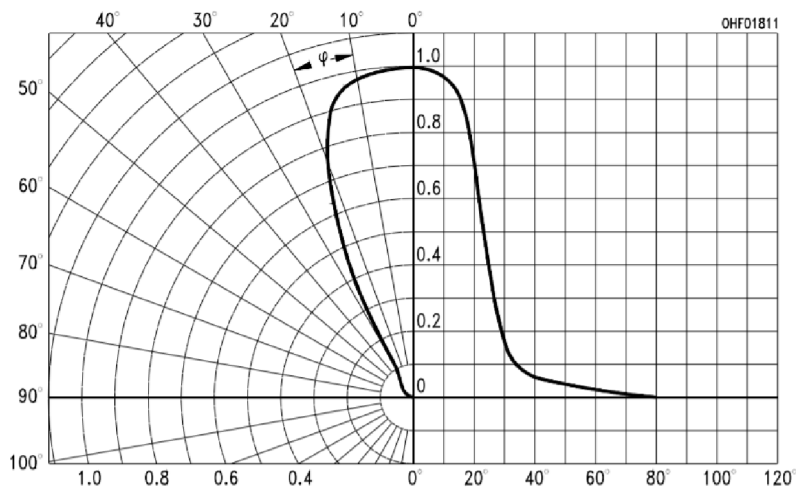
2.2.1 Fototranzistor typu SFH 300 OSRAM

Rozsah jeho citlivosti je 450-1100 nm. Tento rozsah je určený iba snímačom, svetlo nie je blokované farebným filtrom. Priesvitné puzdro umožňuje aby sa ľahšie dostalo svetlo do senzoru. Jeho charakteristika je prevážne lineárna do 800 nm, to umožňuje ľahšie rozlíšiť farbu dopadajúceho svetla. Snímač bude citlivejší na červené svetlo, ktoré je priamo nasvietené, ako na ostatné. Uhol záberu fototranzistora je 50°. Čas nábehovej a zostupnej hrany trvá 10 μs. [9]

Z charakteristiky vyplýva, že červené svetlo s vlnovou dĺžkou 650 nm by sa snímalo približne s 65% citlivosťou. Pri okolitom svetle s kratšou vlnovou dĺžkou by citlivosť lineárne klesala. Tento fototranzistor je najcitlivejší na svetlo s vlnovou dĺžkou 900 nm.



Obrázok 5: Citlivosť SFH 300 OSRAM proti vlnovej dĺžke. [9]

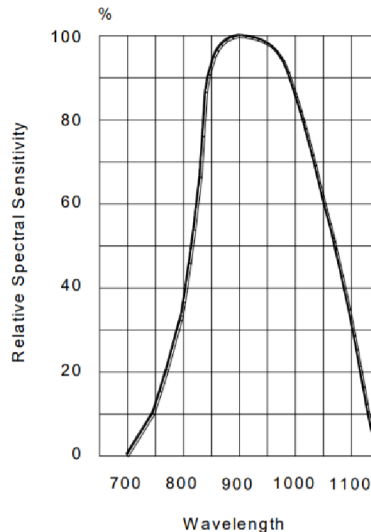


Obrázok 6: Citlivosť SFH 300 OSRAM v závislosti na uhlu dopadajúceho svetla. [9]

Pretože susedné lasery sú umiestnené v týchto uhloch, môžu spôsobiť falošne pozitívne signály. Hoci lasery svietia priamo na protiľahlých fototranzistoroch, časti laserového lúča sa môžu odrážať aj od ruky muzikanta, bez ohľadu na typ fototranzistora. Tento problém je možné vyriešiť iba ovinutím fototranzistora s páskou.

2.2.2 Fototranzistor LTR-323DB LITEON

Tento fototranzistor má rýchly čas spínania, doba nábehovej a zostupnej hrany je 50 ns. Šošovka tohto fototranzistora je charakterizovaná vysokou citlivosťou. [10]



Obrázok 7: Citlivosť LTR-323DB LITEON proti vlnovej dĺžke. [10]

Podľa charakteristík tento fototranzistor nedokáže vôbec snímať 650 nm svetlo. Je celkom pravdepodobné, že zvolené lasery nevyžiaria len čisto 650 nm svetlo. Tento fototranzistor je určený na snímanie infračerveného svetla. Predpokladá sa, že červené lasery vyžiaria aj nevyžiadané infračervené svetlo. Touto metódou je možné úplne odfiltrovať okolité svetlo, pretože obsahuje oveľa menej infračerveného svetla.

2.2.3 Fototranzistor QSD123 ONSEMI

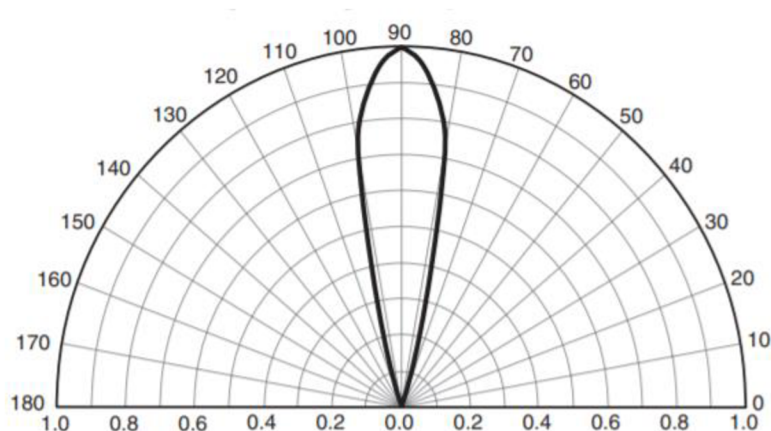
Tento fototranzistor je tiež špeciálne navrhnutý pre infračervené svetlo. Na puzdre je čierny filter denného svetla. Vlnová dĺžka bodu maximálnej citlivosti je 880 nm. Čas náběžnej a zostupnej hrany trvá 7 μ s. Rovnako ako u LTR-323DB [10] aj tento fototranzistor je určený na snímanie nevyžiadaného infračerveného svetla. [11]

Výhodou tohto snímača je, že jeho maximálny uhol citlivosti je len $\pm 10^\circ$. Veľkou nevýhodou je, že dokumentácia k fototranzistoru: [11] neobsahuje charakteristiku citlivosti v závislosti na vlnovej dĺžke dopadajúceho svetla. Predpokladá sa, že má podobné lineárne charakteristiky ako typ SFH 300 OSRAM.

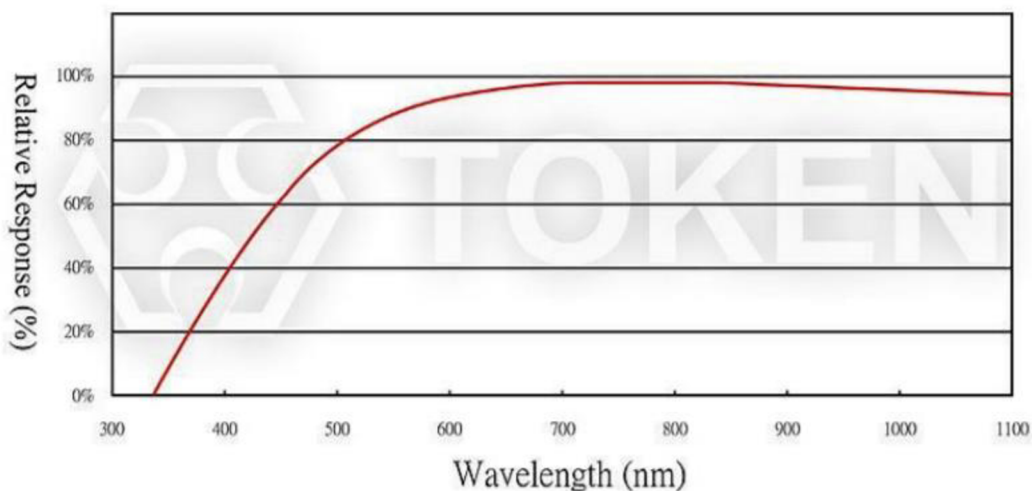
2.2.4 Fototranzistor PT-A1-AC-5-HE-850 TOKEN

Je modernejší, a odolnejší proti šumu. Ide o snímač okolitého svetla, ktorý je citlivý v rozsahu 400-1100 nm. Jeho bod maximálnej citlivosti sa nachádza okolo 850 nm.

Maximálne napätie medzi kolektorom a emitorom pri saturácii je 0,4 V. Čas nábehovej a zostupnej hrany je 15 μ s. [12]



Obrázok 8: Citlivosť QSD123 ONSEMI v závislosti na uhlu dopadajúceho svetla. [11]



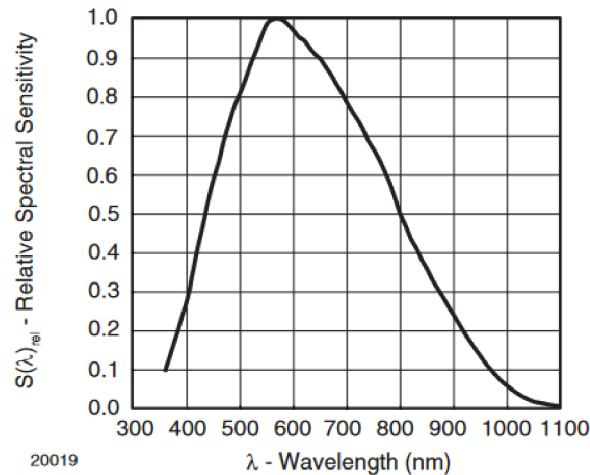
Obrázok 9: Citlivosť PT-A1-AC-5-HE-850 TOKEN proti vlnovej dĺžke. [12]

Ak na fototranzistor dostane fotón z iných zdrojov, okrem lasera nad ním, nemal by sa otvoriť. Obalenie týchto typov senzorov zabráni prístupu svetla z okolia a zároveň z iných laserov. [12]

2.2.5 Fototranzistor TEPT4400 VISHAY

Senzor TEPT 4400 je silikónový NPN epitaxný planárny fototranzistor v puzdre T-1. Je citlivý na viditeľné svetlo, a má vrcholovú citlivosť pri 570 nm. Celkový rozsah citlivosti má od 440 nm do 800 nm. U tohto fototranzistora kolektorový prúd je okolo 20 mA. Napätie na kolektor-emitorom saturačným je 0,1 V. [13]

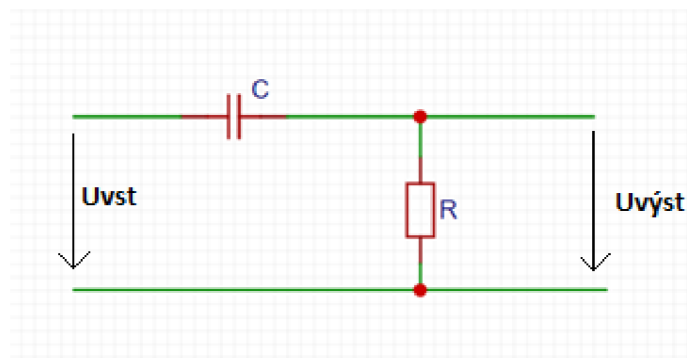
Charakteristiky tohoto typu fototranzistora sú najbližšie k ideálu. Funkčnosť je možné ešte zlepšiť prilepením krytu fototranzistora červenou filtračnou fóliou. Tieto fólie sú určené na konštantné filtrovanie bieloého a modrého svetla. Elektronické riešenie filtrovania je hornopriepustný filter zrealizovaný s pasívnymi súčiastkami.



Obrázok 10: Relatívna citlivosť TEPT 4400 proti vlnovej dĺžke. [13]

2.3 High-Pass filter

Okolité svetlo môže spôsobiť značné problémy pri snímaní laserov. Toto svetlo je takmer statické s veľmi nízkou frekvenciou. Jedno z najjednoduchších riešení je použitie derivačného článku. Mikrokontrolér má predvolenú výstupnú frekvenciu 4,482 kHz cez PWM. Ako mezná frekvencia bola zvolená 1000 Hz.



Obrázok 11: Vzorové zapojenie derivačného článku.

Prvý krok pri návrhu filtra bol výber kondenzátoru s kapacitou 10 μF . Následne bola pre zvolený kondenzátor vypočítaná hodnota rezistoru pri danej meznej frekvencii.

Hodnota rezistora bude následovná:

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 15,9 [\Omega] \quad (2.3)$$

Bol zvolený 16 Ω rezistor. Zvolený kondenzátor má impedanciu:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 4482 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 3,5 \Omega [\Omega] \quad (2.4)$$

Výpočet meznej frekvencie s počítanou impedanciou kondenzátora:

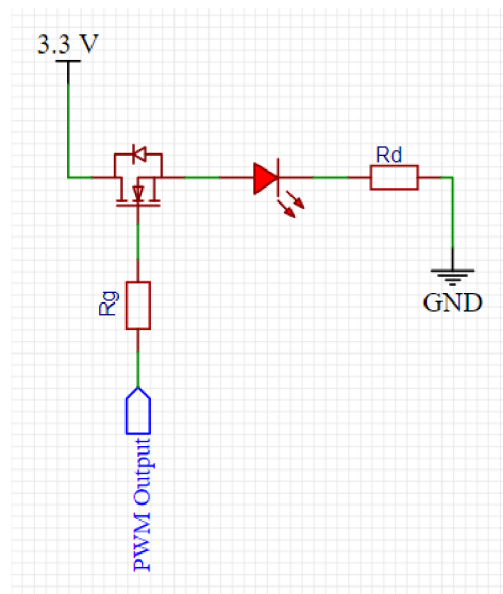
$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (16 + 3,55) \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 814,1 [Hz] \quad (2.5)$$

Výpočet výstupného napätia:

$$U_{vst} = 3 \text{ V}$$

$$R = 16 \pm 0,16 \Omega$$

$$U_{výst} = U_1 \frac{R}{R + X_C} = 3 \cdot \frac{16}{16 + 3,55} = 2,46 \pm 0,01 [V] \quad (2.6)$$



Obrázok 12: Vzorové zapojenie laserovej diódy.

Tranzistor: $R_{ds} = 0,0065 \Omega$

Prúd na dióde:

$$I_D = \frac{0,005 \text{ W}}{3 \text{ V}} = 1,667 \text{ [mA]} \quad (2.7)$$

Sériovo zapojený rezistor:

$$R_d = \frac{0,3 \text{ V}}{1,667 \text{ mA}} = 180 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (2.8)$$

Rezistor na Gate:

$$R_g = \frac{0,2 \text{ V}}{0,002} = 100 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (2.9)$$

Kde úbytok napätí na rezistore je 0,2 V.

Riešenie s pasívnymi súčiastkami je len jedným z možných riešení filtrovania okolitého svetla. Signály je možné aj digitálne filtrovať pomocou mikrokontroléra, čo si však vyžaduje návrh ďalších pomocných elektrických obvodov.

2.3.1 Alternatívne riešenie

Problém je v tom, že najvyššie napätie na emitore testovaných fototranzistorov bolo asi 1,3 V z maximálnych 3,3 V, čo nie je dostačujúce. Na dosiahnutie HIGH signálu TTL logiky je potrebné mať na vstupe aspoň 2 V. V tom prípade by bolo možné použiť aj digitálne vstupy mikrokontroléra. Namiesto hornopriepustného filtra je možné použiť operačné zosilňovače, ktoré zvyšujú napäťové rozdiely a tým sa získa väčší napäťový rozsah. Takéto riešenie vyžaduje lepšie, výkonnejšie napájacie obvody a ešte viac filtrov na odfiltrovanie zosilneného rušenia. Takýto obvod by bol ešte robustnejší. Riešenie s komparatorovými obvodmi by bolo tiež celkom podobné. Jednoduchšia a efektívnejšia alternatíva je spínanie tranzistoru s emitorom fototranzistora. S tým je možné ošetriť viac miesta v porovnaní s operačným zosilňovačom.

Nakoniec najjednoduchším spôsobom je pripojiť emitory fototranzistorov k analógovým pinom vstupov a potom softwareovo spracovať signály. Potom, že už mikrokontrolér vie zistiť prítomnosť alebo neprítomnosť lasera, je potrebné myslieť na to, že aký bude mať zvuk táto harfa.

2.4 Generátory zvuku – Typy Syntezátorov

Proces tvorby zvuku sa nazýva syntéza. Najčastejšie to funguje na princípe kombinovania prvkov ako sú napríklad harmonické vlny. Syntetizátor je elektrický prvok, ktorý funguje na princípe subtraktívnej syntézy, aditívnej syntézy alebo frekvenčne modulovanej syntézy. Syntéza nám umožňuje vytvárať a napodobňovať zvuk každého typu. [4]

Typy syntéz možno zovšeobecniť do niekoľkých skupín:

- Oscilátory harmonických vln
- Digitálne oscilátory
- Tabuľkové oscilátory
- Granular synthesis
- Multiwave oscilátory
- Aditívna syntéza

2.4.1 Oscilátory

Tiež známe pod menom VCO (Voltage Controlled Oscillator) alebo DCO (Digital Controlled Oscillator). Delia sa na oscilátory harmonických vln a na oscilátory šumu. [4]

2.4.1.1 Oscilátory harmonických vln

Najjednoduchšie je vytvoriť vlny s rôznymi amplitúdami a frekvenciami. Sínusová vlna je najjednoduchšia taká vlna. Hoci sa čisté sínusové vlny v prírode nevyskytujú, stále sú to najčastejšie používané oscilátory v syntetizátoroch. Trojuholníkové vlny sú obľúbené kvôli farbe zvuku. Pílové vlny majú viac „bzučivejší“ charakter ako sínusové vlny, pričom pulzové vlny alebo štvorcové vlny sa používajú na napodobnenie drevených dýchových hudobných nástrojov. Ak lineárne meníme šírku pulzu pri prehrávaní tónu, môžeme dosiahnuť zaujímavé audio efekty. [4]

2.4.1.2 Oscilátory šumu

Šum možno opísať ako veľmi rýchle náhodné vychýlenia v celom rozsahu amplitúdovo-frekvenčného spektra. Tento typ oscilátoru sa primárne používa pri tvorbe realistických zvukov alebo pre napodobnenie bicích nástrojov.

Šum má aj farbu. Zvuk bieleho šumu sa podobá „syčiacej pare“, červený(hnedý) šum je najsilnejší pri nižších frekvenciách, ružový šum sa najviac podobá na zvuk padajúceho dažďa, kým fialový má sykavý tón a modrý môže byť opísaný ako „lesklý“ alebo „iskrivý“. Niektoré syntetizátory šumu sú schopné vytvárať zvuky prasknutia alebo aj iné špecifické zvuky. [4]

2.4.2 Digitálne oscilátory

V dnešnej digitálnej dobe sa už tieto vyššie spomenuté jednoúčelové analógové oscilátory väčšinou nepoužívajú. Namiesto toho sa používajú vzorky vln v maličkých digitálnych súboroch, nahratých do takzvanej „lookup table“. Prechádzaním tejto tabuľky dopredu definovaných vln, oscilátor môže vygenerovať akýkoľvek komplexný a realistický zvuk. Oscilátory vytvorené touto technológiou, ktoré ponúkajú prehrávanie zvukov nahratých z ROM, sú jednoznačne realistickejšie. [4]

2.4.3 Wavetable Oscillator

Tento typ oscilátoru prechádzaním tabuľky hľadá konkrétne vlnové sústavy, z ktorých dokáže vygenerovať aj komplexnejšie zvuky. Lenže wavetable lookup oscillator už má uložené vzorky nahrávok ako skladané vlny. Tieto vzorky môžu byť konkrétne súbory s .wav príponou, alebo nahrávky jednotlivých tónov s rôznymi silami konvertované do iného špeciálneho formátu. Jeden wavetable objekt môže obsahovať vzorky viacero hudobných nástrojov, ale zvyčajne sa zvolí jeden wavetable pre vzorky jedného hudobného nástroja. Na dosiahnutie polyfónie, je potrebné pre jeden hudobný nástroj vytvoriť viacero wavetable oscilátorov. [4]

2.4.4 Granular Synthesis

Ide o metódu pri ktorej sa používajú menšie časti digitálnych nahrávok (s dĺžkou cca 50ms). Kombinovaním týchto „mikronahrávok“ (Grainov) je možné dosiahnuť väčšiu „farebnú“ variabilitu a náhodnosť a tým aj realistickejšiu imitáciu zvukov. [4]

2.4.5 Multiwave Oscillators

Kombináciou viacerých podobných oscilátorov je možné zvýšiť intenzitu tónu alebo obohatiť farbu tónu. Bežne sa používajú aspoň 3 oscilátory, ktoré vo všeobecnosti generujú rovnaký typ vln, napr. pilové alebo štvorcové.

2.4.6 Additive Synthesis

Pri tejto metóde sa kombinujú stovky jednoduchých základných sinusových vln rôznych frekvencií a amplitúd. Pomocou tejto metódy je možné emulovať akýkoľvek zvuk s komplexným harmonickým spektrom. Je založená na teórii Fourierovej rady. Pôvodne sa používala aj na vytváranie trojuholníkových, pilovitých a štvorcových signálov. Na vytvorenie ideálnych signálov alebo perfektne tvarovaných signálov však je potreba použiť nekonečné množstvo oscilátorov. Táto metóda vyžaduje veľa oscilátorov, jeden fyzický oscilátor pre každú vlnu. Preto bola subtraktívna syntéza populárnejšia.

Wavetable synthesis je tiež schopná Fourierovej transformácie, potrebné je len to, aby jednotlivé vlny boli základnými vlnami výsledných vln. Na prehrávanie zvukov generovaných mikroprocesorom musí byť audio signál zosilnený výkonným zosilňovacím obvodom. [4]

2.5 Zosilňovač

Na návrh zosilňovacieho obvodu je potrebné najprv zvoliť zosilňovací čip. Integrovaný obvod NTE1380 funguje ako audio zosilňovač triedy AB. Jeho výstupný výkon v typickom prevedení je 14 W. Je takmer identický s integrovaným obvodom typu TDA2030. Tento obvod má tiež typický výstupný výkon 14 W pri 4 Ω záťaži a maximálny prúd na výstupe môže byť až 3,5 A. [7][14]

Integrovaný obvod NTE1380 integruje všetky ochranné obvody, ktoré sú integrované v čipe TDA2030. Pretože rozdieli medzi čipmi sú zanedbateľné predpokladá sa, že integrovaný obvod TDA2030 má rovnaké vlastnosti ako NTE1380.

2.5.1 Ochrana proti skratu

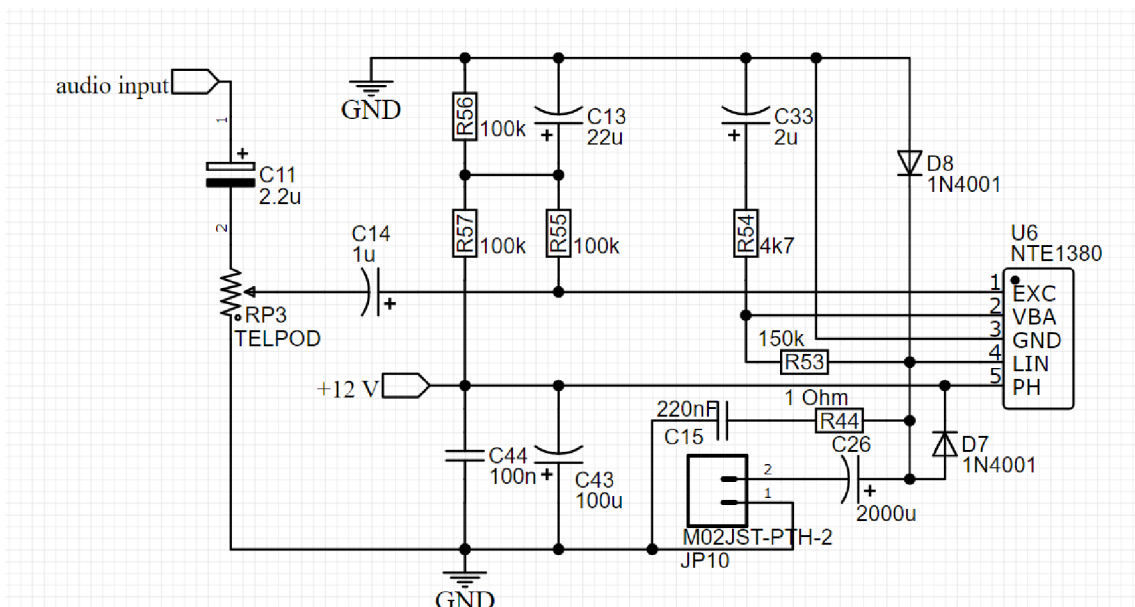
TDA2030 má implementovaný elektrický obvod na obmedzenie výstupného prúdu tranzistorov v obvode. Táto maximálna hodnota závisí aj od napätia medzi kolektorom a emitorom. Tento integrovaný obvod dokáže udržiavať bezpečný pracovný bod pre tieto tranzistory. Obmedzenie špičkového výkonu je lepšie ako obmedzenie prúdu pretekajúceho obvodom. Tiež chráni zosilňovač, aj keď sa náhodou pripojí striedavé napätie medzi výstupom a zemou. [14]

2.5.2 Tepelná ochrana

Tento integrovaný obvod zabezpečuje, aby teplota čipu nikdy neprekročil 150 °C. S externým chladičom by bolo možné aj preťažiť výstupný výkon a tento ochranný obvod by udržal čip pod 150 °C. [14]

2.5.3 Návrh zosilňovacieho obvodu

Pri návrhu obvodu je potrebné dodržiavať niekoľko zásad z dokumentácie integrovaného obvodu TDA2030. [14] Nedodržiavanie hodnôt odporov môže mať za následok, že výkon na výstupe bude väčší od očakávaného, a to môže spôsobiť kratšiu životnosť niektorých súčiastok. Výkonový zisk v uzavretej slučke musí byť aspoň 24 dB.



Obrázok 13: Navrhnutá zosilňovacia časť obvodu s čipom NTE1380.

Pripojenie rezistora menšej hodnoty ako odporúčaná k neinvertujúcemu vstupu bude mať za následok, že bude nižšia vstupná impedancia. Nedodržovanie hodnôt napät'ového deliča na neinvertujúcom vstupe môže viesť k oscilácii alebo strate kvality zosilňovania. Na výstupe je paralelne pripojený kondenzátor s hodnotou 0,22 μF s 1 Ω rezistorom. To je potrebné na udržanie frekvenčnej stability. Väčšia kapacita tohto kondenzátora môže spôsobiť oscilácie pri vyšších frekvenciách. Ideálna kapacita sériovo zapojeného kondenzátora je 1 μF alebo viac. Kondenzátory zapojené paralelne s napájaním musia mať kapacitu aspoň 0,1 μF a 100 μF . Dióda 1N4001 je ochranná dióda, ktorá chráni pred špičkami výstupného napätia. [14]

Po návrhu zosilňovacieho obvodu ostane už len návrh generátora pary. Aby boli lasery viditeľné aj za denného svetla, musí byť vzduch zvlhčený.

2.6 Generátor pary

Dôležitou súčasťou tejto úlohy je generátor pary. Na vykonanie tejto úlohy bol zvolený piezoelektrický vibračný menič typu Mist Maker 3. Tento typ ultrazvukového piezoelektrického vibračného meniča stačí umiestniť do kvapaliny a pripojiť k napájaciemu zdroju a bude produkovať paru. Výhodou je, že tieto súčiastky sú lacné a jednoducho sa implementujú do takýchto projektov. Ako kvapalina pre generátora pary sa najčastejšie používa čistý glycerín zriedený destilovanou vodou, pretože umožňuje pomerne jednoducho regulovať hustotu pary prídávaním destilovanej vody. Vytvára oveľa hustejšiu paru ako čistá destilovaná voda. Pre menej náročné projekty možno použiť aj čistú vodu alebo len destilovanú vodu. [19]

Ultrazvukové generátory tohoto typu nevyžadujú pomocný elektrický obvod na generovanie rezonančnej frekvencie, všetko je zabudované v puzdre. Ovládanie tohto piezoelektrického meniča je možné riešiť so spínaním uzemnenia s jedným MOSFET tranzistorom. Tento tranzistor je spínaný mikrokontrolérom.

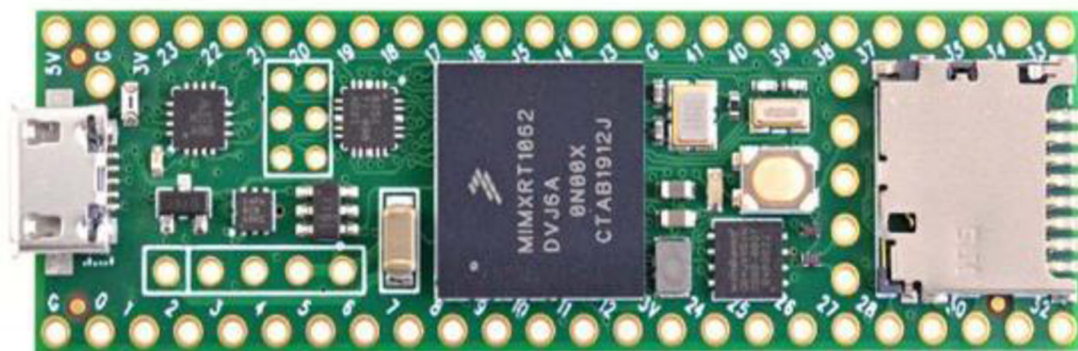
2.7 Mikrokontrolér

Teensy 4.1 obsahuje ARM Cortex-M7 mikroprocesor s frekvenciou 600 Mhz. Je ideálny na ukladanie a prehrávanie dát. Na spodnej časti dosky sú 2 miesta, kde je možné prispájkovať viac pamäte. [15]

Výhodou Teensy je, že umožňuje dynamicky meniť taktováciu frekvenciu. Procesy, ako: streamovanie zvuku, sériový prenos dát, časovacie funkcie pracujú presne aj keď zmeníme rýchlosť procesoru. Procesor Cortex-M7 obsahuje jednotku s pohyblivou rádovou čiarkou (FPU). Každé použitie funkcií $\log()$, $\sin()$, $\cos()$ sa vykoná s hardwarom FPU. [15]

Cez USB je tiež možné sprostredkovať MIDI signály a potom tento mikrokontrolér je možné použiť aj ako MIDI zariadenie. Má slot na SD kartu a micro USB port, ktorý

umožňuje pripojenie k počítaču a nahratie programu do pamäte mikrokontroléra. Firmware je program, s ktorým mikrokontrolér pracuje. [15]



Obrázok 14: Mikrokontrolér Teensy 4.1. [15]

3. FIRMWARE

Po zhotovení tohto projektu tento program nie je určený na ďalšie zmeny. Na programovanie mikrokontroléra Teensy je možné používať Arduino IDE, alebo aj iné programovacie prostredie, ako napríklad Microsoft Visual Studio s pomocnými plug-inmi.

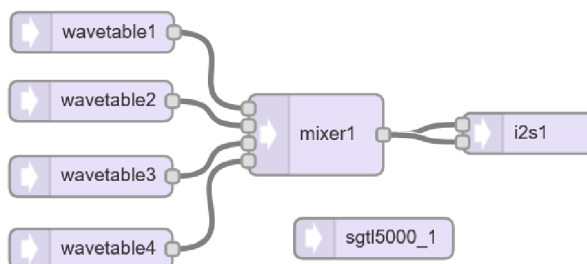
Cielom je napísať program ktorý bude posielat' I2S signály do audiočipu, v momentoch, keď sa zaznamená neprítomnosť laseru na niektorých analógových vstupoch. Tieto analógové signály budú filtrované(derivované) signály, ktoré priamo závisia od prítomnosti laserov. V skutočnosti ide o periodicky sa opakujúce napät'ové špičky s veľkosťou okolo jedného voltu.

Po zapnutí systému si program mikrokontroléra najskôr inicializuje všetky potrebné objekty a premenné a následne nakalibruje hraničné premenné pre analógové vstupy. Po úspešnej kalibrácii sa program prejde do hlavnej slučky.

3.1 Definovanie audio objektov

Knižnica *Audio.h* obsahuje sadu nástrojov, ktoré uľahčujú prácu s audio projektmi. Je podporované: polyfónne prehrávanie, nahrávanie zvuku, viac typov syntézy, analýza zvuku, zvukové efekty, filtrovanie, mixovanie viacerých vstupov. Audio dáta sa prenášajú interne. [17]

Objekt *wavetable* podporuje ľubovoľné tvary vln, je ho však nutné definovať na začiatku programu, aby používal vzorky z knižnice vzorov harfy. Používa sa 10 *wavetable* syntezátorov, čo reprezentuje 10 strún. Na prehrávanie týchto vzorov je ešte potrebné vytvoriť objekt, ktorý komunikuje s čipom STGL5000 a definovať objekt pre zvukový výstup. Tieto audio objekty sú pospájané pomocou objektov *AudioConnection*. Tieto prepojenia je možné vytvoriť aj graficky pomocou online nástroja Audio System Design Tool. Pomocou tohto nástroja je možné vytvárať schémy audio systémov a nakoniec ich exportovať ako kód do programu. Parametre konštruktora objektu *AudioConnection* sú: zdrojový objekt, jeho port v schéme, cieľový objekt, port cieľového objektu. [18]



Obrázok 15: Príklad vytvárania pripojení pomocou Audio System Design Tool.

3.2 Kalibrácia rozsahov AD prevodníku

Je predpokladané, že táto harfa sa bude používať v miestnostiach s rôznymi svetelnými podmienkami. Intenzita a farba okolitého svetla sa môže líšiť v závislosti od toho, ako veľmi svieti slnko cez okná, v prípade od intenzity osvetlenia miestnosti.

Vzdialenosť medzi párami laserov a fototranzistorov nie je rovnaká. Aj keď sa tieto vzdialenosti nemenia, intenzita okolitého svetla sa môže líšiť od fototranzistora k fototranzistoru. Pri štarte sa systém zapne do kalibračného režimu, kde spína všetky lasery a zaznamená minimum a maximum AD prevodníkov pre každý analógový pin.

Pre nastavenie LOW úrovne príslušného pinu sa zapnú všetky lasery okrem lasera, ktorý je priamo nad daným fototranzistorom. Táto hodnota je uložená ako maximálna požadovaná úroveň AD prevodníka na prepnutie logického stavu do úrovne LOW. Úroveň AD prevodníka je potrebné testovať aj s vypnutými lasermi, aby sa získala hodnota len pri čistom okolitom svetle. Táto hodnota musí byť nižšia ako predchádzajúca hodnota, keďže tu nesvietia žiadne červené lasery. Keďže sa okolité svetlo môže meniť, treba myslieť na to, že táto hodnota môže byť v daných okamžikoch aj trikrát vyššia alebo nižšia. Preto sa táto hodnota kontroluje pre všetky piny počas kalibrácie. Na konci kalibrácie sa získa priemer tejto hodnoty. Táto hodnota bude pôsobiť ako posun, ktorý sa čiastočne pripočíta k nastavenej hodnote potrebnej na zmenu pinu na logickú LOW úroveň. Touto metódou sa dosiahne najvyššia možná presnosť pri každej kalibrácii.

Pre nastavenie HIGH úrovne príslušného pinu musia byť vypnuté všetky lasery okrem lasera priamo nad fototranzistorom. Táto hodnota je uložená ako minimálna požadovaná úroveň AD prevodníka na prepnutie pinu do logickej HIGH úrovne. Pre nastavenie správnej tolerancie je však potrebné od tejto hodnoty odpočítať určitú časť priemernej hodnoty intenzity okolitého svetla.

Takáto by bola ideálna kalibrácia. S týmto zapojením však nie je možné samostatne spínať lasery. Implementácia kalibrácie bude v programe o niečo jednoduchšia. Na začiatku sa všetky lasery zapnú a zaznamenajú sa hodnoty analógových vstupov. Neskôr sa všetky lasery vypnú a hodnoty analógových vstupov sa znova zaznamenajú. Program zopakuje toto meranie 100-krát, aby sa odstránil šum pri meraní. Vypočíta sa rozdiel medzi hodnotami zapnutia a vypnutia a pripočíta sa jedna desatina rozdielu k hodnote vypnutia a odrátava sa jedna desatina rozdielu od hodnoty zapnutia. Celý proces trvá presne 5 sekúnd.

Po kalibrácii sa program dokáže úspešne rozhodovať, či zaregistruje daný laser ako prítomný alebo neprítomný.

3.3 Kontrola prítomnosti laserov v programe mikrokontroléra

Program sleduje prítomnosť každého lasera ako logickú premennú. V programe sa táto premenná nazýva *isLaser*. Táto logická premenná bude logická nula, ak nie je prítomný

laser, inak je to logická jednotka. Logická nula v tomto prípade znamená LOW úroveň a HIGH úroveň je reprezentovaná logickou jednotkou. Na začiatku programu budú všetky logické premenné v stave HIGH, pretože sa očakáva prítomnosť všetkých laserov. V tomto prípade harfa neznie. Hraničné hodnoty získané po kalibrácii sú v programe uložené ako konštanty *onADC* a *offADC*. Pomocou týchto konštant bude program zmeniť stavy premenných *isLaser* z LOW na HIGH alebo naopak.

Ide v podstate o funkciu, ktorá vykonáva spínanie s hysterezou, kde vstupným parametrom je hodnota prečítaná z analógového pinu fototranzistora. Ak je logická úroveň tohto pinu logická jednotka, kontroluje sa len podmienka pre prepnutie do logickej nuly. Tento stav nastane, keď hodnota prečítaná z analógového pinu je menšia ako konštanta *onADC*. Ak je v premennej *isLaser* logická nula, skontroluje sa iba, či hodnota prečítaná z analógového pinu je väčšia ako *offADC*. Táto kontrola sa vykonáva pre všetky analógové vstupy v hlavnej slučke do nekonečna.

3.4 Hlavný cyklus

Program tu vždy kontroluje úroveň na všetkých analógových vstupoch. Keď program prečíta analógové vstupy, porovnáva ich s hraničnými hodnotami a podľa toho spína logickú premennú *isLaser*. To prebehne nasledovne.

V prípade, že daný laser je zaznamenaný za prítomný, teda premenná *isLaser* je logická jednotka, program skontroluje iba neprítomnosť lasera. Na prepnutie premennej *isLaser* do logickej nuly, program musí prečítať menšiu hodnotu z daného pinu ako je jej *offADC*. Ak je táto podmienka splnená, aktuálny čas sa uloží do premennej *wentOffMillis*. Ak sa práve prehráva daný tón, program ho zastaví. Program potom uloží logickú nulu do premennej *isLaser*.

V prípade, že laser je zaznamenaný za neprítomný, program skontroluje iba prítomnosť lasera. Na prepnutie premennej *isLaser* do logickej jednotky musí program prečítať väčšiu hodnotu z daného pinu ako jeho *onADC*. Ak je táto podmienka splnená, vypočíta sa doba neprítomnosti lasera, ktorý sa v programe nazýva *offTime*. Túto premennú program vypočíta z rozdielu aktuálneho času v milisekundách a z premennej *wentOffMillis*. Sila tónu sa vypočíta z exponenciálnej funkcie, kde parameter je *offTime*. Tento výpočet je podrobnejšie opísaný v rovnici 3.1. Program potom zahrá daný tón s vypočítanou silou. Tón sa prehráva vo formáte MIDI. Potom program uloží logickú jednotku do premennej *isLaser*.

3.4.1 MIDI formát a metóda zahratie tónu

Program na prehrávanie nôt používa metódu `playNote` objektu `wavetable`, ktorá má 2 parametre: `note`, `velocity`. Prvým parametrom je hodnota MIDI tónu v rozsahu od 0 do 127. Tradičný klavír má rozsah tónov v formáte MIDI od 21 do 108. Táto harfa s 10 strunami má rozsah od jednočiarkovaného C(C4) do dvojčiarkovaného E(E5), kde každá

struna bude naľadená na celé tóny v tomto rozsahu.

Tabuľka 1: Mapovanie strún a tónov.

Struna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tón	C4	D4	E4	F4	G4	A4	H4	C5	D5	E5
MIDI	60	62	64	65	67	69	71	72	74	76

Druhým parametrom je sila tónu. Maximálna hodnota je 127 a minimálna je 0. Sila tónu sa vypočíta z rýchlosti brnknutia struny, v prípade laserovej harfy bude tón silnejší v závislosti od toho, ako dlho je laser prerušený.

Na výpočet sily tónu je použitý výpočet:

$$noteVel = \frac{e^{-K \frac{offTime}{1000}} - e^{-K}}{1 - e^{-K}} \quad [-] \quad (3.1)$$

Kde *noteVel* je sila tónu. Táto hodnota je necelé číslo medzi 0 a 1. Je vynásobená konštantou 127 aby mal rozsah od 0 do 127 a je prekonvertovaná na celé čísla. Strmost' exponenciálnej funkcie je možné nastaviť pomocou konštanty *K*. Doba prerušenia laseru sa počíta od zmiznutia laseru a je ukladané v premennej *offTime* v milisekundách. Ak je *offTime* dlhší ako 1000 milisekúnd, program zaznamená prítomnosť laserového lúču, ale tón neprehrá.

Pri rôznych hodnotách *K* možno dosiahnuť strmší alebo lineárnejší priebeh funkcie. Niektoré digitálne hudobné nástroje umožňujú používateľovi upraviť dynamiku hudobného nástroja alebo prípadne aj úplne vypnúť. Úpravou dynamiky môže používateľ prispôbiť svoj nástroj konkrétnym skladbám alebo konkrétnym hudobným štýlom. K týmto nastaveniam sa zvyčajne pristupuje pomocou používateľského rozhrania alebo funkčných kláves.

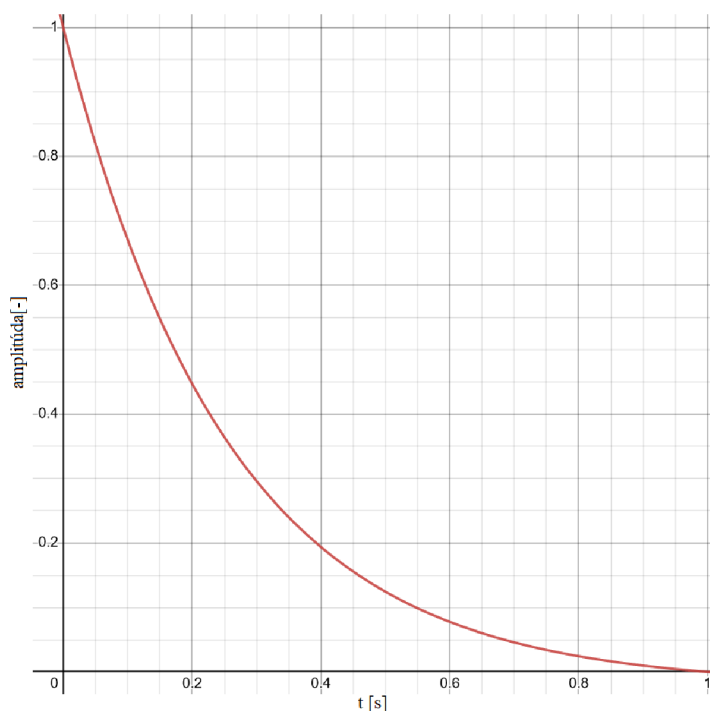
Pri komunikácii je možné tieto dva údaje zapísať pomocou jedného bajtu, kde prvý bit určuje, či ide o číslo tónu alebo hodnotu sily a ostatné bity udávajú veľkosť hodnoty. Zahraté noty by bolo tak možné posielat' cez sériovú komunikáciu, a táto harfa by mohla fungovať aj ako MIDI hudobný nástroj.

Pomocou vyššie opísanej funkcie sily tónu je možné zahrat' tiché noty ale zahratie staccato nôt je tiež možné.

3.4.2 Schopnosť hrať tiché a staccato noty

Staccato je skrátaná nota alebo stlmený, prerušený tón. Na akustickej harfe je staccato to, keď hráč zastaví vibrácie strún hneď po brnknutí. Tón je vtedy náhle prerušený. Keď program zaregistruje zmiznutie lasera, prehrávanie tónu sa preruší. Čím dlhšia je doba

prerušenía laseru, tým tichší bude daný tón, ktorý program prehrá po opätovnom objavení laseru. Maximálna doba prerušenia laseru môže byť jedna sekunda. Kombináciou týchto vlastností sa získa časovo závislá dynamika strún. Rýchlejšie brnknutie produkuje silnejší, hlasnejší tón, čo je dostatočne realistické v porovnaní s akustickou harfou. Nevýhoda tejto metódy je, že rýchle pasáže plné staccatov nie je možné zahrať perfektne, lebo tóny sa prehrávajú znova, ak neuplynie celá jedna sekunda. Je tiež možné nastaviť kratší maximálny čas prerušenia laseru, ale to by malo za následok, že hráč by mal menšiu kontrolu nad dynamikou.

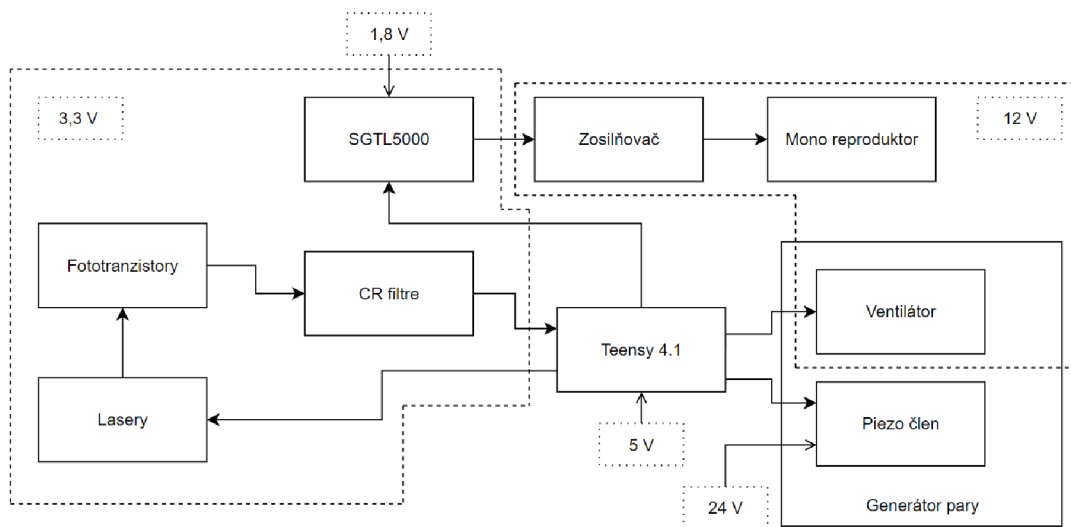


Obrázok 16: Funkcia sily tónu, kde $K=4$.

Po návrhu firmwaru ostávalen implementovať novú elektroniku, otestovať funkcie a prípadne opraviť vzniknuté nepredvídané chyby.

4. ZREALIZOVANIE NOVEJ ELEKTRONIKY

Funkčnosť elektrického obvodu je nasledovná: laserové diódy žiaria červené svetlo na fototranzistory a emitory týchto fototranzistorov sú pripojené na vstupné piny mikrokontroléra. Prerúšením laserového lúča sa na fototranzistor dostane len okolité svetlo. Na príslušnom vstupe mikrokontroléra teda bude takmer nulový potenciál. Program mikrokontroléra vyhľadá príslušný tón harfy v zozname vzoriek a odošle ho do audio čipu signálmi I2S. Audio čip: SGTL5000 vygeneruje príslušný tón, ktorý je potom zosilnený zosilňovačom čipom NTE1380 a prehrávaný cez reproduktor.



Obrázok 17: Blokovaná schéma elektrického obvodu.

4.1 Schéma zapojenia

Schéma zapojenia sa vyvíjala postupne, po častiach. Emitory fototranzistorov sú pripojené k mikrokontroléru na piny A0, A2, A3, A8, A10-17. Tieto analógové vstupy majú 10 až 12 bitové rozlíšenie (od nuly do 1023 až 4095). MOSFET, ktorý prepína lasery bude ovládaný pinom číslo 2. [15]

Piny číslo 18 a 19 slúžia na I2C komunikáciu s audio čipom. Piny 20 a 21 slúžia na synchronizáciu s časovačmi audio čipu. Kompletná schéma zapojenia je priložená v prílohe. V tejto časti bolo zapojenie popísané len stručne.

4.2 Testovanie navrhnutých zapojení

Táto časť popisuje testy vykonané pred výrobou PCB dosky. Pred tým, ako je návrh poslaný do výroby je potrebné jeho funkcie aj fyzicky otestovať. Testovanie každého

jednotlivého obvodu umožňuje ľahšie nájsť potenciálne chyby v návrhu, ktoré sa môžu vyskytnúť na hotovej doske.

4.2.1 Skúška fototranzistorov

Najprv boli testované fototranzistory s infračerveným filtrom. Zistilo sa, že fototranzistory len veľmi málo sa otvoria na červené svetlo. Rozdiel v napätí na emitore medzi zapnutým a vypnutým laserom bol rádovo 16 mV.

Ostatné fototranzistory celkom dobre reagovali na červené svetlo, ale aj na okolité svetlo. Pri priamom nasvietení bol však rozdiel oveľa väčší. Najlepšia rozlíšiteľnosť sa však dosiahlo s typmi fototranzistorov: PT-A1-AC-5-HE-850, TOKEN a TEPT4400, VISHAY. Nakoniec bol zvolený typ TEPT4400, pretože má vhodnejšiu charakteristiku na meranie červeného svetla a lepšiu vodivosť.

4.2.2 Skúška napájacích obvodov

Na otestovanie funkčnosti návrhu napájacích obvodov bol zvolený obvod používaný na generovanie 3,3 V. Všetky súčiastky boli zapojené na breadboard podľa schémy. S multimetrom na výstupe sa meralo 3,4 V. Táto chyba je však zanedbateľná, keďže zapojenie bolo zrealizované na breadboarde.

Toto zapojenie možno považovať za správne. Keďže zapojenia ostatných meničov sú relatívne podobné, možno ich tiež považovať za správne.

4.2.3 Skúška zosilňovacieho obvodu

Zapojenie bolo najskôr zrealizované na breadboarde. Prvý pokus bol neúspešný, neprodukoval žiadny merateľný zvukový výstup. Kvôli tomu bolo zapojenie prerobené na jeho zjednodušenú verziu, čo sa osvedčilo, ale až po naspájkovaní súčiastok na skúšobnú spájkovaciu dosku, tzv. prototype board. Potvrdilo sa, že breadboard je vo všeobecnosti menej spoľahlivý.

4.2.4 Test citlivosti fototranzistora na červený laser a na okolité svetlo

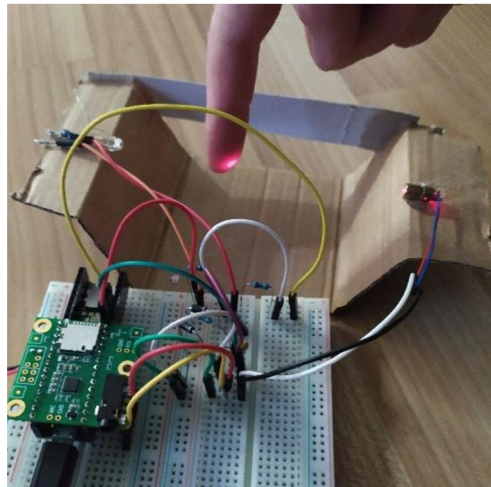
Na tento účel bol navrhnutý tento jednoduchý obvod, kde laser a fototranzistor tvoria optickú závoru. Všetky fototranzistory boli testované. Testy ukázali, že najvhodnejším fototranzistorom je TEPT4400.

Po otestovaní týchto hlavných obvodov už len bolo treba zhotoviť plošný spoj a skontrolovať, či všetko funguje správne.

4.3 Montáž PCB

Rozdelením celého obvodu na menšie logické časti a ich priebežným pridávaním je možné predísť tomu, aby sa vyskytlo viac chýb súčasne. Základom efektívneho pracovného postupu je súčasné riešenie menšieho počtu úloh. Pred začatím montáže je potrebné skontrolovať, či vyrobený plošný spoj plne zodpovedá navrhnutému dizajnu.

Kontrolou fyzických spojení pomocou multimetra je možné eliminovať nežiaduce skraty a odhaliť ďalšie chyby vzniknuté počas návrhu.



Obrázok 18: Skúšobná optická závora.

4.3.1 Spájkovanie napájacích obvodov

S touto časťou montáže nebol žiadny problém. Na výstupe 5-voltového napájacieho obvodu bolo nameraných 5,1 V, na výstupe 3,3-voltového napájacieho obvodu bolo 3,4 V a na výstupe 12-voltového napájacieho obvodu bolo nameraných 12,1 V .

4.3.2 Montáž zosilňovacieho obvodu

Montáž bola zrealizovaná na základe schémy zapojenia. Výstup zosilňovača bol testovaný pripojením reproduktora bez vstupu. Z reproduktora bolo počuť hlučné rušenie, ktorého hlasitosť sa menila podľa toho, ako ďaleko bola ruka od potenciometra. Takéto správanie je znakom nekvalitného uzemnenia. U iných zdrojov napájania, ako sú batérie alebo iné napájacie zdroje, sa tento problém nevyskytol. Nakoniec bol zvolený typ spínaného zdroja napätia s kvalitnejšími filtračnými obvodmi.

Po zhotovení napájacích obvodov bolo potrebné už len naspájkovať ostatné pasívne súčiastky a konektory a osadiť plošný spoj do konštrukcie.

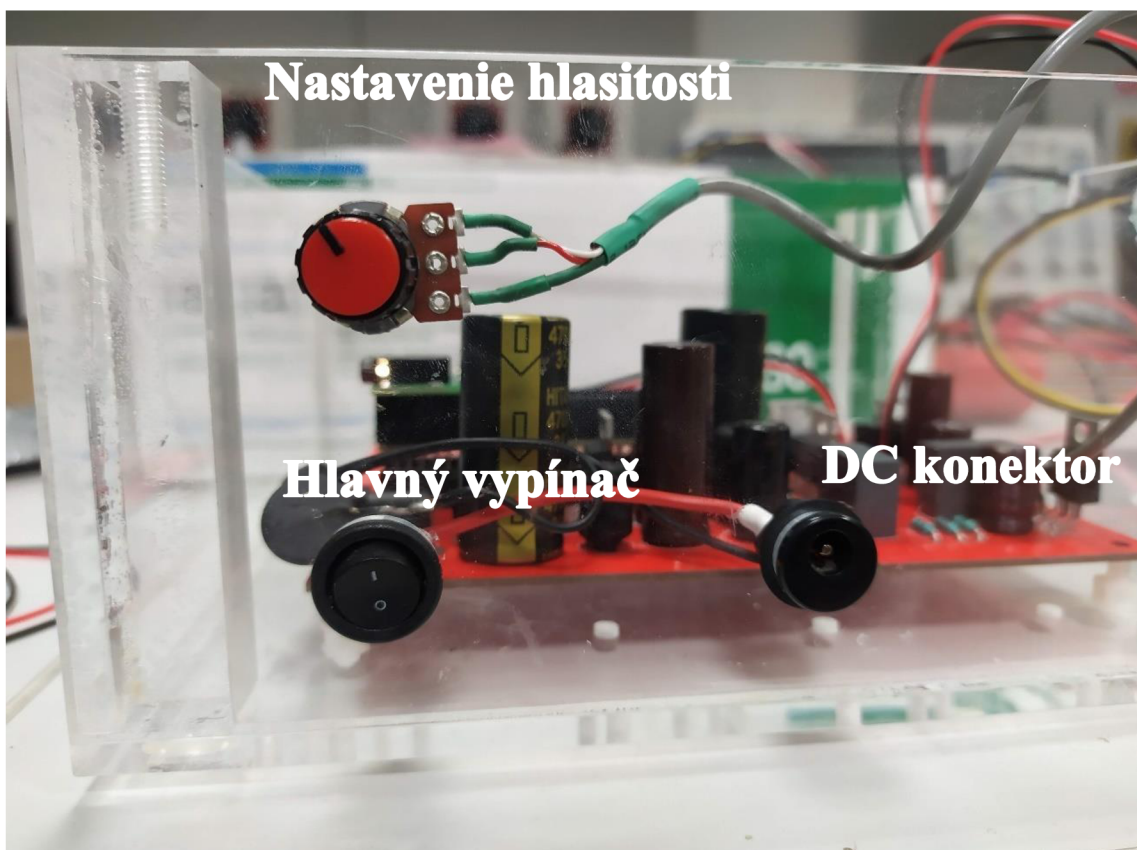
Je potrebné popísať základné informácie o tomto zariadení, aby ho mohol obsluhovať aj laik.

5. NÁVOD NA POUŽITIE

Táto časť práce popisuje krok za krokom správny postup uvedenia harfy do chodu a jej obsluhy. Následne popisuje, ako má používateľ postupovať v prípade poruchy.

5.1 Popis obsluhy

Pred použitím je vždy potrebné skontrolovať hladinu destilovanej vody. Musí byť medzi ryskami MIN a MAX. Cez otvor v hornej časti nádoby je možné destilovanú vodu doplniť. Pred zapnutím musí používateľ najprv skontrolovať pripojenie napájacieho zdroja k DC konektoru. Zdroj musí mať výstupné napätie 24 V a jeho výkon by mal byť ideálne aspoň 90 W. S pripojeným napájaním je možné zariadenie zapnúť hlavným vypínačom. Prerušenie laserových lúčov počas kalibrácie môže spôsobiť zlé nastavenie hornej a dolnej hranice detekcie prerušenia lúča čo môže viesť k nesprávnej detekcii prerušenia lúčov počas hry. Na konci kalibrácie zaznejú všetky tóny a od tohto momentu je možné na harfe hrať.



Obrázok 19: Hlavný vypínač, napájací konektor a ovládanie hlasitosti.

5.2 Typy porúch a ich odstránenie

Poruchy nesmie používateľ odstraňovať a je potrebné ich vždy nahlásiť! Požívateľ nesmie za žiadnych okolností demontovať kryt zariadenia! Poruchy súvisiace s elektronikou harfy nie sú opraviteľné používateľom a je treba zavolať osobu poverenú údržbou harfy.

5.2.1 Po zapnutí je počuť hlučné rušenie z reproduktora

Rušenie môže byť spôsobené napájacím zdrojom, ktorý nie je uzemnený a nemá adekvátne riešenie na odstránenie rušenia na výstupe. V takom prípade je potrebné zvoliť iný zdroj napájania. Odporúča sa použiť spínaný zdroj so zabudovanými filtrami na výstupe.

5.2.2 Po zapnutí harfa nereaguje

Z reproduktora je pravidelne počuť kliknutie. Toto je indikácia nedostatočného výkonu zdroja, ktorý sa pravidelne rešartuje. V tomto prípade je jediným riešením voľba výkonnejšieho zdroja.

5.2.3 Elektrická porucha

Toto zariadenie sa nesmie používať v prípade poruchy elektrického obvodu. Sem patria chyby súvisiace s lasermi, plošným spojom, napájaním a funkčné poruchy laserovej harfy. V tomto prípade je potrebné poruchu ihneď nahlásiť. Zariadenie je nutné odpojiť od napájania!

6. ZÁVER

Bola vykonaná rešerš histórie digitálnych hudobných nástrojov od počiatkov elektronickej hudby. Po analýze výhod a nevýhod jednotlivých typov konštrukcií bolo rozhodnuté, že pre túto úlohu je najvhodnejšia konštrukcia so stacionárnymi lasermi. Bolo rozhodnuté použiť mono reproduktor ako štandardný výstup. Z hľadiska napájania sú všetky obvody s meničmi napätia navrhnuté tak, aby mali maximálne možné prúdové zaťaženia väčšie ako je maximálny prúdový odber prúdu v danom obvode. Boli vybrané fototranzistory s rôznymi vlastnosťami. Zistilo sa, že pre fototranzistor SFH 300 by bola citlivosť približne 65 % pri červenom svetle s vlnovou dĺžkou 650 nm a lineárne by klesala pri okolitom svetle s kratšou vlnovou dĺžkou. Fototranzistor LTR-323DB bol klasifikovaný ako čisto experimentálny. Ukázalo sa, že tento typ nedokáže snímať červené svetlo. Výhodou použitia snímača QSD123 je, že jeho maximálny uhol citlivosti je len $\pm 10^\circ$. Fototranzistor typu PT-A1-AC-5-HE-850 je citlivý hlavne na svetlá s vlnovými dĺžkami dlhšími ako 550 nm. Nakoniec bol zvolený fototranzistor typu TEPT4400. Na odfiltrovanie nižších frekvencií signálu snímačov bol navrhnutý derivačný článok. Zo všetkých metód generovania zvuku bola zvolená metóda wavetable synthesis. Bol navrhnutý zosilňovací obvod s čipom: NTE1380. Bol napísaný firmware, ktorý ovláda jednotlivé elektronické prvky. Potom bola implementovaná nová elektronika do stávajúcej harfy a bola otestovaná. Bola napísaná aj návod na použitie, ktorá pomáha používateľom lepšie ovládať tento hudobný nástroj.

LITERATÚRA

- [1] GLINSKY, Albert (2000). Theremin: Ether Music and Espionage. Urbana, Illinois: University of Illinois Press. p. 26. ISBN 978-0-252-02582-2.
- [2] PINCH, Trevor; TROCCO, Frank (2004). Analog Days: The Invention and Impact of the Moog Synthesizer. Harvard University Press. ISBN 978-0-674-01617-0.
- [3] HUBER, David Miles (1991). The MIDI Manual. Carmel, Indiana: SAMS. ISBN 978-0-672-22757-8.
- [4] Shepard, Brian K. (2013). Refining Sound: A Practical Guide to Synthesis and Synthesizers. Oxford University Press. ISBN 9780199376681
- [5] LM2575T-ADJ/NOPB Texas Instruments
- [6] SGTL5000, Low Power Stereo Codec with Headphone Amp: Data Sheet
- [7] NTE1380 NTE ELECTRONICS: Data Sheet. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/c4caa07d1f9a0c12842e14da1275e1d2/nte1380.pdf>
- [8] ETechnoG, Photoresistor VS Photodiode VS Phototransistor. Dostupné z: <https://www.etechnog.com/2021/06/photoresistor-vs-photodiode-vs-phototransistor.html>
- [9] SFH 300 OSRAM: Data Sheet. Dostupné z: https://www.osram.com/media/resource/hires/osram-dam-5452321/SFH+300_EN.pdf
- [10] LTR 323DB LITEON: Data Sheet. Dostupné z: https://cdn.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/408498_1813298.pdf
- [11] QSD123 – ONSEMI: Data Sheet. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/qsdl23-d.pdf>
- [12] PT-A1-AC-5-HE-850 TOKEN: Data Sheet. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/aa1e3497603fa5df033cf88bf1ac6cf2/PT-A1-AC-3-PE-850.pdf>
- [13] TEPT4400 VISHAY: Data Sheet. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/0f57b9f303354b036fcd4c24e8ad7c89/tept4400.pdf>
- [14] TDA2030: Data Sheet. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000128.pdf>
- [15] PJRC Teensy 4.1: Data Sheet. Dostupné z: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Adafruit%20PDFs/4622_Web.pdf
- [16] I2C-bus specification and user manual Rev. 7.0- UM10204. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [17] Teensy Audio Library. Dostupné z: https://www.pjrc.com/teensy/td_libs_Audio.html

- [18] Teensy Wavetable Synthesis. Dostupné z:
<https://teensyaudio.github.io/Wavetable-Synthesis/html/index.html>
- [19] How to Make Fog Juice: An Easy Two-Ingredient Option. Dostupné z:
<https://stagebibles.com/how-to-make-fog-juice/>

Zoznam symbolov a skratiek

Skratky:

MIDI	Musical Instrument Digital Interface
RGB	Red Green Blue
RCA	Radio Corporation of America
XLR	External Line Return
I2C	Inter-Integrated Circuit
I2S	Inter-IC Sound
DC	Direct Current
DC/DC	Direct Current to Direct Current
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
TTL	Transistor-Transistor Logic
VCO	Voltage Controlled Oscillator
DCO	Digital Controlled Oscillator
ROM	Read-Only Memory
SD	Secure Digital
USB	Universal Serial Bus
FPU	Floating-Point Unit

Symboly:

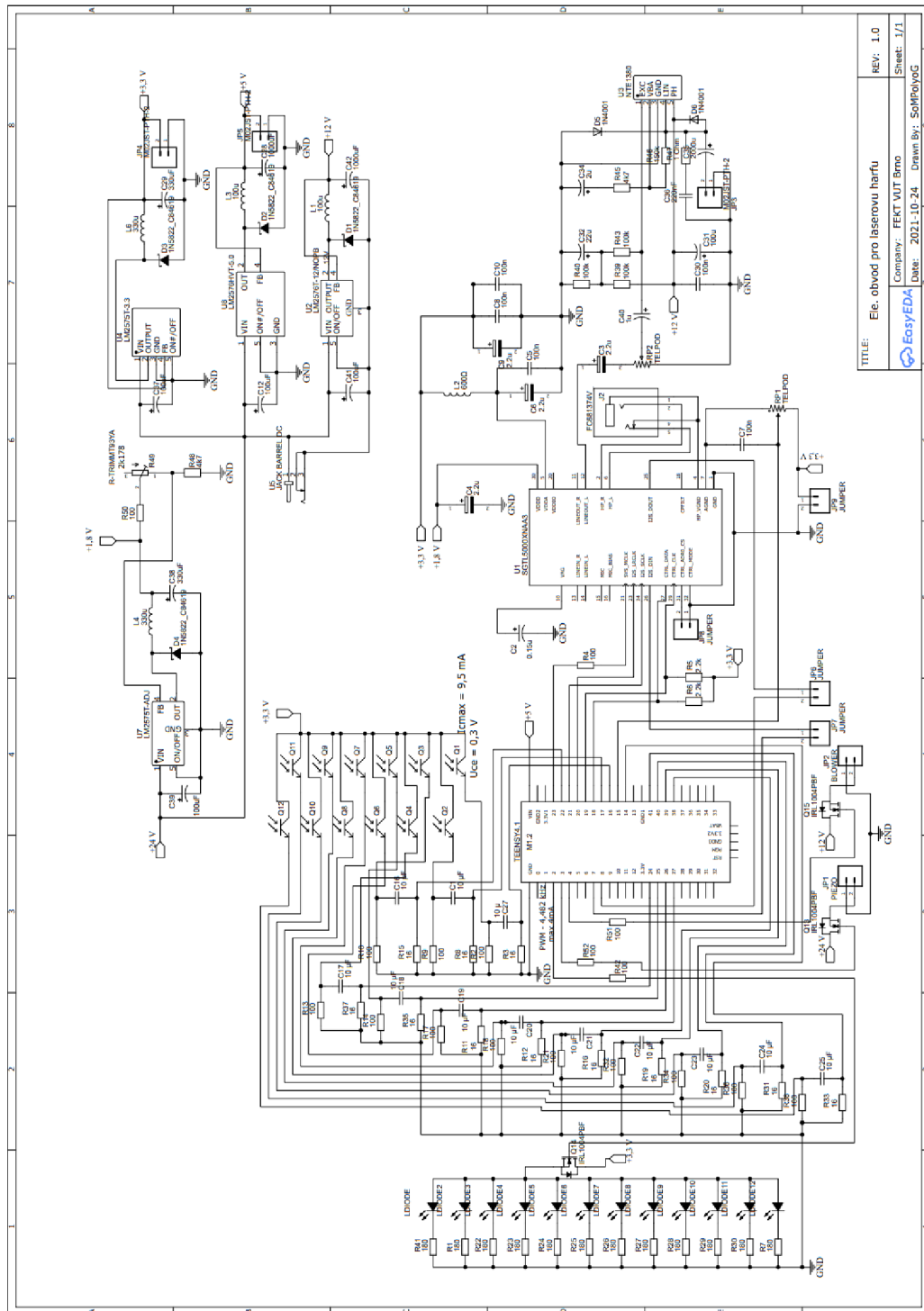
C_{OUT}	kapacita kondenzátora na výstupe	(μF)
$V_{IN(Max)}$	maximálne vstupné napätie obvodu	(V)
U_{vst}	vstupné napätie	(V)
V_{OUT}	nastavené výstupné napätie obvodu	(V)
$U_{výst}$	výstupné napätie	(V)
$L(\mu\text{H})$	indukčnosť cievky na výstupe obvodu	(μH)
V_{REF}	referenčné napätie	(V)
$R1$	zvolený odpor pre napäťový delič	(Ω)
$R2$	nastaviteľný odpor pre napäťový delič	(Ω)
R	odpor, rezistor	(Ω)
R_{ds}	odpor tranzistora medzi kolektorom a emitorom	(Ω)
R_G	odpor na Gate	(Ω)
R_d	sériovo zapojený rezistor	(Ω)
X_C	reaktancia cievky	(Ω)
C	kapacita kondenzátora	(μF)
f_m	medzná frekvencia	(Hz)

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A -	SCHÉMY ZAPOJENÍ	46
PRÍLOHA B -	FINÁLNA VERZIA DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV	48
PRÍLOHA C -	BLOKOVÝ DIAGRAM PROGRAMU	50

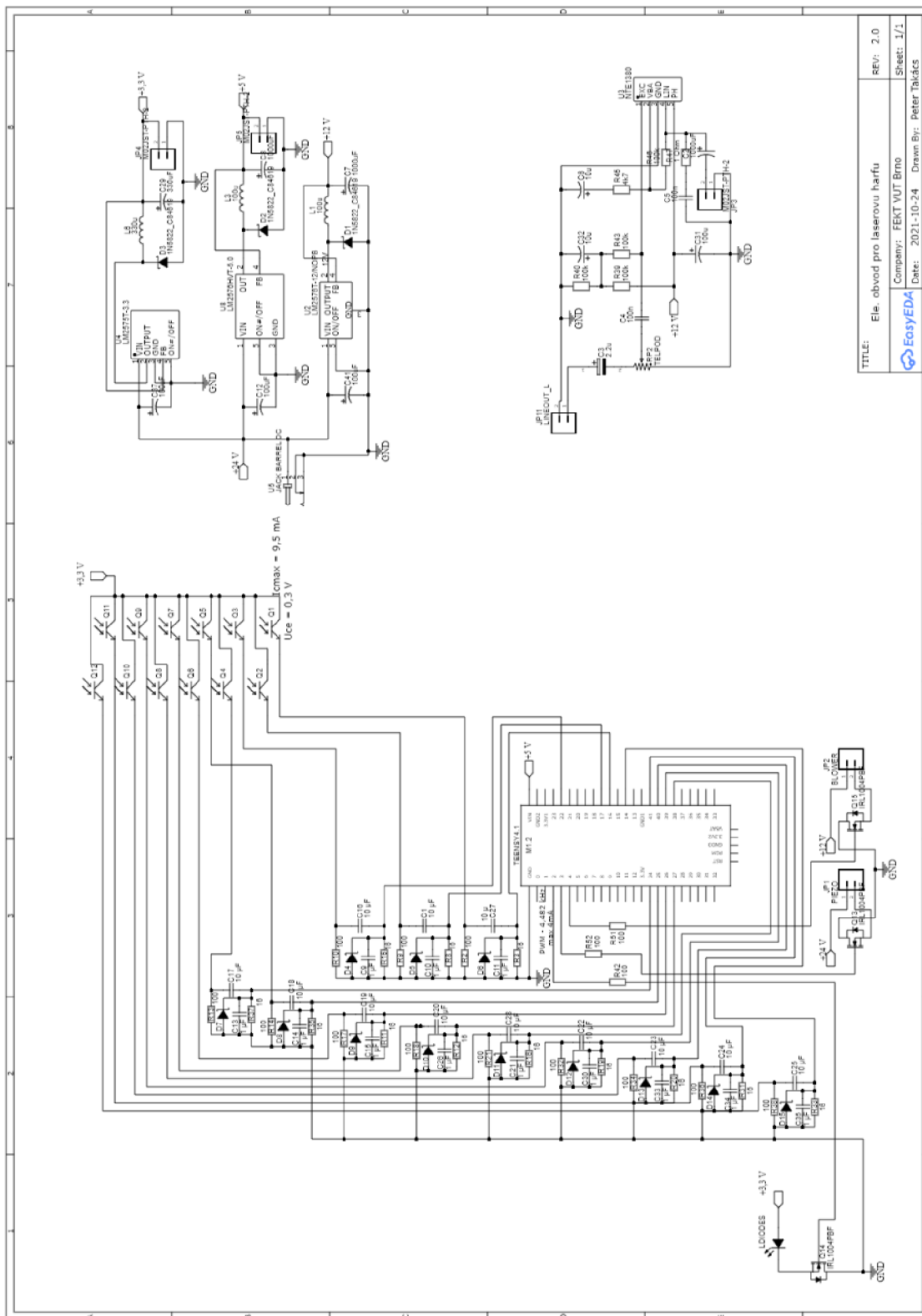
Príloha A - Schémy zapojení

A.1 Schéma zapojení elektronického obvodu. Varianta obsahující čip SGTL5000



TITLE: Ele. obvod pro laserovu harfu	REV: 1.0
Company: FEKT VUT Brno	Sheet: 1/1
EasyEDA	Drawn By: SoMPolyc
Date: 2021-10-24	

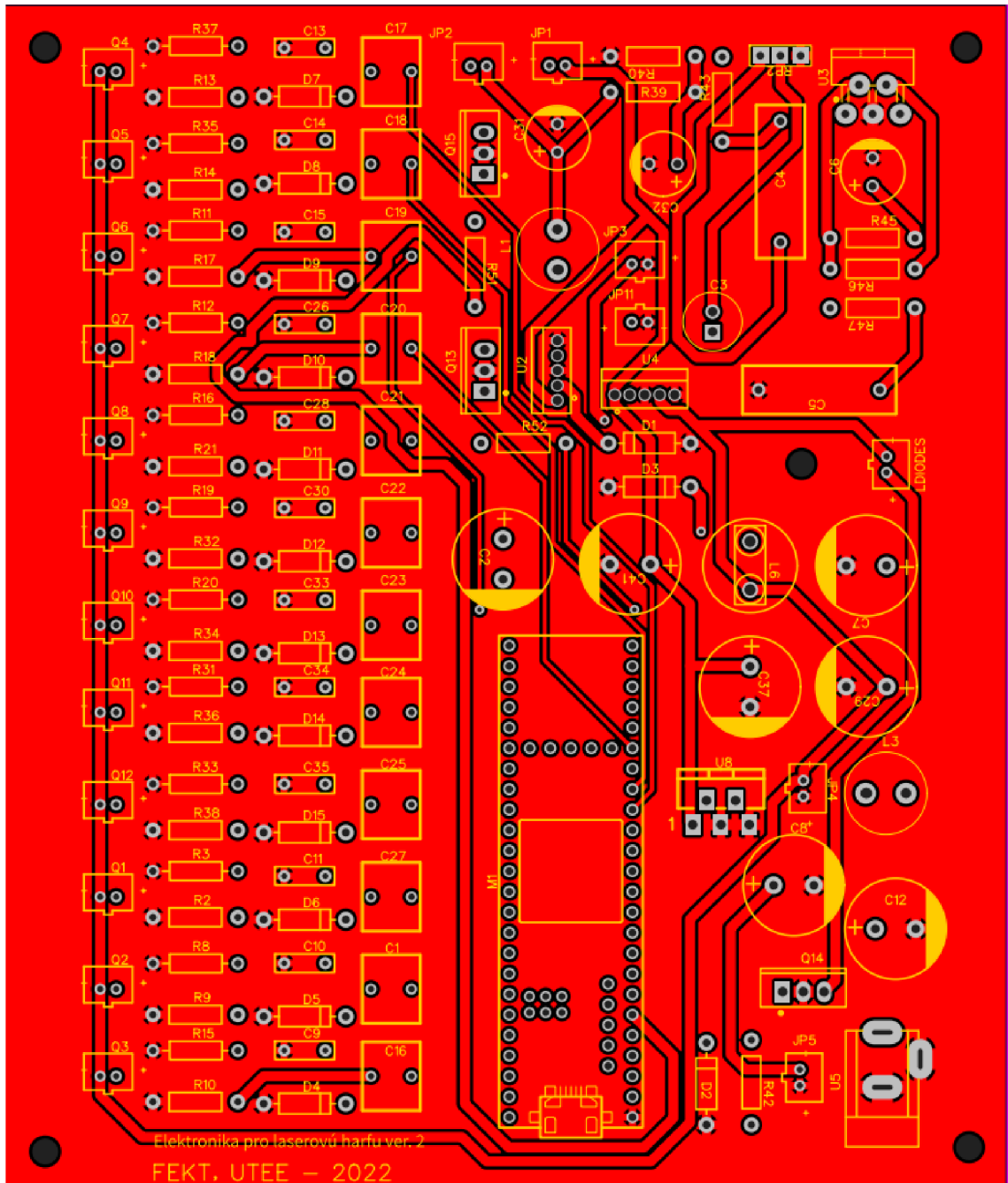
A.2 Finálna verzia schémy zapojenia elektronického obvodu. Varianta s Audio Boardom



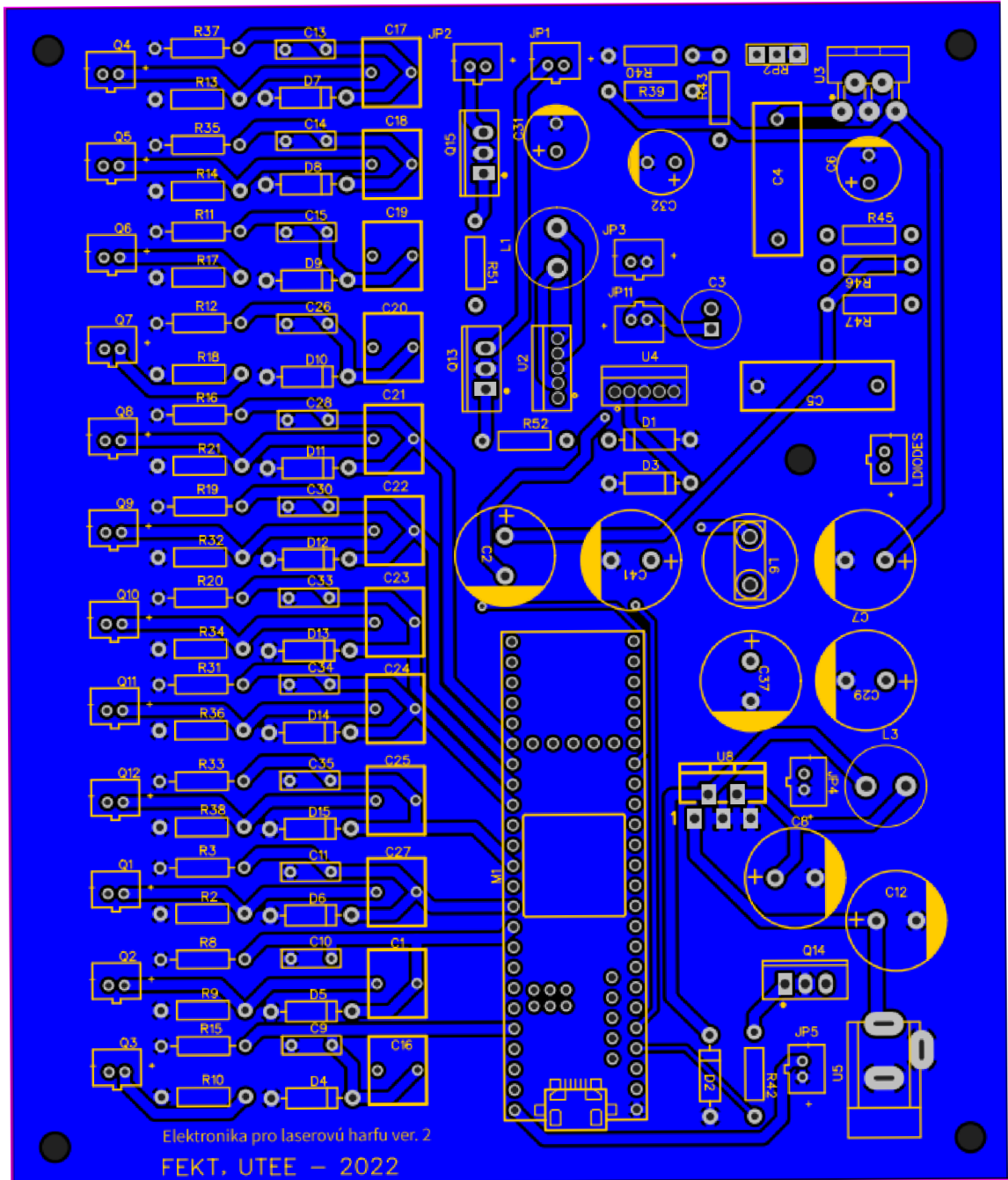
TITLE:	Ele. obvod pro laserovu harfu	REV: 2.0
Company:	FEKT VUT Brno	Sheet: 1/1
Date:	2021-10-24	Drawn By: Peter Takáts

Príloha B - Finálna verzia dosky plošných spojov

B.1 Pohľad zhora na dosku plošných spojov



B.2 Pohľad zdola na dosku plošných spojov



Príloha C - Blokový diagram programu

C.1 Blokový diagram firmwaru mikrokontroléra

