

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor: 10. Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

## Laserový projektor

Šimon Hrouda

Brno 2024

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

## LASEROVÝ PROJEKTOR

### LASER PROJECTOR

AUTOR Šimon Hrouda

ŠKOLA Gymnázium Brno-Řečkovice, p. o.,  
Terezy Novákové 2, 621 00 Brno

KRAJ Jihomoravský

INTERNÍ KONZULTANT Mgr. Kateřina Vídenková

EXTERNÍ KONZULTANT Tomáš Rohlínek

OBOR 10. Elektrotechnika, elektronika  
a telekomunikace

Brno 2024

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou práci na téma *Laserový projektor* jsem vypracoval/a samostatně pod vedením Tomáše Rohlínka a Mgr. Kateřiny Vídenkové a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce SOČ jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (autorský zákon) v platném změní.

V Brně dne: \_\_\_\_\_

Šimon Hrouda

## **Poděkování**

Děkuji svému externímu konzultantovi Tomáši Rohlíkovi a své interní konzultantce Mgr. Kateřině Vídenkové za obětavou pomoc, podnětné připomínky a nekonečnou trpělivost, kterou mi během práce poskytovali.

Tato práce byla provedena za finanční podpory Jihomoravského kraje.

**jihomoravský kraj**



**Anotace**

**Klíčová slova**

**Annotation**

**Keywords**

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>10</b>
Cíle . . . . .	10
<b>1 Laser scanning [6]</b>	<b>11</b>
1.1 Akusticko-optické skenery . . . . .	11
1.2 Hranolové skenery . . . . .	12
1.3 Galvanometrové skenery . . . . .	12
1.3.1 Galvanometr . . . . .	13
1.3.2 Konstrukce galvanometrových skenerů . . . . .	14
<b>2 Laserová projekce [11]</b>	<b>17</b>
2.1 Využití laserové projekce v průhledových displejích (HUD) [1][12] .	17
2.2 Princip laserové projekce . . . . .	18
2.3 ILDA . . . . .	19
<b>3 Laser safety</b>	<b>20</b>
<b>4 Použité technologie</b>	<b>23</b>
<b>5 hardware</b>	<b>24</b>
5.1 Řídící jednotka — Raspberry Pi . . . . .	24
5.2 Set galvanometrů se zrcátky . . . . .	25
5.2.1 Výběr skeneru . . . . .	25
5.2.2 Zapojení galvanometrového setu . . . . .	26

5.2.3	bipolární diferenciální analogový signál [15] . . . . .	27
5.2.4	Zahřívání čipů řídící desky galvanometrů . . . . .	27
5.3	RGB laserový modul . . . . .	27
5.3.1	Dichroická zrcadla [16] . . . . .	28
5.3.2	Zapojení laserového modulu . . . . .	29
5.3.3	Tvorba barev s laserovým modulem . . . . .	29
5.4	Displej z tekutých krystalů (LCD) . . . . .	30
5.5	Rotační enkodér [21][22] . . . . .	31
5.5.1	Čtení pozice z rotačního enkodéru . . . . .	33
5.6	HAT deska plošných spojů . . . . .	34
5.6.1	Zdroj -15 V [23] . . . . .	34
5.6.2	Generátor analogového signálu . . . . .	36
5.6.3	Voltmetr baterií . . . . .	37
5.7	Napájení . . . . .	38
5.7.1	Akumulátory . . . . .	38
5.7.2	BMS modul . . . . .	38
5.7.3	relé modul . . . . .	40
5.7.4	nabíjecí obvod . . . . .	40
5.7.5	Vypínač . . . . .	42
5.7.6	Napěťové větve . . . . .	42
5.8	Pouzdro . . . . .	43
5.8.1	Priority designu . . . . .	43
5.8.2	Konstrukce . . . . .	44
<b>6</b>	<b>software</b>	<b>48</b>
6.1	komunikace mezi programy . . . . .	48
6.2	Lasershows . . . . .	49
6.2.1	Úvod . . . . .	49
6.2.2	Inspirace open-source . . . . .	50
6.2.3	Funkce programu . . . . .	50
6.2.4	Využité knihovny . . . . .	51
6.2.5	Chování programu . . . . .	54

6.3	wifi_manager . . . . .	55
6.3.1	Funkce programu . . . . .	55
6.3.2	Využité knihovny . . . . .	55
6.3.3	Chování programu . . . . .	55
6.4	UI . . . . .	55
6.5	web_ui . . . . .	56
6.6	discord bot . . . . .	58
6.7	install.sh . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Diskuze</b>	<b>59</b>
7.1	ruzne technologie . . . . .	59
7.2	další zpracování tématu . . . . .	59
<b>Závěr</b>		<b>62</b>
	Literatura . . . . .	67
	Seznam obrázků . . . . .	69
	Seznam tabulek . . . . .	70
	Seznam rovnic . . . . .	71
	Přílohy . . . . .	72

definice pojmu a zkratku

SPI	Serial Peripheral Interface	sériové periferní rozhraní
DPS		deska plošných spojů

# Úvod

Laser scanning, technologie rychle se pohybujícího laserového paprsku, je využívána v mnoha oblastech od laserového promítání, efektů na diskotékách a průhledových displejů (Průhledový displej – anglicky Head-Up Display (HUD)) v letadlech, autech či brýlích pro rozšířenou realitu [1] přes čtení čárových kódů [2] a 3d tisk [3] po skenování 3D modelů [4] i Zemského povrchu [5].

Bohužel ale neexistují žádné uživatelsky přívětivé open-source platformy, kde by se s touto technologií mohli seznámit zájemci o její rozvíjení.

## Cíle

V této práci jsem se proto rozhodl pro tuto technologii vytvořit vlastní laserový projektor a naprogramovat pro něj jednoduché uživatelské prostředí. Toto uživatelské prostředí by mělo sloužit jako začáteční bod, který zaujmeme mladé zájemce a umožní jim si technologii vyzkoušet. V případě, že technologie zaujme, mělo by pro zájemce být jednoduché program pozměnit nebo si jinak přizpůsobit chování projektoru.

# Kapitola 1

## Laser scanning [6]

Jako Laser scanning se označuje technologie využívající rychle se pohybující laserový paprsek. Mezi tradiční techniky pohybu paprsku spadají akusticko-optické skenery, hranolové skenery a galvanometrové skenery [7].

### 1.1 Akusticko-optické skenery

Akusticko-optické (AO) skenery se využívají, se nejlépe hodí do systémů s rozlišením<sup>1</sup> přibližně 1000 bodů. Další charakteristikou AO skenerů je možnost přenést paprsek na libovolný bod v časovém úseku řádově 10 μs.

Existuje mnoho systémů využívajících AO skenery, možná nejzajímavější jsou laserové tiskárny, které naplno využívají schopnosti AO skenerů.

Princip AO spočívá pouze ve změně indexu lomu materiálu optiky, když ním prochází akustická vlna. Tato změna indexu lomu způsobí změnu směru paprsku.

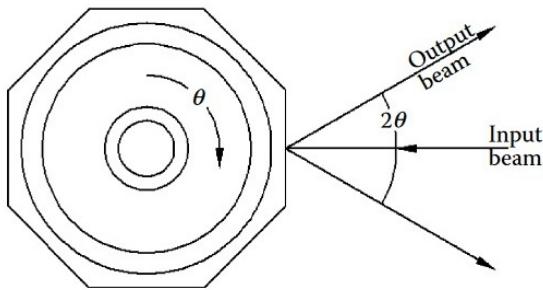
---

<sup>1</sup>Rozlišení laserových skenerů je počet všech různých pozic, do kterých je skener schopen nasměrovat paprsek.

## 1.2 Hranolové skenery

Hranolové skenery se vyznačují rotujícím hranolem se zrcadlivými stranami (dále „zrcátky“). Při rotaci hranolu se mění úhel dopadu laserového paprsku na zrcátko, a díky tomu se mění směr odraženého paprsku, viz. obrázek 1.1.

Note:  
adiky  
carka?



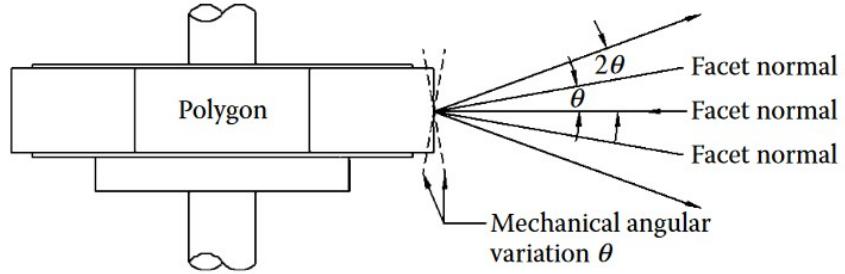
Obrázek 1.1: mechanika polygonových skenerů; převzato z [6].

S jedním hranolem by hranolové skenery byly schopny směřovat paprsek pouze v jedné rovině - při projekci by bylo možné vykreslit maximálně čáru. Tuto limitaci lze kompenzovat přidáním malého rozdílu ve směrování každé strany hranolu, viz. obrázek 1.2. S touto úpravou každá strana hranolu vykreslí jednu, svoji, přímku lehce posunutou vůči přímkám ostatních stran. Hranol s n-úhelníkovou podstavou je schopen vykreslit n přímek. Další možností je kombinovat původní pravidelný hranol s galvanometrem, kdy galvanometr nastaví jednu souřadnici paprsku a hranol na této souřadnici vykreslí přímku.

Tento typ skeneru se využívá hlavně pro senzory skenující na přímce (např. skenery čárových kódů [2]), nebo při rastrovém procházení plochy (například 3D skenování, nebo promítání ploch, viz. Obrázek 1.3).

## 1.3 Galvanometrové skenery

V galvanometrových skenerech paprsek odráží zrcátka/o připevněná/o na páru galvanometrů.



Obrázek 1.2: úhlová rozdílnost zrcátek polygonového skeneru a paprsky od nich odražené; převzato z [6].



Obrázek 1.3: příklad projekce laserového projektoru s polygonovým skenerem; převzato z [8]

### 1.3.1 Galvanometr

Slovem galvanometr se označuje přístroj úřčený k detekci nebo měření velice malého elektrického proudu [9]. Galvanometry při měření využívají interakce magnetického pole trvalého magnetu a cívky protéké proudem. Tato interakce vychýlí ručičku ukazující na stupnici, nebo zrcátko odrážející paprsek, který dopadá na stupnici. [10]

Galvanometry se dají rozdělit na galvanometry bez zpětné vazby (open-loop) a se zpětnou vazbou. K těm bývají připojeny ovládací obvody, které z galvanometrů získávají informace o jejich pohybu a podle nich regulují signál posílaný do galvanometrů. [10]

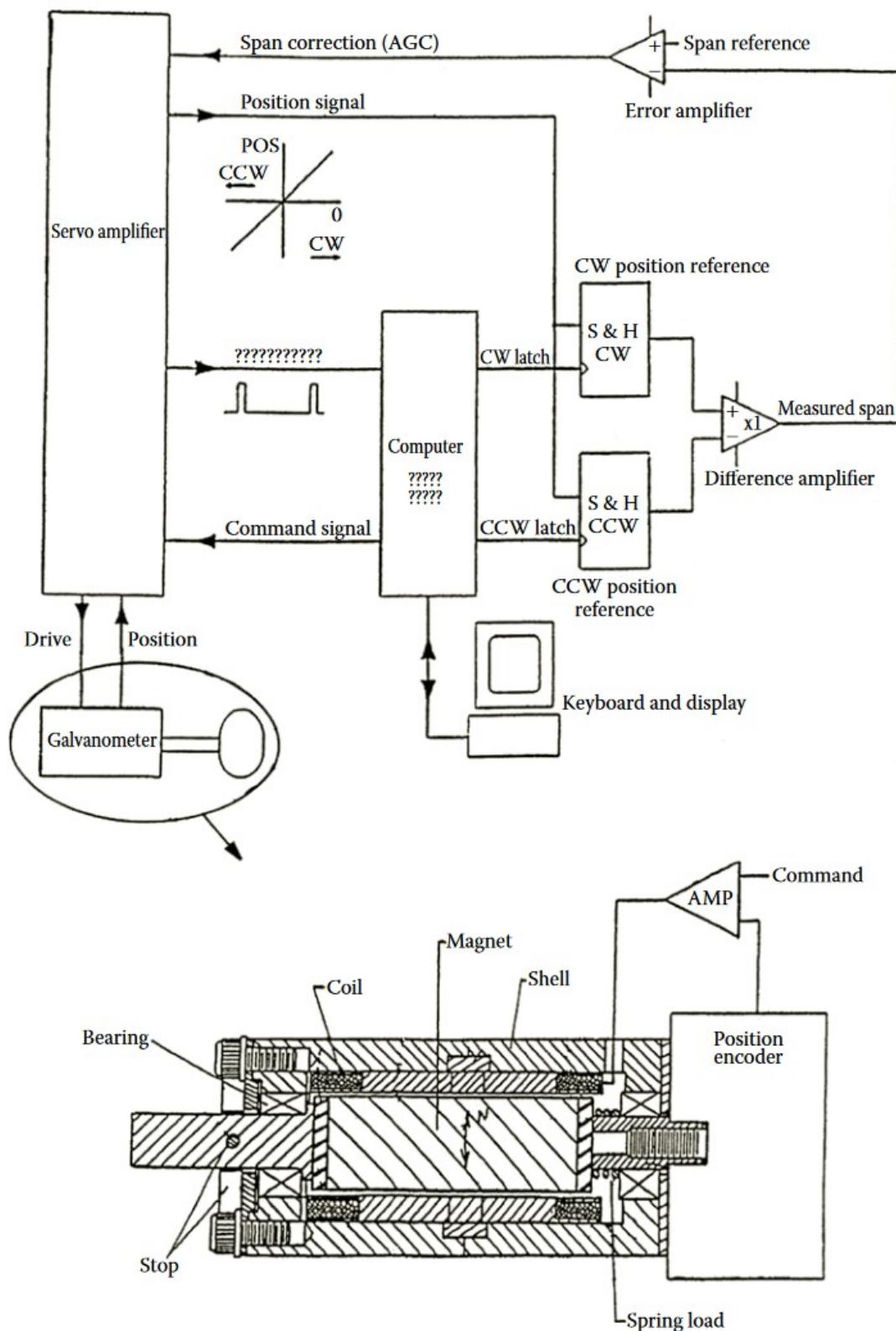
Dále se dělí dle pohyblivé součástky. V galvanometru je buď trvalý magnet pevně ukotven a cívka pohyblivá (moving coil), nebo naopak (moving magnet).

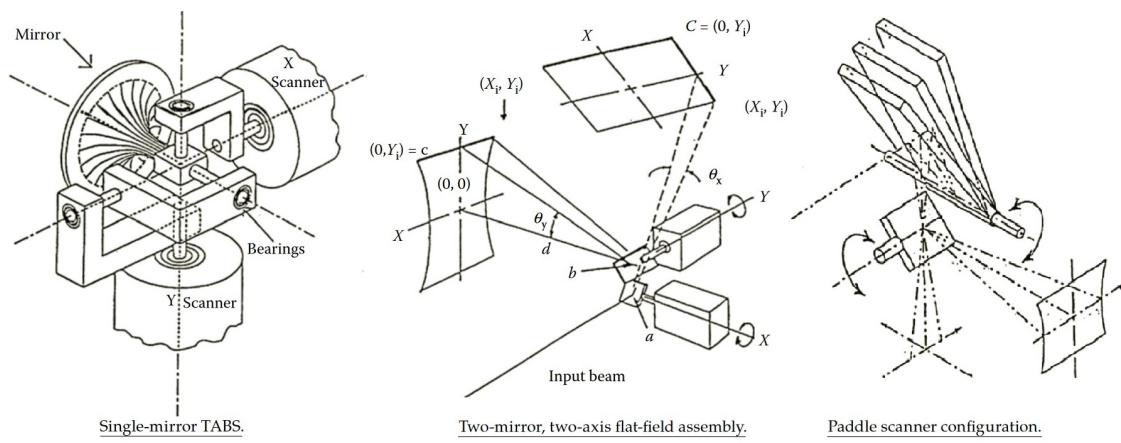
Dnes se v kontextu laserových skenerů prakticky vždy používají galvanometry s pohyblivým magnetem a se zpětnou vazbou. Ta je zajištěna čtením z variabilního kondenzátoru umístěného v galvanometru.

### **1.3.2 Konstrukce galvanometrových skenerů**

Jeden galvanometrový skener vždy ovládá jednu osu pohybu paprsku, buď X nebo Y.

Narozdíl od hranolových skenerů je s galvanometrovým skenerem možné zastavit obě osy pohybu - vykreslovat na sebe kolmé čáry.





Obrázek 1.5: různé konstrukce galvanometrových skenerů; převzato z [6].

# Kapitola 2

## Laserová projekce [11]

Laserová projekce spadá mezi laser scanning technologie. Často je využívána v zábavním průmyslu, hlavně k vytváření laser shows a vektorových projekcí. U laser shows diváci sledují vzory, které vytváří samotný paprsek ve vzduchu. U projekcí diváci sledují obrazce vykreslené paprskem dopadajícím na promítací plátno.

Tyto efekty nejsou populární pouze v klubech, nýbrž i na koncertech nebo živých představeních. Je-li laser dostatečně silný, je možné promítat na obrovské plochy, jako například hráze, vodní plochy, nebo dokonce hory.

### 2.1 Využití laserové projekce v průhledových displejích (HUD) [1][12]

Laserová projekce se také využívá v průhledových displejích, jak bylo zmíněno v úvodu. V tomto odvětví zatím převládají jiné technologie. Technologie průhledových displejů se dají rozdělit následovně:

- Technologie vyzařujících displejů, např. cathode ray tube (CRT), organic light-emitting diode (OLED) nebo vacuum fluorescent display (VFD)
- Technologie podsvícených displejů, např. liquid crystal display (LCD)

- Technologie laserových displejů, např. liquid crystal on silicon (LCoS) nebo laser scanning displeje založené na pohybu mikrozrcadel.

V prvních průhledových displejích bylo využito CRT. Ale kvůli své neskladnosti, vysoké spotřebě elektřiny a škodlivé radiaci, byla nahrazena technologií LCD. Dnes se v průhledových displejích letadel využívají LCD. V automobilech se využívají LCD a VFD. Bohužel, VFD jsou limitovány množstvím informací, které mohou zobrazit. LCD průhledové displeje jsou limitovány svým maximálním jasem. S novou technologií OLED sice je možné vytvořit tenký a průhledný displej dosahující vyššího jasu, než LCD HUD. I tento displej bohužel oproti vnějšímu světu má stále relativně nízký jas, také má vysokou cenu a krátkou životnost. Oproti vyzařujícím a podsvíceným displejům jsou laserové displeje ve většině ohledů lepší.

Note:  
nadřa-  
zené?  
Note:  
pics  
from  
[12]

## 2.2 Princip laserové projekce

Když se laserový paprsek pohybuje dostatečně rychle, lidské oko ho vnímá jako spojitou linku světla - tomuto jevu se říká persistance of vision nebo persistance of impression [13]. Čím rychleji se paprsek pohybuje, tím méně intenzivní připadá oku zmíněná linka. Bod je možné vykreslit, jestliže paprsek zůstane na jednom místě bez pohybu po úrčitou dobu.

Vykreslení čáry je základní a nejjednoduší operací, jakou laserový projektor může vykonat. Například k vykreslení Úsečky z bodu A do bodu B projektor nasměruje laserový paprsek na bod A, zapne laser a pohybuje paprskem k bodu B.

K vykreslení složitějších obrázků jsou potřeba tzv. blank lines, kdy projektor otáčí zrcátka stejně jako kdyby vykresloval přímku, ale laser nesvítí. Blank lines spojují každé dvě vykreslené linky, které na sebe přímo nenavazují.

Nestihne-li projektor vykreslovat obraz dostatečně rychle, výsledná projekce nebude stabilní. Lidské oko vždy uvidí pouze části obrazu v časové návaznosti. Tомуž jevu se říká „flickering“.

## 2.3 ILDA

Note:  
citovat z  
<https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/a55c1118-9166-4449-806a-c2a73bfeff66/content>

# Kapitola 3

## Laser safety

3.3 Laserová bezpečnost [7,8] Při práci s lasery vzniká možnost ohrožení zdraví laserovým zářením. Podle nařízení vlády č. 1/2008 Sb. O ochraně zdraví před neionizujícím zářením, ve znění pozdějších předpisů se optickým zářením se pro účely tohoto nařízení rozumí záření z umělých zdrojů odpovídající vlnovým délkám od 100 nm do 1 mm, jehož spektrum se dělí na:

- ultrafialové (100 nm až 400 nm)
- viditelné záření (380 nm až 780 nm)
- infračervené (780 nm až 1 mm)

Laserem se rozumí jakékoli zařízení, které je určeno k vytváření nebo zesilování elektromagnetického záření primárně procesem kontrolované stimulované emise. Laserová záření jsou elektromagnetické vlny stejně fyzikální podstaty jako vlny vznikající v přírodě, ovšem jejich intenzita a rovnoběžnost svazku je podstatně vyšší. V případě vystavení člověka působení laserového záření vzniká nebezpečí újmy na zdraví, postihující nejvíce oči a kůži. Ve většině případů se nedá před poškozením oka ochránit odkloněním hlavy nebo zavřením očních víček, jelikož taková reakce je příliš pomalá. Pro ochranu zdraví jsou tudíž 19 stanovena pravidla, která zaručuje, že k poškození zdraví nedojde. Maximální přípustná dávka ozáření (MPE) je hodnota laserového záření, kdy při vystavení lidské pokožky nebo oka nedojde k okamžitému nebo pozdějšímu poranění. Hodnota MPE je závislá na vlnové délce, době ozáření, typu ozařované tkáně a při ozáření oka na velikosti obrazu na sítnici. V Tabulka 1 jsou upraveny nejvyšší přípustné hodnoty expozice pro přímý pohled

do laserového svazku nebo přímý pohled do zrcadlově odraženého svazku. Tabulka 1 Nejvyšší přípustná hodnota expozice při přímém působení laserového záření na rohovku oka (přímý pohled do svazku) [7] V Tabulka 2 jsou upraveny nejvyšší přípustné hodnoty ozáření rohovky oka při sledování plošného laserového zdroje nebo laserového svazku po difúzním odrazu. 20 Tabulka 2 Nejvyšší přípustné hodnoty ozáření rohovky oka při pozorování plošného laserového zdroje nebo laserového svazku po difúzním odrazu [7] V Tabulka 3 jsou zobrazeny hodnoty nejvyššího přípustného ozáření při expozici laserového záření na kůži. Tabulka 3 Nejvyšší přípustné ozáření při expozici laserového záření na kůži [7] Tabulka 4 Hodnoty konstant pro tabulky výše [7] 21 Korekční faktory použité v tabulkách 1 – 3 jsou vyjádřeny v Tabulka 4. 3.4 Třídy laserů • 1 – zařízení třídy 1 jsou bezpečná včetně dlouhodobého pozorování světelného svazku nebo jeho sledování pomocí čoček či dalekohledů. To této kategorie spadají i vysokovýkonné lasery, které jsou zcela zakrytovány a neumožní průnik paprsku do okolí, při případném otevření se celé zařízení vypne. • 1M – zařízení spadající do třídy 1M jsou bezpečná i při dlouhodobém sledování světelného svazku, nejsou ovšem bezpečná při sledování pomocí optických pomůcek (čočky, dalekohledy). • 2 – Jedná se lasery v rozsahu vlnových délek 400 – 700 nm. Přímý dlouhodobý pohled do světelného svazku může způsobit poškození zraku. Reakční doba lidí při oslnění (zavření víček, odvrácení hlavy) se pohybuje okolo 0,25s. Pokud člověk při oslnění do této doby zareaguje, neměl by mít trvale poškozený zrak, může ovšem dojít ke krátkodobým poruchám vidění, které v pracovních provozech významně ovlivňují bezpečnost práce. • 2M – stejně jako třída 2 s tím, že při použití optických pomůcek není garantováno po vystavení lidského oka záření po dobu do 0,25s, že nedojde k nevratnému poškození zraku. • 3R - vyzařované záření může při přímém sledování svazku překročit maximální přípustnou dávku ozáření, nebezpečí poškození zraku je ovšem relativně nízké, jelikož limity třídy 3R jsou pouze pětinásobkem třídy 2. Zařízení s laserem třídy 3R by měla být používána pouze tam, kde je pohled do svazku nepravděpodobný. • 3B – při pohledu do světelného svazku je vážné riziko trvalého poškození zraku, včetně náhodných a krátkodobých ozáření. Záření z difuzního odrazu jsou běžně bezpečná. Může dojít k malým poraněním pokožky, laser může být též příčinnou

vzniku požáru. • 4 – Pohled do laseru spadajícího do třídy 4 je značně nebezpečný, ozáření pokožky představuje taktéž velké nebezpečí. Nebezpečí mohou představovat i odražené a rozptýlené paprsky. Laser představuje i riziko vzniku požáru. Podle [7] je limit pro třídu 3A při působení záření na lidské oko po dobu nad 0,25s 5mW a 25W/m<sup>2</sup>, limity pro třídu 3B je 0,5W v rozsahu vlnových délek 400 – 700nm. 22 Lasery použité v práci (červený 650nm, 100mW – zelený 532nm, 100mW – modrý 450 nm, 150mW) jsou tedy třídy 3B a přímý pohled do světelného svazku je nebezpečný, světlo z obrazců vykreslovaných na stěnu a dopadající na sítnici oka vlivem difuzního odrazu není pro zrak hrozbou.

# Kapitola 4

## Použité technologie

spi i2c nodejs ZeroMQ 3d tisk lcd obdelnikovy prubeh rotacni enkoder pull-up/down  
pwm power delivery github? - cuz it was vystaveno there and will continue to de-  
velop

# Kapitola 5

## hardware

Tato kapitola se zabývá fyzickou konstrukcí a zapojením vyrobeného laserového projektoru. Ten se skládá z řídící jednotky, galvanometrů s ovládací elektronikou, laseru, chlazení a napájení. Všechny tyto součástky jsou uloženy v pouzdře vytisknutém na 3D tiskárně.

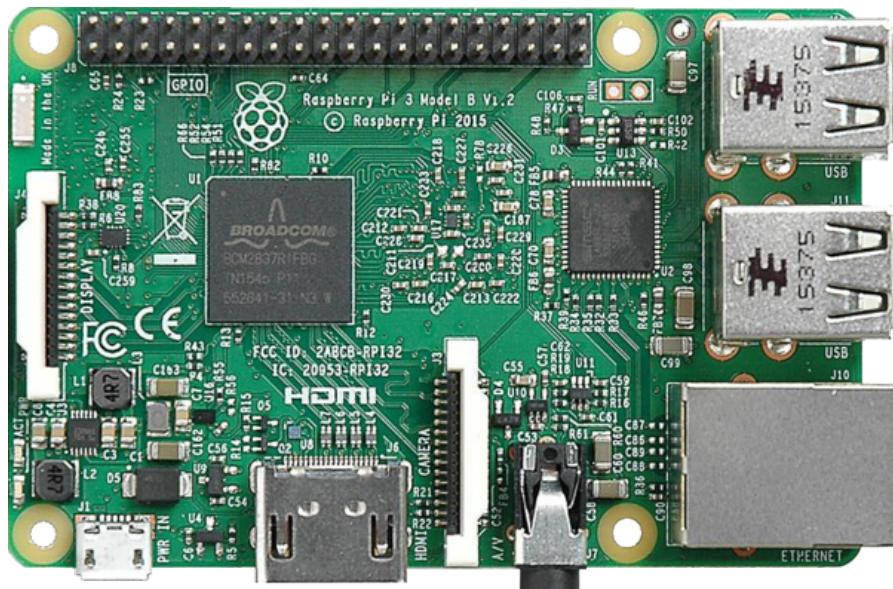
### 5.1 Řídící jednotka — Raspberry Pi

Jako hlavní řídící jednotka byl použit jednodeskový počítač Raspberry Pi, který je vidět na obrázku 5.1. To hned z několika důvodů:

- Jednoduché připojení k Wi-Fi sítím — Raspberry Pi je možné připojit k blízké Wi-Fi síti nebo si může vytvořit vlastní, na které funguje jako wifi modem.
- Operační systém Raspberry Pi OS — Běží na něm operační systém založen na linuxu, je pro něj jednoduché programovat programy a také programy můžou jednoduše interagovat s potenciálně připojenou klávesnicí, myší nebo monitorem.

- Vysoký výkon — Oproti mikrokontrolerům nabízí podstatně vyšší výkon, ten se může hodit, potřebujeme-li spouštět několik programů zároveň nebo chceme-li procesovat video z kamery.

Raspberry Pi na sobě má 40 pinový GPIO header, skrze který je možné interagovat s připojenými čipy a moduly.



Obrázek 5.1: Pohled zvrchu na Raspberry Pi; Převzato z [14]

## 5.2 Set galvanometrů se zrcátky

### 5.2.1 Výběr skeneru

Pro tuto práci byl vybrán galvanometrový skener, protože je nejdostupnější a protože potenciálním uživatelům nejlépe představí technologii.

Oproti hranolovým skenerům jim toží dává více možností, jak s paprskem pohybovat. Můžou se rozhodnout, že jej využijí jako hranolový skener, pokud nahrají soubor procházející promítací plochu po řadcích.

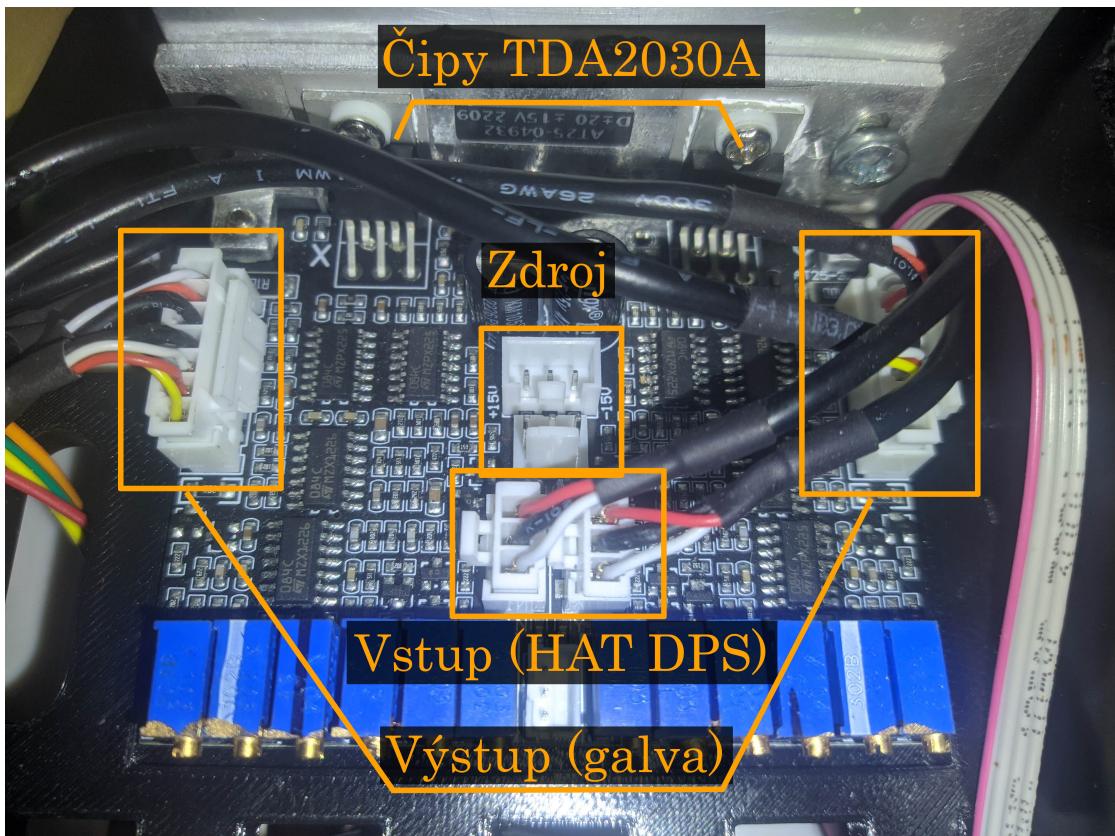
Oproti dalším typům skenerů je názornější, ostatní typy skenerů jsou totiž příliš

malé a není na nich vidět princip funkce nebo je jejich fungování nadmíru abstraktní a těžko pochopitelné.

### 5.2.2 Zapojení galvanometrového setu

Samotné galvanometry jsou zapojeny do řídící desky, která s nimi byla zakoupena, ta je vidět na obrázku 5.2.

Řídící deska požaduje symetrický zdroj napětí 15 V, tzn. +15 V a -15 V a samozřejmě připojení k zemi. Také přijímá dva bipolární diferenciální analogové signály s rozsahem diferenciálního napětí -10 V až +10 V. Každý signál udává vychýlení jednoho ze dvou galvanometrů, což obvykle znamená výslednou pozici laserového paprsku v osách X a Y.



Obrázek 5.2: Řídící deska galvanometrů s vyznačenými konektory a hřejícími čipy

### 5.2.3 bipolární diferenciální analogový signál [15]

Diferenciální signál je signál přenášený dvěma vodiči, každý z nich přenáší stejný signál, jen s opačnou polaritou. Kontakt označený (+) je považován za nosič základního signálu, zatímco kontakt označený (−) je považován za nosič invertovaného signálu. Výsledné diferenciální napětí je napětí na základním nosiči vůči napětí na obráceném nosiči, tzn.  $V_{dif} = V_{(+)} - V_{(-)}$

Bipolární signál znamená, že na napětí každém z kontaktů (+) a (−) může dosahovat kladných i záporných hodnot.

Tudíž cheme-li disáhnout diferenciálního napětí  $+10\text{ V}$ , musí mít základní signál napětí  $+5\text{ V}$  a obrácený signál  $-5\text{ V}$ . Záporné diferenciální napětí bude ve chvíli, kdy je napětí základního signálu záporné a napětí obráceného signálu kladné.

### 5.2.4 Zahřívání čipů řídící desky galvanometrů

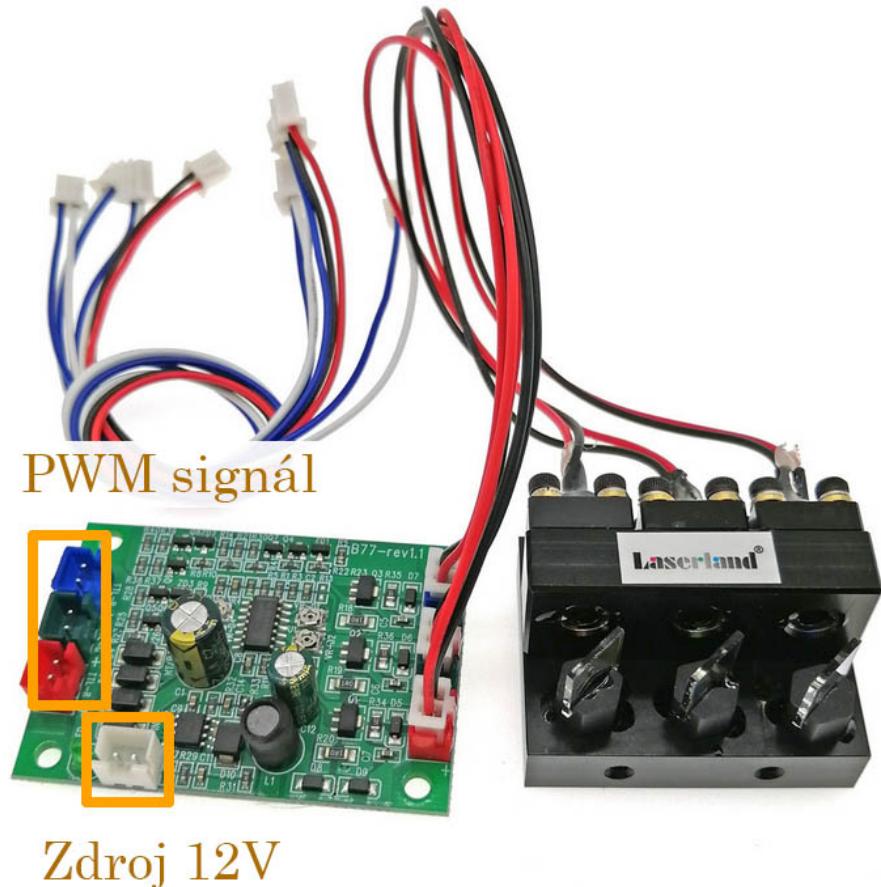
Dva z čipů na řídící desce při chodu systému výrazně zahřívají. Na tyto čipy naštěstí už od výroby desky je připevněna malá hliníková destička. Ta má sloužit jako chladič, ale i s ní se čipy v otevřeném prostoru zahřívají na teploty blízké  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dva zmíněné čipy jsou čipy TDA2030A od firmy STMicroelectronics. Ty by měly dle datasheetu vydržet až  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ale dá se předpokládat, že v uzavřeném pouzdru budou čipy dosahovat vyšších teplot, než v otevřeném prostoru. I kdyby nedosáhly pro sebe kritických  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rozhodně není žádoucí, aby uvnitř projektoru desky dosahovaly vysokých teplot.

I proto byl do projektoru zabudován chladič. Více o způsobu jeho připevnění a distribuci chlazení mezi ostatní komponenty se dočtete v kapitole 5.8.1.

## 5.3 RGB laserový modul

Jako zdroj laserového paprsku byl využit RGB laserový modul, skládající se ze řídící desky, tří barevných laserových diod o vlnových délkách 660 nm (červená),

450 nm (modrá) a 520 nm (zelená) a tří dichroických zrcátek, která slouží ke spojení paprsků z diod do jednoho. Celý modul je vidět na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Laserový modul s řídící deskou a vyznačenými konektory

### 5.3.1 Dichroická zrcadla [16]

Dichroická zrcadla jsou zrcadla s výrazně rodlnými odrazovými nebo průchodo-vými vlastnostmi pro dvě různé vlnové délky odraženého / procházejícího světla.

Většina dichroických zrcadel jsou dielektrická zrcadla – zrcadla skládající se z mnoha tenkých vrstev různě opticky propustných materiálů, existují ale také krystalická zrcadla, jejíž odrážlivá vrstva se skládá z monokrystalického materiálu, typicky polovodiče.

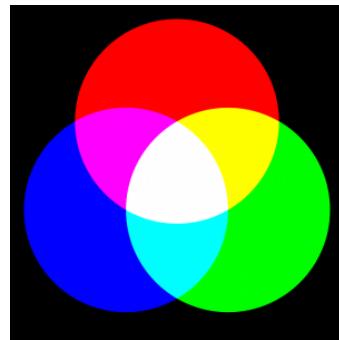
Mezi jejich využití spadá například oddělování infračerveného záření při aplikacích, kdy je nežádoucí zahřívání ozařovaného objektu.

### 5.3.2 Zapojení laserového modulu

K modulu je od výroby připojená řídící deska. Ta požaduje napětí 12 V a přijímá binární signál pro každou diodu. Je-li na signál připojena zem, korespondující dioda nesvítí. Je-li na něj připojeno 2.7 až 5 V, korespondující dioda svítí.

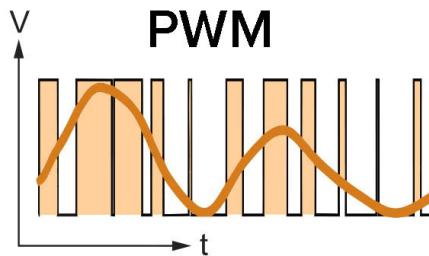
### 5.3.3 Tvorba barev s laserovým modulem

S laserem je tedy možné vytvořit 7 barev - červenou, zelenou, modrou, žlutou, tyrkysovou, purpurovou a bílou, viz obrázek 5.4.



Obrázek 5.4: Sedm základních barev laserového modulu

Naštěstí i zde je možné uplatnit jev persistance of vision a sice pomocí techniky PWM (z anglického Pulse Width Modulation). Ta se využívá jako alternativa analogového řízení v případech, kdy je potřeba řídit analogovou proměnnou binárním signálem, tedy signálem nabývajícím hodnot „zapnuto/vypnuto“. V PWM signálu je konstantní perioda a proměnný je čas, kdy má binární signál hodnotu „zapnuto“, tomuto času se říká „pulse width“ a vyplývá z něj jméno techniky. Konečná hodnota („střída“, anglicky „duty cycle“) signálu se dá získat jako poměr času „pulse width“ a periody signálu. Střída hodnoty 100% tedy znamená, že signál má neustále hodnotu „zapnuto“, střída hodnoty 0% naopak znamená neustálé „vypnuto“. [17][18]



Obrázek 5.5: PWM signál s měnící se střídou; Střída naznačena oranžovou křivkou.  
Převzato a upraveno z [19]

Nastavíme-li tedy střídu signálu pro červenou diodu na 100% a pro zelenou diodu na 50% výsledný paprsek bude pro lidské oko mít barvu s rgb hodnotou (255, 127, 0) neboli oranžovou.

I tato technologie má ovšem své limitace, řídící deska laserového modulu zvládá přijímat signál o maximální frekvenci 35 kHz (Raspberry Pi je schopno vysílat s frekvencí až 40kHz), což vzhledem k rychlosti pohybu laseru v některých případech nemusí stačit. Může se stát, že při vykreslování křivky se paprsek stihne posunout dříve, než uplyne perioda pwm signálu. Pokud se tak stane budou různé sousední části křivky mít různou barvu.

Tento efekt je nejviditelnější při projekci tmavých barev, ale dá se zmírnit zvětšením času, po který paprsek setrvá na jednom bodě po jeho vykreslení, v tu chvíli se ale může stát, že nastane „flickering“ popsaný v sekci 2.2.

Note:  
TODO  
obrázek  
nedostatečně  
rychleho  
pwm

## 5.4 Displej z tekutých krystalů (LCD)

Pro zobrazování informací uživateli přímo na zařízení byl využit alfanumerický<sup>1</sup> LCD s řadičem HD44780 a s rozlišením 20x4 znaky. K displeji je připojen také připojen I<sup>2</sup>C převodník, který slouží jako prostředník mezi řadičem displeje a Raspberry Pi. Komunikační protokol LCD totiž využívá podstatně více kontaktů, než I<sup>2</sup>C

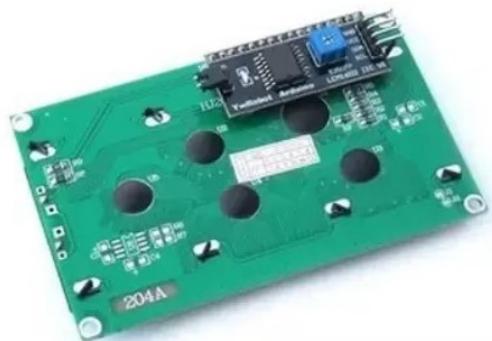
---

<sup>1</sup>Alfanumerický – Řídící jednotka displeji místo pixelů posílá celé znaky, které sám vykresluje.

sběrnice, kterou Raspberry Pi komunikuje s převodníkem. Převodník je k pinům Raspberry Pi připojen dle tabulky 5.1.



Obrázek 5.6: Displej z tekutých kryštalů (LCD); Převzato a upraveno z [20]



Obrázek 5.7: I<sup>2</sup>C převodník napojený na LCD; Převzato z [20]

kontakt převodníku	kontakt RPi
GND	GND
5V	5V
SCK	GPIO3
SDA	GPIO2
LED	GPIO18

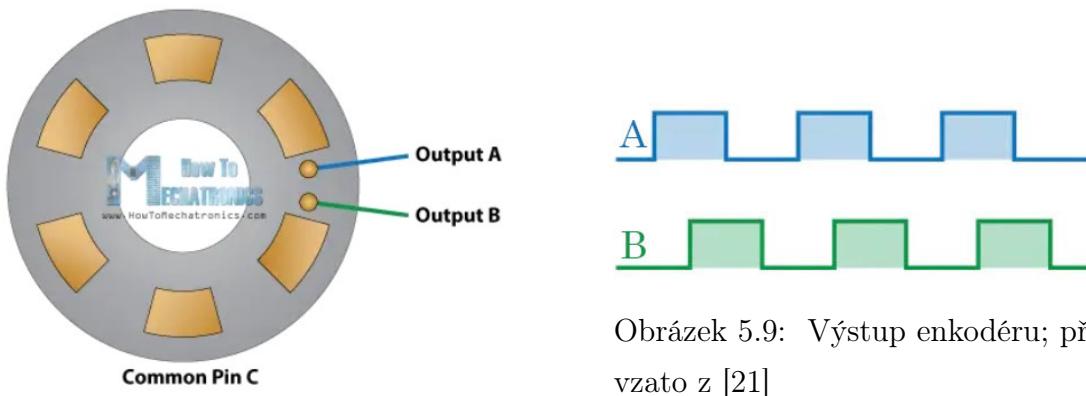
Tabulka 5.1: Připojení kontaktů I<sup>2</sup>C převodníku na kontakty RPi.

## 5.5 Rotační enkodér [21][22]

Rotační enkodér je typ pozičního senzoru používaný k měření rotace otáčivé hřídele. Existuje mnoho druhů enkodérů, rozdělují se dle signálu, který vydávají a dle technologie, kterou měří rotaci hřídele. V této práci je použit mechanický inkrementální enkodér s tlačítkem.

Na obrázku 5.8 je vidět, jak enkodér funguje uvnitř. Dva kontakty A a B při rotaci

získávají a ztrácí kontakt s kontaktem C. Připojíme-li ke kontaktu C zem a ke kontaktům A a B pull-up rezistory (klidně softwarově), dá se toto získávání a ztrácení kontaktu zaznamenat do grafu na obrázku 5.9 jako dva signály obdélníkového průběhu vzájemně fázově posunuté o 90 stupňů.



Obrázek 5.9: Výstup enkodéru; převzato z [21]

Obrázek 5.8: Vnitřní schéma enkodéru; převzato z [21]

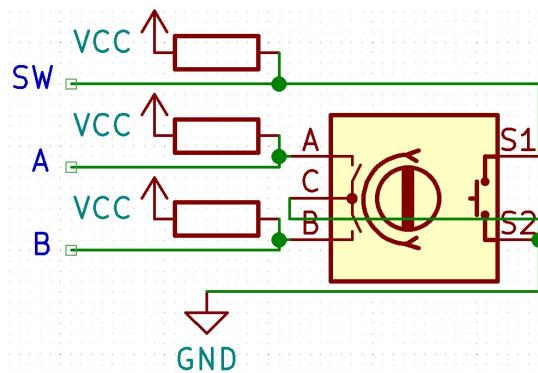
Použitý rotační enkodér má další dva kontakty připojené k tlačítka pod rotující hřídelí. Ke čtení stisknutí tlačítka je potřeba připojit jeden kontakt k zemi, tedy ke kontaktu C a druhý kontakt na pull-up rezistor (klidně softwarově). Celé zapojení enkodéru je naznačeno na obrázku 5.10. Kontakty tlačítka jsou v něm označeny S1 a S2. Enkodér je k RPi připojen dle tabulky 5.2.

kontakt enkodéru	kontakt RPi
C	GND
S2	GND
A	GPIO5
SDA	GPIO6
S1	GPIO13

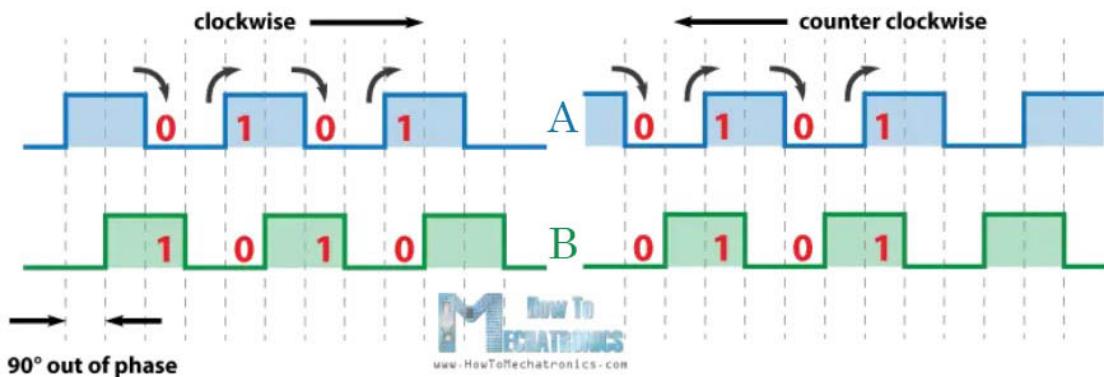
Tabulka 5.2: Připojení kontaktů rotačního enkodéru na kontakty RPi.

### 5.5.1 Čtení pozice z rotačního enkodéru

U rotačního enkodéru se při každé otáčce změní připojení pinů několikrát. Chceme-li pozorovat pouze počet těchto změn, stačí spočítat změny na jednom kontaktu. Pokud je ale zapotřebí pozorovat i směr otáčení, je nutné pozorovat stav obou kontaktů. Pokud se enkodér otáčí po směru hodinových ručiček, kontakt A bude fázově posunut o 90 stupňů napřed oproti kontaktu B. Pokud se enkodér otáčí proti směru hodinových ručiček, bude naopak kontakt B o 90 stupňů napřed oproti kontaktu A. Časový průběh stavu kontaktů je naznačen na obrázku 5.11.



Obrázek 5.10: Schéma zapojení rotačního enkodéru.



Obrázek 5.11

## 5.6 HAT deska plošných spojů

Pro ovládání výše popsaného hardwaru je zapotřebí několik specifických obvodů. Kvůli jejich specifičnosti tyto obvody nejsou volně dostupné k zakoupení na předem vytvořených destičkách. Proto bylo zapotřebí je z jednotlivých součástek vyrobit na míru.

Obvody byly navrženy v programu KiCad, celé schéma desky je k nalezení mezi přílohami s označením 7.1. Následně pro ně v tomtéž programu byla nadesignována deska plošných spojů. Mezi obvody patří:

- Zdroj  $-15\text{ V}$  pro galvanometry
- Generátor signálu pro řídící desku galvanometrů
- Voltmetr baterií

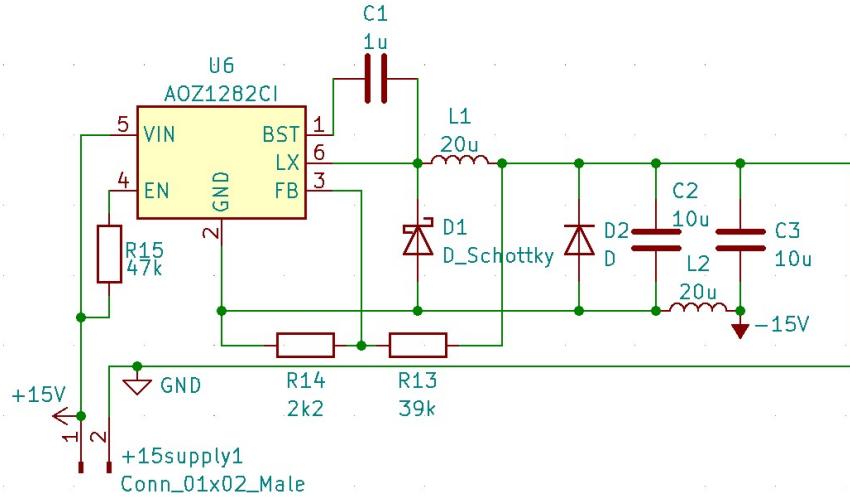
Kromě nich byly na desku přidány konektory k jednotlivým barevným vstupům laseru, LCD displeji a k rotačnímu enkodéru, které jsou přímo napojeny na 40 pinový GPIO konektor Raspberry Pi. Deska byla designována jako tzv. HAT, to znamená, že sama na tomto konektoru drží a nezabírá o moc více místa, než samotné Raspberry Pi.

Note:  
TODO:  
obrazek  
desky  
(maybe  
moun-  
ted)  
(deska  
ještě  
nedošla)

### 5.6.1 Zdroj $-15\text{ V}$ [23]

Napětí  $-15\text{ V}$  je získáváno obvodem napěťového invertoru inspirovaného zdrojem [23]. Jeho zapojení je na obrázku 5.12, potřebuje zdroj napětí  $15\text{V}$ .

Centrem obvodu je integrovaný obvod AOZ1282 od výrobce Alpha & Omega Semiconductor označený U6. Tento integrovaný obvod obsahuje spínací transistor (ve zjednodušeném schématu prvek SW), PWM regulační obvod pracující na frekvenci  $450\text{ kHz}$  s napěťovou referencí  $0,8\text{ V}$ , který reguluje čas připojení induktoru L1. K němu je připojen bootstrapový kondenzátor C1, ten zajišťuje plovoucí buzení pro integrovaný spínač. Dále je k němu připojený výkonový induktor L1, jehož



Obrázek 5.12: Zapojení invertujícího obvodu

hodnota byla zvolena dle rovnic uvedených ve zdroji [24], respektive podle dále uvedené rovnice 5.1. [23]

$$L = \frac{-U_{OUT} \times U_{IN}}{0.4 \times 2 \times I_{OUT} \times f_s \times (U_{IN} - U_{OUT})} = \frac{-(-15V) \times 15V}{0.4 \times 2 \times 1A \times 450kHz \times (15V - (-15V))} \approx 21\mu H$$

Rovnice 5.1: Výpočet ideální indukčnosti cívky pro invertující obvod

$L$  — Indukčnost spínaného induktoru

$U_{IN}$  — Vstupní napětí do invertujícího obvodu

$U_{OUT}$  — Výstupní napětí z invertujícího obvodu

$I_{OUT}$  — Výstupní proud z invertujícího obvodu

$f_s$  — Frekvence spínacího regulátoru

Na FB pin integrovaného obvodu je připojen napěťový dělič tvořený odpory R13 a R14, který integrovanému obvodu dodává zpětnou vazbu o výstupním napětí. Hodnoty R13 a R14 jsou voleny tak, aby při 15 V, tedy požadovaném výstupním napětí, bylo na výstupu děliče napětí 0,8 V, tedy referenční napětí integrovaného spína-

ného regulátoru. Schottkyho dioda SS56, označená D1, slouží k zadržení změny polarity induktoru. Usměrňovací dioda D2 je v propustném stavu při prvotním spuštění měniče, kdy je přes ní napájen U1 po dobu náběhu výstupního záporného napětí. Posledním prvkem je výstupní vyhlazovací filtr tvořený kondenzátory C3 a C4 společně s induktorem L2. Jeho úkol je minimalizovat výstupní napěťové zvlnění zdroje. [23]

### 5.6.2 Generátor analogového signálu

Jak popsáno v sekci 5.2, řídící deska galvanometrů přijmá dva bipolární diferenciální analogové signály v rozpětí  $-5\text{ V}$  až  $+5\text{ V}$ .

Obvod, který se stará o vytváření tohoto signálu je založený na obvodu ze zdroje [25]. Vytváření tohoto signálu je rozděleno do dvou částí. Nejdříve D/A převodník připojený k RPi vytvoří signál v rozpětí 0 až 5 V a následně je tento signál pomocí invertujících operačních zesilovačů převeden na požadované rozpětí a invertován. Jednotlivé části tohoto obvodu jsou blíže popsány v následujících kapitolách.

#### D/A převodník [26]

K generování signálu v rozpětí 0–5 V byl využit dvoukanálový D/A převodník<sup>2</sup> MCP4822. Tento čip podporuje komunikaci přes rozhraní SPI, pracuje s napájecím napětím 5 V a s 12bitovým rozlišením (je schopen vygenerovat 4 096 různých napětí) na dvou kanálech. RPi komunikuje s čipem pomocí rozhraní SPI popsaném v kapitole ??.

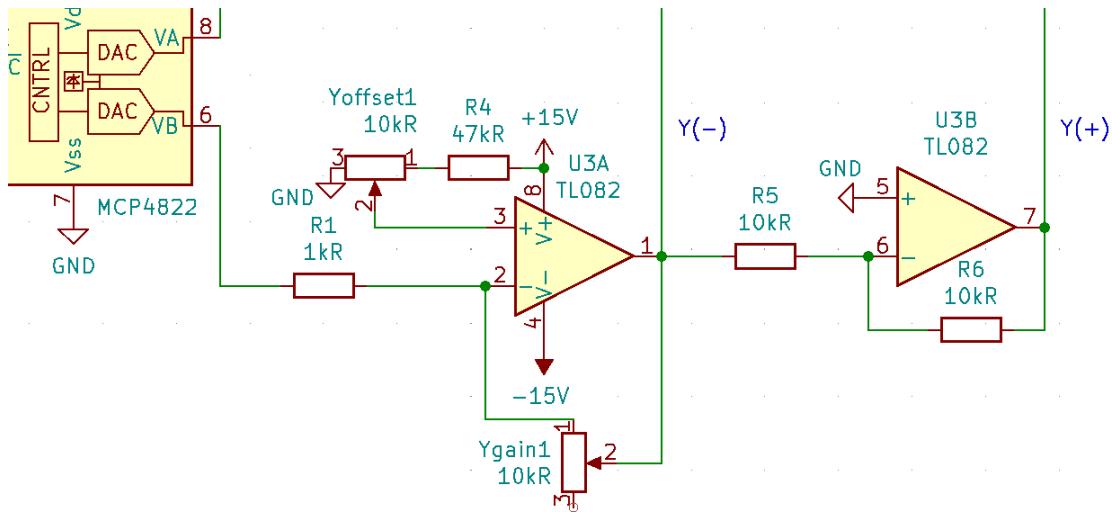
#### Operační zesilovače [27]

K modifikaci signálu z DAC na bipolární diferenciální analogový signál slouží pro každý kanál jeden čip TL082, který obsahuje dva operační zesilovače. Ty jsou zapojeny dle schématu na obrázku 5.13.

---

<sup>2</sup>D/A převodník je obvod, který na základě instrukcí přijatých digitálně generuje analogové napětí

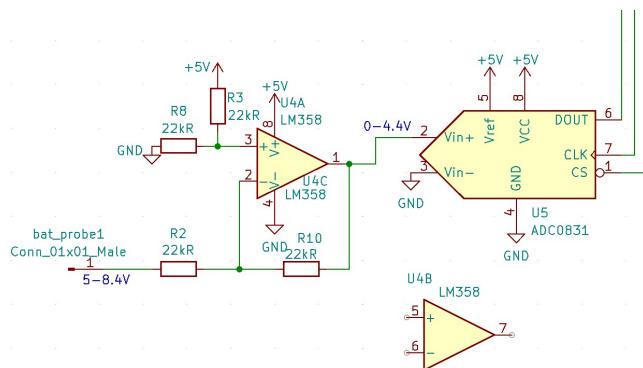
Signál první operační zesilovač zesílí / zeslabí a vertikálně posune dle nastavení potenciometrů Ygain(zesílení) a Yoffset(posun) a zároveň invertuje. Tento invertovaný signál následně druhý operační zesilovač opět invertuje, získav základní signál pro řídící desku galvanometrů.



Obrázek 5.13: Zapojení čipu TL082 pro jeden kanál řídící desky galvanometrů

### 5.6.3 Voltmetr baterií

Obvod voltmetru baterií je vidět na obrázku 5.14.



Obrázek 5.14: Schéma obvodu voltmetru baterie

Jako voltmetr baterií slouží A/D převodník ADC0831 od firmy Texas Instruments

Incorporated [28]. Ten je označen U5 a je zapojen společně s operačním zesilovačem LM358 od stejného výrobce, který je označen U4. Operační zesilovač je zapojen jako rozdílový zesilovač podle zdroje [29] tak, aby od napětí baterií, které se může pohybovat v rozsahu 6 V až 8,4 V, odečítal 5 V. Díky tomu se napětí, která měří A/D převodník pohybují mezi hodnotami 1 V a 3,4 V. S jeho osmibitovým rozlišením a referenčním napětím 5 V v tomto rozpětí může naměřit 122 různých napětí.

A/D převodník tyto data posílá do Raspberry Pi pomocí rozhraní SPI a to s nimi dále pracuje.

## 5.7 Napájení

Celkové schéma napájení je vidět na obrázku 5.15.

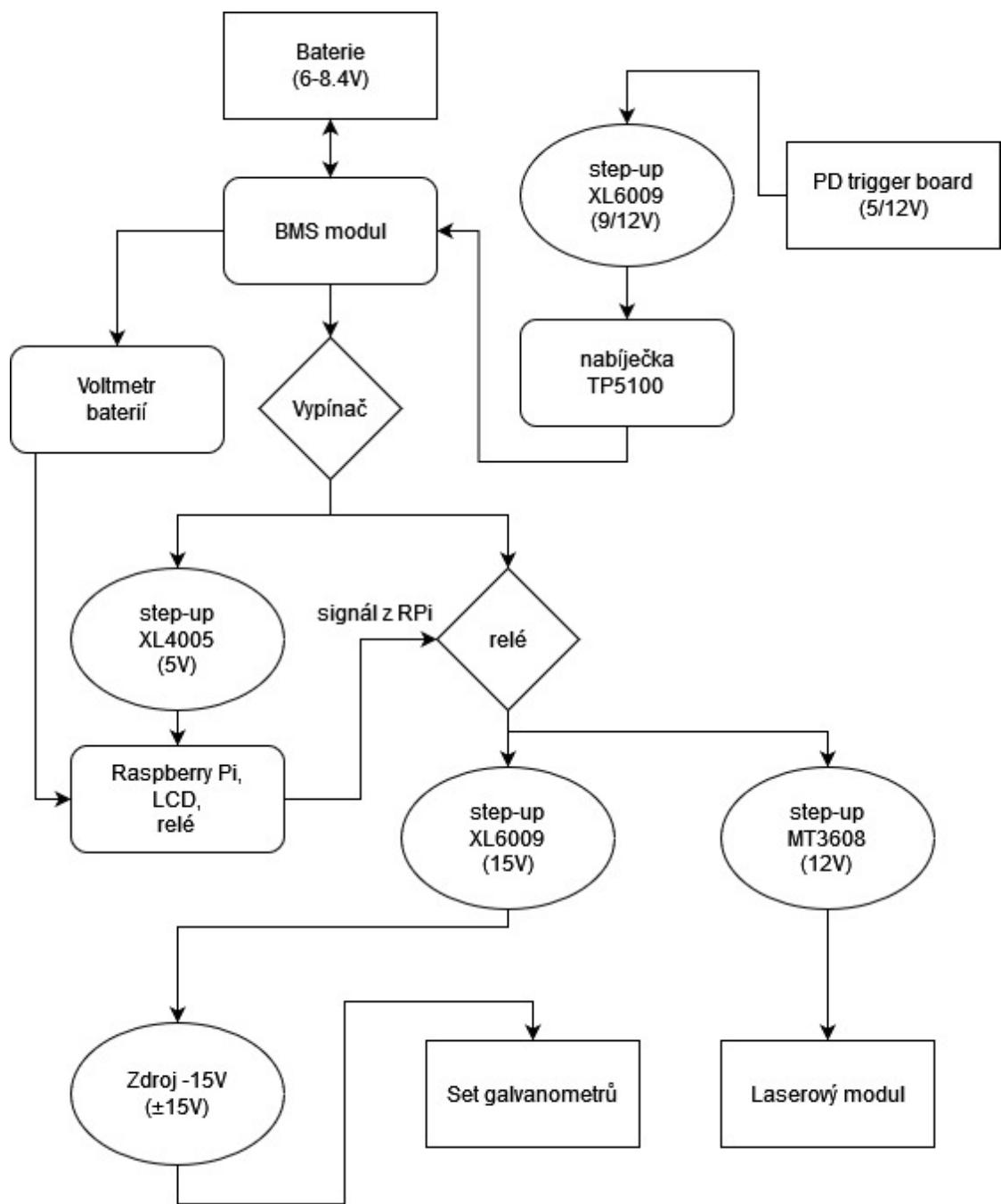
### 5.7.1 Akumulátory

K napájení projektoru byly využity 4 Lithium-iontové akumulátory Samsung INR 18650 s kapacitou 3450 mAh a jmenovitým napětím 3,7 V. Ty byly zapojeny nejdříve po dvojcích paralelně a následně byly tyto dvojice zapojeny sériově. Konečný článek tedy dosahuje jmenovitého napětí 7,4 V.

### 5.7.2 BMS modul

Na baterie byl napojen ochranný BMS (Battery management system) modul, který ji chrání před následujícími stavý:

- odběr vysokého proudu (zkrat)
- přebití
- vybití
- nevybalancované články



Obrázek 5.15: Celkové schéma napájení komponentů projektoru

Modul články balancuje a v případě, že nastane jiný z nežádoucích stavů, ji odpojí.  
 Modul je na obrázku 5.16



Obrázek 5.16: BMS Modul se třemi kontakty pro sérii baterií (0V, 4.2V a 8.4V) a výstupními kontakty ((+) a (–)); Převzato z [30]



Obrázek 5.17: Relé modul; Převzato z [31]

### 5.7.3 relé modul

V projektoru byl využit relé modul pro připojování komponentů s vysokým odběrem pouze ve chvílích, kdy jsou využívány. Jedná se o set galvanometrů, laserový modul a větrák, ty jsou připojeny jen ve chvílích, kdy projektor promítá.

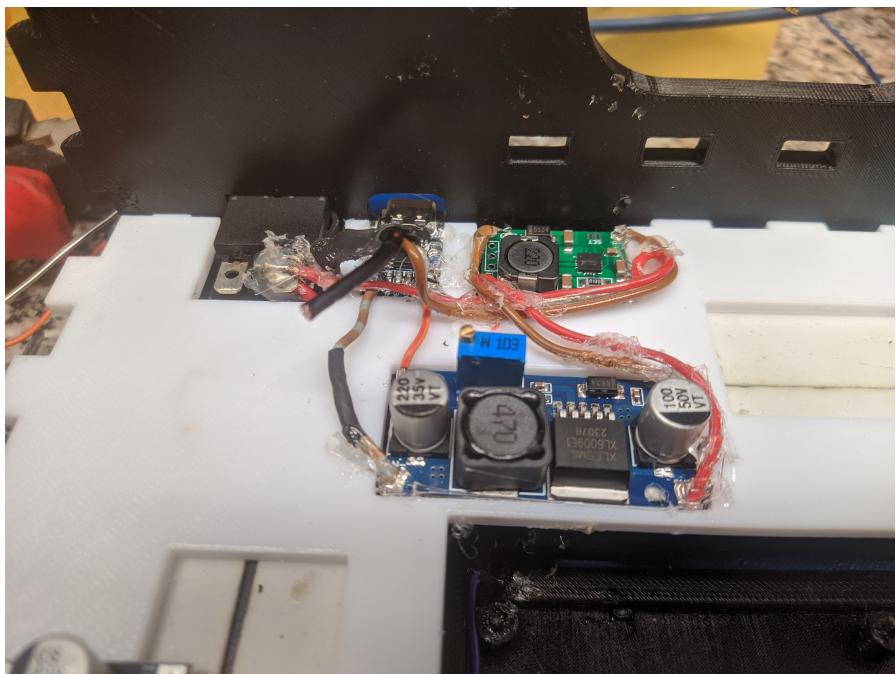
Relé modul je ovládán jedním kontaktem spojeným s Raspberry Pi a je umístěn mezi bateriemi a měniči napětí, proto stačí jeden na více napěťových větví. Je vidět na obrázku 5.17

### 5.7.4 nabíjecí obvod

Zapojený nabíjecí obvod je vidět na obrázku 5.18.

#### Power Delivery (PD) trigger deska

K nabíjení baterie je využíván USB-C port podporující moderní protokoly rychlého nabíjení (hlavně Power Delivery a Quick Charge). Ten se nachází na desce s integrovaným obvodem, který přes port komunikuje s adaptérem, pokud adaptér podporuje rychlé nabíjení, čip od něj vyžádá napětí 12 V, které deska převádí na výstupní kontakty viditelné na obrázku 5.19. Protože deska „vyvolá“ dané napětí, označuje se PD trigger board (deska).



Obrázek 5.18: Zapojený nabíjecí obvod

### Step up měnič s čipem XL6009

Pokud ovšem připojený adaptér nepodporuje žádný rychlonabíjecí protokol, na výstupech desky bude napětí pouze 5 V Na kterém standartně běží USB připojení. Proto je k PD trigger board připojen step-up měnič nastavený na 9 V. Pokud z PD desky bude vycházet napětí 5V, step-up jej zvýší na 9V. Pokud z PD desky bude vycházet 12V, napětí step-up projde beze změny.

### tp5100

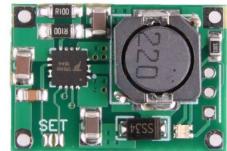
K ovládání průběhu nabíjení byl využit modul pro nabíjení Li-ionových baterií s čipem TP5100. Ten zajišťuje konstantní proud a napětí, které posílá na kontakty BMS obvodu. Další z jeho funkcí je automatické ukončení nabíjení ve chvíli, kdy baterie dosáhnou napětí 8.4 V. Je to jedinečný modul, který umožňuje nabíjení dvoučlánkových lithium-iontových akumulátorů.



Obrázek 5.19: Power Delivery trigger board;  
Převzato z [32]



Obrázek 5.20: step-up měnič s čipem XL6009; Převzato z [33]



Obrázek 5.21: Modul nabíječky dvou sériově zapojených Li-ion baterií; Převzato z [34]

### 5.7.5 Vypínač

K bateriím je neustále připojený jen BMS modul a nabíjecí obvod, všechny ostatní obvody jsou přemostěny vypínačem. Je tedy možné baterie nabíjet i když jsou všechny ostatní obvody odpojené. Vypínač je vidět na obrázku 5.18.

### 5.7.6 Napěťové větve

Různé komponenty projektoru pracují s různými napětími. Je tedy potřeba napětí baterií převést na několik napěťových větví. Jedná se o větve:

- 5V — Napětí Raspberry Pi, LCD a relé modulu; Zajištěno step-down měničem s čipem XL4005 (Viz obrázek 5.22.)
- 12V — Napětí Laserového modulu; Zajištěno step-up měničem s čipem MT3608 (Viz obrázek 5.23.)
- symetrické napětí  $\pm 15$  V — Napětí řídící desky galvanometrů; Kladná větev zajištěna step-up měničem s čipem XL6009 (Viz obrázek 5.20.), záporná větev zajištěna obvodem zdroje -15 V na HAT DPS (Viz kapitola 5.6.1)



Obrázek 5.22: step-down měnič s čipem XL4005; Převzato z [35]



Obrázek 5.23: step-up měnič s čipem MT3608; Převzato z [36]

## 5.8 Pouzdro

V rámci popularizace technologie se může hodit projektor předvádět na různých místech. Proto bude potřeba, aby byl projektor přenosný a při přemisťování se nerozobil.

Pouzdro je tedy navrženo tak, aby bylo odolné proti nárazům a zachovalo všechny součásti v bezpečí. Každá součástka má své místo, kde je držena ze všech stran. Pro výrobu pouzdra by bylo vhodné využít technologii 3D tisku. Ta umožňuje tvorbu komplexních geometrických tvarů přímo pro potřeby konkrétního modelu a zároveň umožňuje snadnou iteraci a úpravu designu pouzdra při nalezení chyb.

Pouzdro bylo navrženo v programu Autodesk Fusion.

### 5.8.1 Priority designu

#### Chlazení

Největší část projektoru je hliníkový chladič s větrákem. Už od začátku práce byl tento chladič vybrán, aby byl připevněn k řídící desce galvanometrů. Problematika jejího zahřívání je popsána v kapitole 5.2.4. Jak bylo popsáno v této kapitole, na řídící desce galvanometrů je připevněna hliníková destička, která chladí čipy. Chladič byl připevněn právě na ni.

Aktivní chladič<sup>3</sup> se ale hodí i pro ostatní součástky. Vzduch, který nasaje je totiž

---

<sup>3</sup>Chladič s větrákem, který aktivně vytváří proud vzduchu

distribuován celou vnitřní konstrukcí projektoru a chladí tak všechny vnitřní součástky. Tomuto proudění byla věnována zvláštní pozornost při designu konstrukce pouzdra.

### Přístup k portům Raspberry Pi

Aby bylo možné je používat, je potřeba zajistit jednoduchý přístup k portům Raspberry Pi. Dále je potřeba od nich odlišit nabíjecí port.

### Modularita, jednoduchá konstrukce

Pouzdro bylo designováno také aby bylo modulární. Aby bylo možné při prototypování vyměnit pouze jednu součástku, která nesedí místo tisknutí celého pouzdra od začátku. S modularitou bylo zároveň dosaženo jednoduché konstrukce, v jakékoliv části stavby je možné dočasně odstranit díly, aby bylo možné upravit připevnění vnitřní elektroniky.

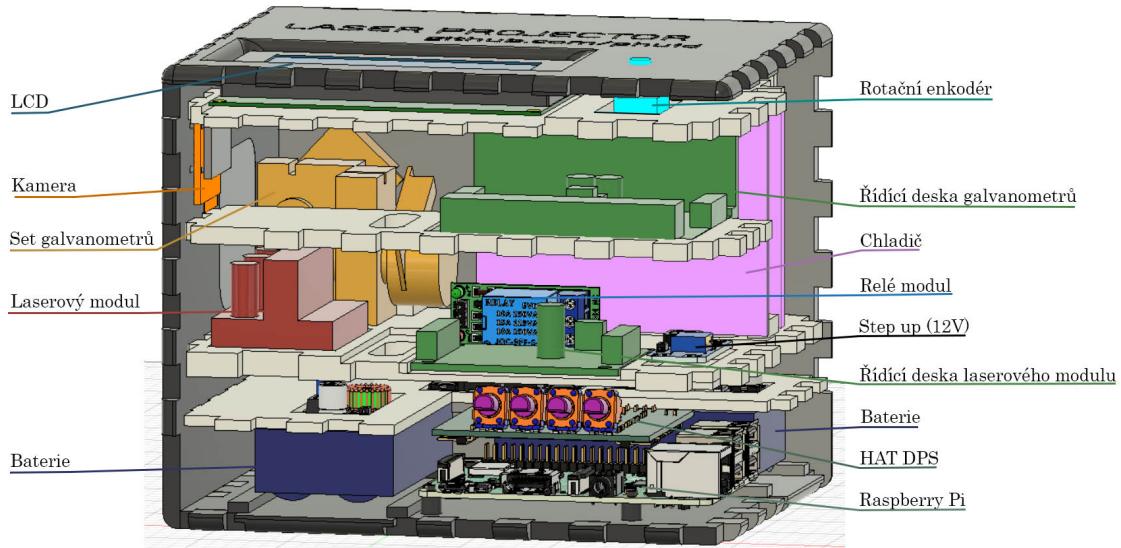
#### 5.8.2 Konstrukce

Pouzdro se skládá ze čtyř vertikálních stěn s otvory, do kterých zapadají horizontální desky. Horizontální desky v sobě mají vždy z vrchní strany vyhloubené prohlubně, do kterých pasují elektronické součástky, které na nich leží. Díky tomu se elektronické součástky při pohybu projektoru volně nepohybují ve vnitřních prostorách.

Tyto prohlubně jsou hlavní důvod, proč byl k výrobě dílů využit 3D tisk místo například laserového řezání.

Elektronika je v prohlubnících často držena i lepidlem z tavné pistole. To bylo přidáno s původním cílem upevnit k elektronice kabely z ní vedoucí i za izolaci. Kdyby kabely držely jen za vodičové drátky k elektronice připájené, drátky by se v průběhu času kvůli vibracím při přenášení polámaly.

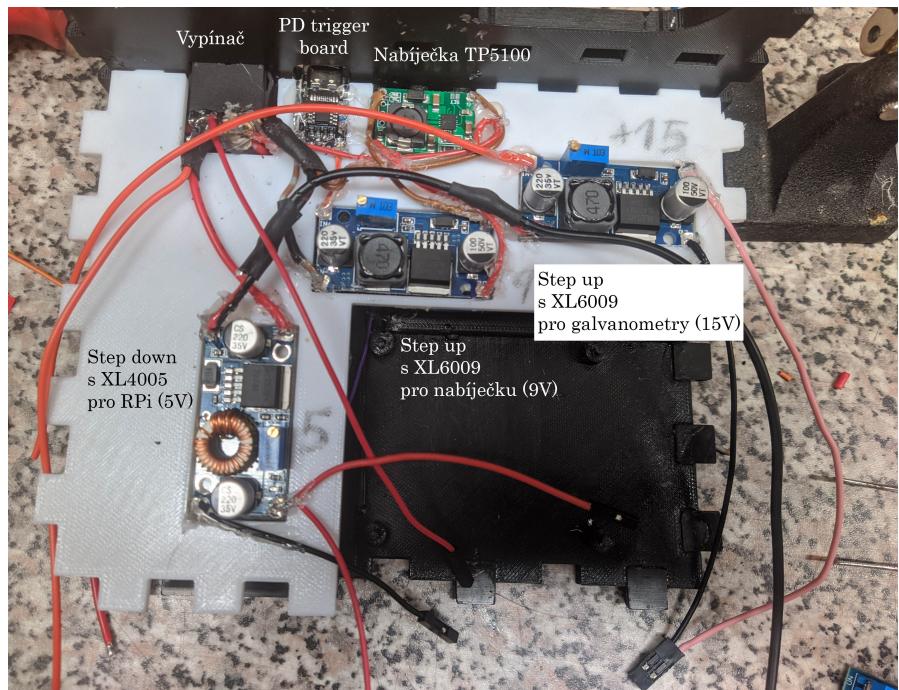
Jak je vidět na obrázku 5.24, pouzdro je rozděleno do pěti pater. Jednotlivá patra nezabírají celou plochu horizontální plochu projektoru. Často spojují pouze tři



Obrázek 5.24: Pohled do projektoru s odstraněnou přední stěnou v programu Autodesk Fusion

ze čtyř stěn, nebo jsou v nich otvory, kterými může proudit vzduch. V prvním patře se nachází baterie (zvýrazněny modře), destička s BMS obvodem a v neposlední řadě Raspberry Pi. Na něm je připevněná HAT deska plošných spojů, která zasahuje do druhého patra. Druhé patro je vidět na obrázku 5.25 a nachází se v něm obvod nabíjení baterie (PD trigger deska, step up měnič a nabíječka Li-ion článků). Dále se v něm nachází step down měnič napájející Raspberry Pi a step up měnič napájející galvanometry.

Ve třetím patře je upeněn chladič, foukající na nabíjecí obvod a step up měniče pod ním, set galvanometrů (zvýrazněn žlutě), laserový modul (zvýrazněn červeně) a jeho řídící deska (zvýrazněna zeleně), step up měnič pro laser a relé modul. Galvanometry zasahují až do čtvrtého patra, kde je upevněna jejich řídící deska. Ta je mimo jiné připevněna na chladič párem šroubků viditelných na obrázku 5.2 ze strany 26, mezi desku a chladič byla aplikována teplovodivá pasta. V prostorách čtvrtého patra je také na stěnu upevněna kamera. V pátém patře se nachází LCD a rotační enkodér.



Obrázek 5.25: Kompletně nainstalované druhé patro (Na obrázku je modul TP5100 zapojen s opačnou polaritou, ve výrobku byla chyba opravena, ale tato fotka je stále nejlepší ilustrace.)

V horizontálních deskách oddělujících patra od sebe jsou otvory pro vzduch, jak zmíněno v sekci 5.8.1, také na přední stěně pouzdra jsou otvory pro vyfukování vzduchu. Na přední stěně je také otvor pro přístup k potenciometrům na HAT DPS a otvor pro přístup k portům Raspberry Pi, ten je i na pravé boční stěně. Na zadní stěně je otvor pro nasávání vzduchu větrákem, vypínač, a otvory pro USB-C port PD trigger desky a statusové diody nabíječky TP5100. Na levé boční stěně jsou pak otvory pro kameru a laserový výstup galvanometrů. Ve dně jsou otvory pro výměnu baterií a ve stropní stěně jsou otvory pro LCD a rotační enkodér.

Note:  
fotka  
zepredu  
a zprava



Obrázek 5.26: Pohled na projektor ze strany hrany sousedící se zadní a pravou boční stěnou

# Kapitola 6

## software

Tato kapitola se zabývá softwarovou výbavou laserového projektoru. Detailně popisuje klíčové programy, jejich funkce a způsob, jakým mezi sebou komunikují. Mezi tyto programy patří program lasershow, který obsluhuje vykreslování, programy pro interakci s uživatelem (dále „frontendové programy“) jako UI, web\_ui a discord\_bot, a také program wifi\_manager, který spravuje wifi připojení Raspberry Pi. Programy wifi\_manager a discord\_bot se dají označit za backendové programy, protože neinteragují s uživatelem. V neposlední řadě popisuje také instalací skript, který výrazně zjednodušuje instalaci všech zmíněných programů a jejich závislostí.

### 6.1 komunikace mezi programy

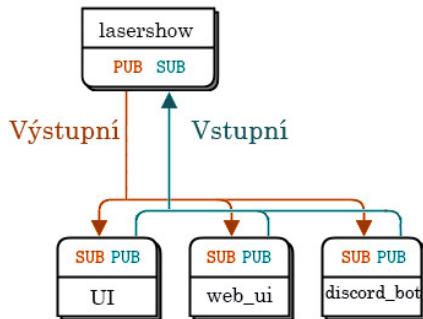
Výše zmíněné frontendové a backendové programy jsou propojeny síťovými sockety, které zprostředkovává knihovna ZeroMQ (dostupná z [37]). Ta nabízí frontu<sup>1</sup> zpráv, bez potřeby samostatně běžícího brokeru.

Tato knihovna je využita k vytvoření dvou socketů pro každý backendový program, jedním backendový program přijímá příkazy od uživatele prostřednictvím frontendových programů (vstupní socket) a do druhého posílá informace o svém

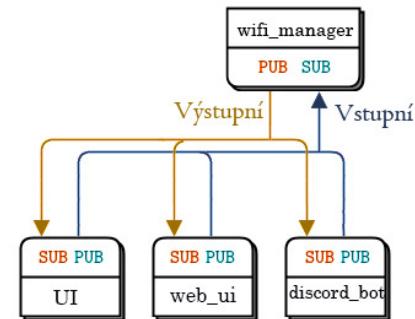
---

<sup>1</sup>Ve frontě jsou zprávy seřazeny od té nejdříve odeslané.

stavu frontendovým programům (výstupní socket), aby je zprostředkovaly uživateli. Toto spojení je schématicky naznačeno na obrázcích 6.1 a 6.2.



Obrázek 6.1: Komunikace mezi programy vstupním socketem na portu 5557



Obrázek 6.2: Komunikace mezi programy výstupním socketem na portu 5556

Jednotlivé příkazy, které můžou prorgamy lasershow přijímat jsou popsány v příloze v souboru README.md. Tento soubor se totiž na serveru [github.com](https://github.com), kam byl projekt vystaven, zobrazuje přímo na domovské stránce projektu a kdokoliv, koho by projekt zajímal je tam rychle najde.

## 6.2 Lasershows

### 6.2.1 Úvod

Program lasershow se stará o vykreslování obrazu podle příkazů od frontendových programů, patří tedy mezi backendové programy. Je psán v komplikovaném jazyce C++, jeho běh je tedy rychlejší, než kdyby byl využit interpretovaný jazyk. Interpretované jazyky bývají pomalejší, protože interpreter musí kód překládat za běhu a tím oddaluje jeho exekuci [38]. To je důležité, protože při vykreslování každá ztracená milisekunda může znamenat nežádoucí efekty. I při vykreslování jednoduchých obrazců zaseknutí paprsku na jednom místě způsobí přesvětlený bod.

## 6.2.2 Inspirace open-source

Program byl inspirován projektem <https://github.com/tteskac/rpi-lasershow><sup>2</sup>.

Zmíněný projekt posloužil jako předloha struktury promítání, ovšem všechny jeho části byly přepsány, aby umožňovaly pokročilé funkce výsledného programu laser-show.

Velkou výhodou oproti zmíněnému programu je možnost s programem interagovat. Původní program lasershow totiž po spuštění jednoduše přečetl soubor, který mu byl předán jako argument, a začal ho promítat. Promítání bylo možné přerušit pouze zastavením programu.

## 6.2.3 Funkce programu

Díky nově implementovaným interakcím je možné ve frontendových programech ovládat mnoho aspektů projekce popsaných v následujících kapitolách. Program lasershow je schopen přijímat příkazy od frontendových programů a reagovat na ně i při vykreslování probíhající projekce. Program také všechny informace o probíhající a nadcházejících projekcích posíla frontendovým programům, aby je zobrazily uživateli.

### Spouštění projekcí

Je možné vybrat soubor k projekci, vytvářet frontu projekcí, které se spustí za sebou, nastavit opakování jedné projekce, nebo celé fronty a také se posouvat v časové ose projekce (tzn. například skočit na 200. snímek právě probíhající projekce).

### Nastavení projekce

Nastavením projekcí jsou myšleny:

- Ovládání jasu jednotlivých laserových diod

---

<sup>2</sup>Navštívěno 28. 12. 2023

- Deformace obrazu pro kompenzaci úhlu vůči plátnu
- Změna velikosti a posun projekce,
- Nastavení rychlosti vykreslování – Ta je úrčena časem, kdy projektor čeká mezi vykreslením jednotlivých bodů.
- Nastavení rychlosti časového průběhu projekce – Ta je úrčena časem, po kterém projektor přeskočí na další snímek projekce.
- Nastavení vykreslování vždy úplných snímků – Program může buď snímek přerušit ve chvíli, kdy je překročen čas úrčený pro snímek, nebo může po uplynutí tohoto času vždy dokreslit body snímku, které nestihl vykreslit.
- Nastavení časově přesného snímkování – Při zapnutí časově přesného snímkování program vždy vybere k projekci snímek, který by se měl v danou chvíli promítat podle času, který uplynul od začátku projekce místo jednoduchého pokračování ve frontě snímků.

Note:  
 přidám  
 obrázky  
 ukazu-  
 jící  
 jednot-  
 livá  
 nasta-  
 vení

#### 6.2.4 Využité knihovny

##### cppzmq

Knihovna cppzmq dostupná z [39] je knihovna zprostředkující sockety ZeroMQ v jazyce c++.

Mezi nejdůležitější mnou využité funkce této knihovny patří:

- `zmq::context_t::context_t(int io_threads)` — Konstruktor třídy `zmq::context_t`; Tato třída je nutná k vytvoření socketů.
- `zmq::socket_t::socket_t(context_t &context, int type)` — Konstruktor třídy `zmq::socket_t`; Ta je nutná registraci socketů, příjemání zpráv i odesílání zpráv. Argument `type` určuje chování socketu. Já v jeho místě využívám hodnotu `zmq::socket_type::pub` pro odesílání do socketu a `zmq::socket_type::sub` pro příjemání zpráv socketem.

- `void zmq::socket_t::bind(const char *endpoint)` — Funkce, která k socketu zaregistrouje určitou adresu. V méém kódu vypadá například takto `command_receiver.bind("tcp://*:5557");`, kdy `command_receiver` je třída `zmq::socket_t` a 5557 je port, na kterém bude socket naslouchat.
- `void zmq::socket_t::setsockopt::array_option<Opt, NullTerm>, const std::string &buf)` — Funkce nastavující vlastnost socketu. Ta je v méém kódu využita následovně k nastavení příjmání všech zpráv v socketu, který příjmá zprávy. `command_receiver.set(zmq::sockopt::subscribe, "");`
- `bool zmq::socket_t::recv(message_t *msg, int flags = 0)` — Funkce se pokusí příjmout zprávu ze socketu, jehož třídě náleží, a uložit ji do objektu `zmq::message_t`, na nějž jí byl předán pointer v prvním argumentu. Při použití této funkce v argumentu `flags` používám buď hodnotu `zmq::recv_flags::none`, nebo hodnotu `zmq::recv_flags_::dontwait`. V prvním případě se exekuce při zavolání této funkce zastaví do chvíle, kdy přijde socketem zpráva. V druhém případě exekuce pokračuje i přesto, že nebyla přijmata žádná zpráva. Funkce vrací hodnotu true jestliže zpráva byla úspěšně přijata a uložena. Jindy vrací hodnotu false.
- `bool zmq::socket_t::send(message_t &msg, int flags = 0)` — Funkce se pokusí poslat do socketu, jehož třídě náleží, zprávu z prvního argumentu. V druhém argumentu vždy používám hodnotu `zmq::send_flags::none`.

## ADCDACPi

Knihovna ADCDACPi dostupná z [40] zjednodušuje komunikaci s D/A převodníkem mcp4822, využitím v generátoru sgnálu progalvanometry, viz 5.6.2, přes rozhraní SPI.

Mezi nejdůležitější mnou využité funkce této knihovny patří:

- `int ADCDACPi::open_dac()` — Tuto funkci je potřeba zavolat před použitím D/A převodníku. Inicializuje SPI komunikaci s D/A převodníkem. Vrací

1, pokud je inicializace úspěšná a 0, pokud neúspěšná. komunikace musí být inicializovaná, aby bylo možné D/A převodníku posílat instrukce.

- `void ADCDACPi::set_dac_raw(uint16_t raw, int channel)` — Funkce, která zašle D/A převodníku insrtukci, aby nastavil na kanálu uvedeném v argumentu `channel` napětí odpovídající  $\frac{raw}{4096} \times V_{ref}$ , kdy `raw` je parametr předaný funkci, 4096 je rozlišení D/A převodníku a  $V_{ref}$  je referenční napětí připojené k D/A převodníku.
- `void ADCDACPi::close_dac()` — Funkce deinicializuje SPI komunikaci s D/A převodníkem. Měla by být zavolána před ukončením programu.

## pigpio

Knihovna pigpio dostupná z [41] umožňuje ovládání GPIO pinů Raspberry Pi. Je využita k posílání PWM signálu do laserového modulu.

Mezi nejdůležitější mnou využité funkce této knihovny patří:

- `int gpioInitialise()` — Funkce, která inicializuje knihovnu pigpio. Musí být zavolána před použitím dalších funkcí.
- `int gpioSetMode(unsigned gpio, unsigned mode)` — Funkce, která pro GPIO pin z argumentu `gpio` nastaví mód z argumentu `mode`. Jako argument `mode` používám hodnotu `PI_INPUT`, která pin zaregistrouje pro vstup, a hodnotu `PI_OUTPUT`, která pin zaregistrouje pro výstup.
- `int gpioSetPullUpDown(unsigned gpio, unsigned pud)` — Funkce připojí na pin `gpio` pull-up nebo pull-down rezistor podle argumentu `pud`.
- `int gpioSetPWMfrequency(unsigned user_gpio, unsigned frequency)` — Funkce, která na pinu `user_gpio` nastaví frekvenci PWM pulzů na parametr `frequency` v Hz.
- `int gpioPWM(unsigned user_gpio, unsigned dutycycle)` — Tato funkce

na pinu `user_gpio` nastaví střídu PWM, pokud je pin zaregistrován pro výstup.

- `int gpioWrite(unsigned gpio, unsigned level)` — Pokud je pin `gpio` Funkce nastaví něm výstup dle parametru `level`. Ten může mít hodnoty 1, nebo 0
- `uint32_t gpioDelay(uint32_t micros)` — Funkce pozastaví exekuci programu na `micros` mikrosekund.

### 6.2.5 Chování programu

Chování programu je vidět ve zjedoušeném diagramu [fig:lasershow-flowchart], který je k nalezení mezi přílohami.

Tento program pomocí knihovny ZeroMQ zaregistruje svůj vstupní a výstupní socket a přihlásí se na tom vstupním k odběru zpráv.

Následně načte konfigurační soubor lasershow.cfg, který obsahuje uložené nastavení z posledního běhu programu a čeká na příchozí zprávy.

Jakmile přijde zpráva, přečte ji. Pokud je požadována změna nastavení, okamžitě ji provede, aktuální nastavení si uloží do souboru lasershow.cfg a přepočítá informace o promítaném obrazu, je-li to nutné (Například, změní-li se nastavení trapezoid-horizontal, přepočítá souřadnice vykreslovaných bodů). Jestliže je požadováno vykreslení obrazu ze souboru, načte soubor a začne obraz vykreslovat. Při tom průběžně posílá informace o stavu vykreslování do výstupního socketu. I při vykreslování obrazu tento program zpracovává zprávy a pokyny ze vstupního socketu.

## 6.3 wifi\_manager

Program wifi\_manager se přímo nepodílí ani na projekci, ani na interakci s uživatelem. Mění totiž WiFi připojení, pokud uživatel prostřednictvím nějakého front-endového programu tuto změnu vyžádá.

Program wifi\_manager je napsaný v jazyce JavaScript s využitím runtime Node.js.

### 6.3.1 Funkce programu

Program umožňuje uživateli měnit nastavení WiFi připojení Raspberry Pi. Nastavením WiFi připojení jsou myšleny tři stavů. Prvním stavem je „Zapnuto“, kdy Raspberry Pi vyhledává v okolí známé sítě, ke kterým by se mohlo připojit. Druhým stavem „Hotspot“, v tomto stavu Raspberry Pi vysílá vlastní WiFi síť ve které se stalo přístupovým bodem<sup>3</sup>. A třetím stavem je „Vypnuto“, kdy je WiFi anténa Raspberry Pi neaktivní.

Změna WiFi připojení na Raspberry Pi totiž není tak jednoduchá, je při ní potřeba změnit nastavení dvou systémových služeb a restartovat je. WiFi manager tedy existuje, aby

### 6.3.2 Využité knihovny

### 6.3.3 Chování programu

Registruje pro sebe podobné sockety jako lasershow, přijímá příkazy týkající se nastavení WiFi a odesílá zpětnou vazbu o aktuálním WiFi připojení.

Note:  
TODO:  
ukazka(jak  
intera-  
guje  
se syste-  
mem,  
aby toho  
vseho  
dosahl  
lol)  
Note:  
why is  
wiringpi  
used -  
rewrite  
to  
pigpio is  
comng

## 6.4 UI

Program UI je také psaný v jazyce c++ a využívá knihovnu WiringPi, která umožňuje jednoduchou komunikaci s GPIO piny Raspberry Pi. Tento program ovládá

<sup>3</sup>viz [https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99%C3%ADstupov%C3%BD\\_bod](https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99%C3%ADstupov%C3%BD_bod)

OLED displej, který je připojený na Raspberry Pi pomocí rozhraní I2C, a přijímá vstup od uživatele čtením rotačního enkodéru s tlačítkem.

Program se při začátku exekuce pomocí knihovny ZeroMQ přihlásí ke vstupnímu socketu a k odběru zpráv z výstupního TCP socketu, kam publikuje zprávy o stavu vykreslování program lasershow. Dále si pomocí knihovny wiringPi zaregistrouje zpracovávání přerušení z enkodéru a tlačítka na něm a čeká buď na interakci s uživatelem, který by skrz něj poslal zprávy programu lasershow, nebo na zprávy od lasershow, které by zobrazil uživateli.

Note:  
TODO:  
diagram  
pro-  
gramu

## 6.5 web\_ui

Narozdíl od předchozích dvou zmiňovaných programů je program web\_ui psaný v jazyce javascript, ten nepatří mezi nejrychlejší, ale díky runtime Node.js a knihovnám http a formidable v něm bylo časově nenáročné vytvořit http web server.

Tento server běží na portu 3000 a je dostupný z lokální sítě (tzn. přímo z Raspberry Pi na adresu `http://localhost:3000` nebo z jakéhokoliv zařízení na stejně lokální síti na ip adresu RPi). Program je využíván pro jednoduchou interakci s uživatelem, který může pomocí webového prohlížeče ovládat laserový projektor pár kliknutími i zadávat vlastní příkazy klávesnicí.

Note: na  
webu  
jsou  
konzole  
pro ssh,  
wifiman  
a laser-  
show,  
taky  
fast  
project  
forms  
Note:  
TODO:  
příklad  
http  
serveru

```
const http = require('http');
const fs = require('fs');
const path = require('path');

const server = http.createServer((req, res) => {
    // Get the file path from the request URL
    const filePath = path.join(__dirname, req.url);

    // Check if the file exists
    fs.access(filePath, fs.constants.F_OK, (err) => {
        if (err) {
```

```

// File not found
res.statusCode = 404;
res.end('File not found');

} else {
    // Read the file and send it as the response
    fs.readFile(filePath, (err, data) => {
        if (err) {
            // Error reading the file
            res.statusCode = 500;
            res.end('Internal server error');
        } else {
            // Set the appropriate content type and send the file data
            const ext = path.extname(filePath);
            let contentType = 'text/plain';
            if (ext === '.html') {
                contentType = 'text/html';
            } else if (ext === '.css') {
                contentType = 'text/css';
            } else if (ext === '.js') {
                contentType = 'text/javascript';
            }

            res.setHeader('Content-Type', contentType);
            res.end(data);
        }
    });
}
});

const port = 3000;

```

```
server.listen(port, () => {
    console.log(`Server running on port ${port}`);
});
```

Stejně jako program UI za pomoci knihovny ZeroMQ tento program odebírá z výstupního socketu zprávy o průběhu vykreslování od programu lasershow a odesílá mu pokyny uživatele na vstupní socket.

Note:  
TODO:  
příklad  
přihlá-  
šení  
k socket-  
tům v js  
Note:  
TODO:  
xterm +  
ssh

## 6.6 discord bot

Posledním programem, který je využíván k interakci s uživatelem je discord \_ bot, který je také psaný v jazyce javascript v runtime Node.js, stejně jako předchozí programy se přihlásí k socketům knihovnou zmq, ale na rozdíl od nich tento program může interagovat s uživatelem přes internet ať už je kdekoliv na světě. Pomocí knihovny discord.js se přihlásí k předem vytvořenému bot účtu, který může na předem vytvořeném discord serveru čekat na zprávy od uživatele, ty posílat do vstupního socketu a posílat uživateli zpětnou vazbu, kterou příjme z výstupního socketu.

Note:  
TODO:  
in-  
stall.sh  
Note:  
TODO  
udelals  
to vubec  
dobre?  
porovnej  
se s  
ostat-  
nima

## 6.7 install.sh

# Kapitola 7

## Diskuze

### 7.1 ruzne technologie

[6] str. 394

Digital micromirror devices (DMDs) and liquid crystal displays (LCDs) have also captured the field of image projection away from oscillating scanners. uz existuje MEMS [7]- pcb, co ma X i Y v jednom zrcatku, je super a vsechno jiny prave nahrazuje, na user levelu je i docela podobny galvum - jedna civka x druhá y - overit,, idk, jesti tam civky nejsou proste pod tim a nejenom v kloubech

Note:  
vytvoril  
jsem  
projek-  
tor, ten  
je mozne  
sestavit  
s mini-  
mální  
znalostí  
elektro-  
niky,  
staci  
umet  
pajet,  
jde mi o  
to za-  
jemcum  
predsta-  
vit jak  
to pro-  
gramo-  
vat, jak  
funguji

### 7.2 další zpracování tématu

udelal jsem to dobre? vybral jsem si dobrý techniky? like byl by lepsi ten harddrive z yt? nebo fakt to melo byt napajeny z bateriek a ne ze zasuvky?

ze hej ze [typek z vut](#) udelal kinda kurva podobnej HW jak ja, ale ja to mam trochu jinak, cuz jsem o tom nevedel, ale ofc moje je lepsi :)) also to delala hromada dalsich lidi na internetu ten hw, also od [gh.com/tteskac](#) mam executable, kterou jsem ale totalne ze rozsiril a taky jsem pridal vsechno moje genialni ui muhahahah

**ze este dalsi zpracovani: (19.10.2023 vsechny dostupne)**

1. used/modified code

- <https://github.com/marcan/openlase/blob/master/tools/svg2ild.py>
- <https://github.com/tteskac/rpi-lasershow>
- [https://github.com/sabhiram/raspberry-wifi-conf/blob/master/app/wifi\\_manager.js](https://github.com/sabhiram/raspberry-wifi-conf/blob/master/app/wifi_manager.js)
- [http://www.electronicayciencia.com/wPi\\_soft\\_lcd/](http://www.electronicayciencia.com/wPi_soft_lcd/)
- typek z vut

2. dalsi zpracovani stejny projekty

- <https://www.instructables.com/Arduino-Laser-Show-With-Real-Galvos/>
- <https://github.com/tteskac/rpi-lasershow>
- <https://www.instructables.com/DIY-STEPDIR-LASER-GALVO-CONTROLLER/>
- borec na yt hard-drive text gut

3. other useful thingies

- <https://hackaday.io/project/172284-galvo-laser-cutterengraver>
- <https://hackaday.io/project/172284/instructions>
- <https://learn.adafruit.com/mcp4725-12-bit-dac-with-raspberry-pi/hooking-it-up>
- [https://www.ilda.com/resources/StandardsDocs/ILDA\\_IDTF14\\_rev011.pdf](https://www.ilda.com/resources/StandardsDocs/ILDA_IDTF14_rev011.pdf)

- cool demos <https://marcan.st/projects/openlase/>
- [https://www.youtube.com/watch?v=u9TpJ-\\_hBR8](https://www.youtube.com/watch?v=u9TpJ-_hBR8)

4. read

- <https://www.laserworld.com/en/glossary-definitions/90-t/2797-ttl-modulation-en.html>

# Závěr

Note:  
FIXME  
proc  
vsichni  
maji  
zaver  
v ob-  
sahu  
jako  
section,  
kdyz  
pak  
vypada,  
ze je pod  
posledni  
kapito-  
lou??  
Note:  
TODO  
závěr  
Note:  
TODO  
muj  
projekt  
je do-  
stupný  
na gi-  
thubu  
Note:  
vytvoril  
jsem  
projek-  
tor, ten  
je mozne  
sestavit  
s mini-  
mální  
znalostí  
elektro-

# Literatura

1. UREY, H; HOLMSTROM, S; BARAN, U; AKSIT, K; HEDILI, MK; EIDES, O. MEMS scanners and emerging 3D and interactive augmented reality display applications. In: *2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*. IEEE, 2013, s. 2485–2488.
2. EASTMAN, Jay. Brief history of barcode scanning. In: *OSA Century of Optics* [online]. Optical Society, 2015, s. 128–133 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://opg.optica.org/books/download.cfm?product=11&v=128>.
3. QUAN, Haoyuan; ZHANG, Ting; XU, Hang; LUO, Shen; NIE, Jun; ZHU, Xiaoqun. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials* [online]. 2020, roč. 5, č. 1, s. 110–115 [cit. 2024-01-28]. ISSN 2452-199X. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003>.
4. EDL, MMTJ; MIZERÁK, Marek; TROJAN, Jozef. 3D laser scanners: history and applications. *Acta Simulatio* [online]. 2018, roč. 4, č. 4, s. 1–5 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201403279>.
5. PFEIFER, Norbert; BRIESE, Christian. Laser scanning—principles and applications. In: *Geosiberia 2007-international exhibition and scientific congress*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2007, cp–59.
6. MARSHALL, Gerald F; STUTZ, Glenn E. *Handbook of optical and laser scanning* [online]. Taylor & Francis, 2012 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781420091251>.

- //library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/41669/9781439808801.pdf?sequence=1.
7. HOLMSTRÖM, Sven TS; BARAN, Utku; UREY, Hakan. MEMS laser scanners: a review. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2014, roč. 23, č. 2, s. 259–275.
  8. BEN MAKES EVERYTHING. *DIY Laser Projector - Built from an old hard drive* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=u9TpJ-\\_hBR8](https://www.youtube.com/watch?v=u9TpJ-_hBR8). Zdroj obrázku 1.3.
  9. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary* [online]. [cit. 2024-01-31]. Dostupné z: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=313-01-02>.
  10. WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Galvanometer — Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. 2023. [cit. 2024-01-31]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Galvanometer&oldid=1171003585>.
  11. PURKHET, Abderyim; HALABI, Osama; FUJIMOTO, Tadahiro; CHIBA, Norishige. Accurate and efficient drawing method for laser projection. *The Journal of the Society for Art and Science*. 2008, roč. 7, č. 4, s. 155–169.
  12. CHAO, Fan; HE, Siyuan; CHONG, James; MRAD, Ridha Ben; FENG, Lei. Development of a micromirror based laser vector scanning automotive HUD. In: *2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2011, s. 75–79.
  13. TYNDALL, J. *Notes of a Course of Nine Lectures on Light: Delivered at the Royal Institution of Great Britain, April 8-June 3, 1869*. Longmans, Green, 1870. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=x1UIAAIAAAJ>.
  14. RUSSELL BARNES, Raspberry Pi Ltd. *Get started with your new Raspberry Pi* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://magpi.raspberrypi.com/articles/get-started-new-raspberry-pi>.

15. INTERNATIONAL LASER DISPLAY ASSOCIATION. The ILDA Standard Projector [online]. 1999, s. 11, 28 [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: [https://www.ilda.com/resources/StandardsDocs/ILDA\\_ISP99\\_rev002.pdf](https://www.ilda.com/resources/StandardsDocs/ILDA_ISP99_rev002.pdf).
16. PASCHOTTA, R. *Dichroic Mirrors* [RP Photonics Encyclopedia]. RP Photonics AG, 2005 [cit. 2024-02-05]. Dostupné z DOI: [10.61835/1un](https://doi.org/10.61835/1un). Available online at [https://www.rp-photonics.com/dichroic\\_mirrors.html](https://www.rp-photonics.com/dichroic_mirrors.html).
17. TOULSON, Rob; WILMSHURST, Tim. Chapter 4 - Analog Output. In: TOULSON, Rob; WILMSHURST, Tim (ed.). *Fast and Effective Embedded Systems Design*. Oxford: Newnes, 2012, s. 57–75. ISBN 978-0-08-097768-3. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097768-3.00004-0>.
18. PŘISPĚVATELÉ WIKIPEDIE. *Pulzně šířková modulace — Wikipedie: Otevřená encyklopédie* [online]. 2023. [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pulzn%C4%9B\\_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1\\_modulace&oldid=23044621](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pulzn%C4%9B_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace&oldid=23044621).
19. THOMSON INDUSTRIES, INC. *What is Pulse Width Modulation (PWM)?* [online]. [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.thomsonlinear.com/en/support/tips/what-is-pwm>.
20. LASKAKIT. *20x4 LCD displej 2004 modrý + I2C převodník* [online]. [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/20x4-lcd-displej-2004-modry-i2c-prevodnik/>.
21. DEJAN NEDELKOVSKI, HowToMechatronics.com. *How Rotary Encoder Works and How To Use It with Arduino* [online]. [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/rotary-encoder-works-use-arduino/>.
22. JAN PAŠTYKA, Ondřej Hruška. *Rotační enkodér* [online]. 2014. [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: [https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/lpe/rotary\\_encoder/Rotary\\_Encoder.pdf](https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/lpe/rotary_encoder/Rotary_Encoder.pdf).

23. ŠLEHOFER, Jan. Ampalyzer – Analyzátor audio zesilovačů [online]. 2020 [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://prihlaska.soc.cz/archiv42/getWork/hash/72744387-58f2-11ea-9fea-005056bd6e49>.
24. TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage [online]. 2022 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva372d/slva372d.pdf?ts=1707394558861>.
25. INSTRUCTABLES, DELTAFLO. *Arduino Laser Show With Real Galvos* [online]. [cit. 2024-01-22]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/Arduino-Laser-Show-With-Real-Galvos>.
26. MICROCHIP TECHNOLOGY INC. MCP4821/MCP4822 12-Bit DACs with Internal VREF and SPI<sup>TM</sup> Interface Datasheet [online]. 2005 [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21953a.pdf>.
27. TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier Datasheet [online]. 2013 [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl082-n.pdf?ts=1706076567444&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl082-n.pdf?ts=1706076567444&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F).
28. TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. ADC0831-N/ADC0832-N/ADC0834-N/ADC0838-N 8-Bit Serial I/O A/D Converters with Multiplexer Options [online]. 2013 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc0831-n.pdf?ts=1707440787302>.
29. MASARYKOVA UNIVERZITA. *Operační zesilovače* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/F5090/um/E17\\_P8.pdf](https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/F5090/um/E17_P8.pdf).
30. LASKAKIT. *USB-C PD/QC přepínač napájecího napětí* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/usb-c-pd-qc-prepinac-napajecihonapeti/>.
31. LASKAKIT. *1-kanál 5V relé modul, Low level, 250VAC 10A* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/1-kanal-5v-rele-modul--low-level--250vac-10a/>.

32. LASKAKIT. *Ochrana Li-Ion baterie 2S 20A* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/ochrana-li-ion-baterie-2s-20a/>.
33. LASKAKIT. *Step-up boost měnič s XL6009, modrá* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/step-up-boost-menic-s-xl6009--modra/>.
34. LASKAKIT. *Nabíječka Li-ion článku TP5100, 2A 1-2S* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/nabijecka-li-ion-clanku-tp5100--2a-1-2s/>.
35. LASKAKIT. *Step-down měnič s XL4005* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/step-down-menic-s-xl4005/>.
36. LASKAKIT. *Step-up boost měnič s MT3608* [online]. [cit. 2023-02-09]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/step-up-boost-menic-s-mt3608/>.
37. ZEROMQ. *ZeroMQ An open-source universal messaging library* [online]. [B.r.]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://zeromq.org/>.
38. KWAME, Ampomah Ernest; MARTEY, Ezekiel Mensah; CHRIS, Abilimi Gilbert. Qualitative assessment of compiled, interpreted and hybrid programming languages. *Communications*. 2017, roč. 7, č. 7, s. 8–13.
39. ZEROMQ. *cppzmq* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://github.com/zeromq/cppzmq>.
40. AB ELECTRONICS UK. *ADCDACPi* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: [https://github.com/abelectronicsuk/ABElectronics\\_CPP\\_Libraries/tree/master/ADCDACPi](https://github.com/abelectronicsuk/ABElectronics_CPP_Libraries/tree/master/ADCDACPi).
41. GITHUB.COM/JOAN2937. *pigpio library* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://abyz.me.uk/rpi/pigpio/sitemap.html>.

# Seznam obrázků

1.1	mechanika polygonových skenerů; převzato z [6]. . . . .	12
1.2	úhlová rozdílnost zrcátek polygonového skeneru a paprsky od nich odražené; převzato z [6]. . . . .	13
1.3	příklad projekce laserového projektoru s polygonovým skenerem; převzato z [8] . . . . .	13
1.4	zapojení a vnitřní konstrukce galvanometrů; převzato z [6]. . . . .	15
1.5	různé konstrukce galvanometrových skenerů; převzato z [6]. . . . .	16
5.1	Pohled zvrchu na Raspberry Pi; Převzato z [14] . . . . .	25
5.2	Řídící deska galvanometrů s vyznačenými konektory a hřejícími čipy . . . . .	26
5.3	Laserový modul s řídící deskou a vyznačenými konektory . . . . .	28
5.4	Sedm základních barev laserového modulu . . . . .	29
5.5	PWM signál s měnící se střídou; Střída naznačena oranžovou křivkou. Převzato a upraveno z [19] . . . . .	30
5.6	Displej z tekutých krystalů (LCD); Převzato a upraveno z [20] . . . . .	31
5.7	I <sup>2</sup> C převodník napojený na LCD; Převzato z [20] . . . . .	31
5.8	Vnitřní schéma enkodéru; převzato z [21] . . . . .	32
5.9	Výstup enkodéru; převzato z [21] . . . . .	32
5.10	Schéma zapojení rotačního enkodéru. . . . .	33
5.11	. . . . .	33
5.12	Zapojení invertujícího obvodu . . . . .	35
5.13	Zapojení čipu TL082 pro jeden kanál řídící desky galvanometrů . . . . .	37
5.14	Schéma obvodu voltmetu baterie . . . . .	37

5.15	Celkové schéma napájení komponentů projektoru . . . . .	39
5.16	BMS Modul se třemi kontakty pro sérii baterií (0V, 4.2V a 8.4V) a výstupními kontakty ((+) a (-)); Převzato z [30] . . . . .	40
5.17	Relé modul; Převzato z [31] . . . . .	40
5.18	Zapojený nabíjecí obvod . . . . .	41
5.19	Power Delivery trigger board; Převzato z [32] . . . . .	42
5.20	step-up měnič s čipem XL6009; Převzato z [33] . . . . .	42
5.21	Modul nabíječky dvou sériově zapojených Li-ion baterií; Převzato z [34] . . . . .	42
5.22	step-down měnič s čipem XL4005; Převzato z [35] . . . . .	43
5.23	step-up měnič s čipem MT3608; Převzato z [36] . . . . .	43
5.24	Pohled do projektoru s odstraněnou přední stěnou v programu Autodesk Fusion . . . . .	45
5.25	Kompletně nainstalované druhé patro (Na obrázku je modul TP5100 zapojen s opačnou polaritou, ve výrobku byla chyba opravena, ale tato fotka je stále nejlepší ilustrace.) . . . . .	46
5.26	Pohled na projektor ze strany hrany sousedící se zadní a pravou boční stěnou . . . . .	47
6.1	Komunikace mezi programy vstupním socketem na portu 5557 . . .	49
6.2	Komunikace mezi programy výstupním socketem na portu 5556 . .	49
7.1	Celkové schéma HAT DPS v programu KiCad . . . . .	74
7.2	Flowchart programu lasershow . . . . .	75

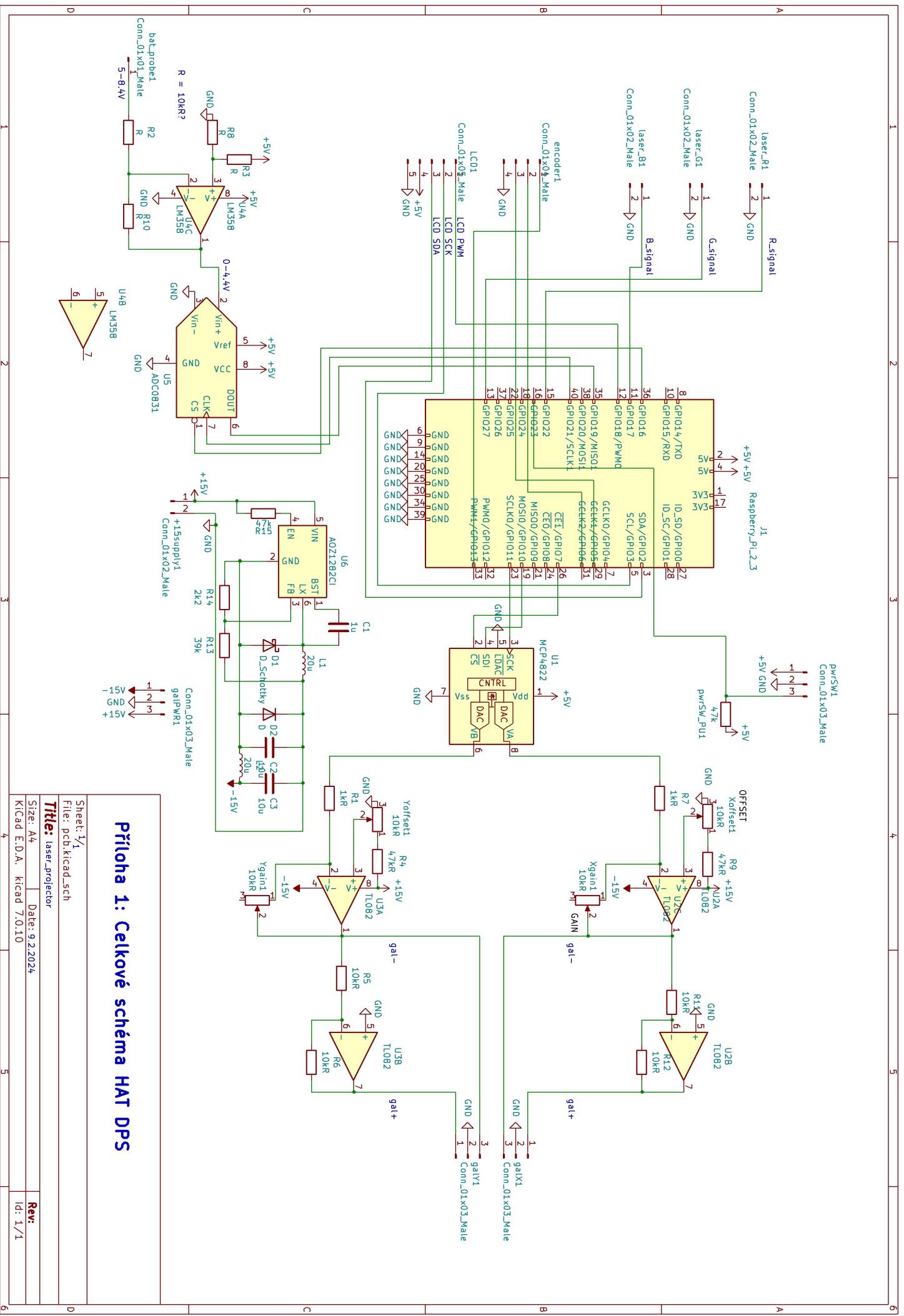
# Seznam tabulek

5.1	Připojení kontaktů I <sup>2</sup> C převodníku na kontakty RPi. . . . .	31
5.2	Připojení kontaktů rotačního enkodéru na kontakty RPi. . . . .	32

## **Seznam rovnic**

# Přílohy





Příloha 1: Celkové schéma HAT DPS

Sheet: 1/1  
File: pch\_kicad\_sch

Title: laser\_projector

Date: 9.2.2024

Rev: 1/1

Id: 1/1

