

**Bakalářská práce**



**České  
vysoké  
učení technické  
v Praze**

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky**

## **Kamera pro astronomická pozorování**

**Roman Zima**

**Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.  
Obor: Kybernetika a robotika  
Květen 2020**

## Poděkování

Děkuji panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za vedení mé bakalářské práce. Zároveň bych chtěl poděkovat všem, kteří mě přímo nebo nepřímo podporovali během mého studia.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 21. května 2020

## Abstrakt

Práce se zabývá návrhem kamery s ohledem na její použití v astronomickém odvětví. První část práce obsahuje počáteční výzkum, s jehož pomocí byl vybrán systém zachycování snímků a systém chlazení. Druhá část pojednává o praktickém zhotovení kamery.

**Klíčová slova:** Astrofotografie, kamera, Peltierovy články, Raspberry Pi, Qt

**Vedoucí:** Ing. Lubor Jirásek, CSc.  
České vysoké učení technické v Praze,  
Technická 1902/2,  
Praha 6

## Abstract

The thesis deals with a design of a camera with regards to its use in astronomical sector. First part of thesis contains initial research of image acquisition methods along with cooling system. Second part of thesis describes practical construction of a camera.

**Keywords:** Astrophotography, camera, Thermoelectric cooler, Raspberry Pi, Qt

**Title translation:** Astronomical  
Observations Camera

## Obsah

0.1 Seznam použitých zkratek . . . . .	2
<b>1 Úvod, motivace</b>	<b>3</b>
<b>Část I</b>	
<b>Teoretický rozbor</b>	
<b>2 Porovnání systémů získávající obraz</b>	<b>5</b>
2.1 DSLR kamery . . . . .	5
2.2 Jednoúčelové kamery pro astrofotografii . . . . .	5
2.3 Úprava dostupných kamer . . . . .	6
<b>3 Porovnání technologií obrazových snímačů</b>	<b>8</b>
<b>4 Možnosti chladících systémů</b>	<b>10</b>
<b>Část II</b>	
<b>Návrh kamery</b>	
4.1 Požadavky na funkcionalitu . . . .	12
<b>5 Výběr vhodného senzoru</b>	<b>13</b>
<b>6 Realizace chlazení</b>	<b>15</b>
<b>7 Realizace plošných spojů</b>	<b>16</b>
7.1 Otočení senzoru kvůli chlazení..	16
7.2 Ovládání Peltierových článků, ventilátoru, měření teploty . . . . .	17
<b>8 Řídicí programy</b>	<b>21</b>
8.1 Program v PC . . . . .	21
8.2 Program v Raspberry Pi . . . . .	24
8.3 Program v mikrokontroléru . . . .	25
<b>9 Konstrukce těla kamery</b>	<b>26</b>
<b>Část III</b>	
<b>Závěr</b>	
<b>Literatura</b>	<b>33</b>
<b>10 Přílohy</b>	<b>35</b>

## Obrázky

2.1 Porovnání spektrální účinnosti senzoru IMX249 s RGB filtrem a bez něj, převzato z [6] . . . . .	6
2.2 Eliminace barevného filtru umístěný na obrazovém snímači, převzato z [4] . . . . .	7
3.1 Vnitřní schéma fotocitlivých pixelů CMOS senzoru, převzato z [13] . . . .	9
7.1 Konstrukce kamerového modulu Raspberry Camera Module V2 . . .	16
7.2 Ovládání Peltierových článků . . .	18
7.3 Ovládání ventilátoru . . . . .	19
7.4 Schéma měření teploty Peltierových článků . . . . .	20
7.5 Převodní charakteristika NTC termistoru s hodnotami dodanými od výrobce senzoru . . . . .	20
8.1 Vývojový diagram řídicích programů . . . . .	22
8.2 Uživatelské prostředí počítačového programu . . . . .	23
9.1 Průřez kamery v konečném stavu	28
9.2 Průřez kamery s viditelnými dílčími částmi . . . . .	29
10.1 Horní strana hlavního plošného spoje . . . . .	35
10.2 Dolní strana hlavního plošného spoje . . . . .	36
10.3 Dolní strana plošného spoje pro otočení konektoru . . . . .	36
10.4 Horní strana plošného spoje pro otočení konektoru . . . . .	37

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zima** Jméno: **Roman** Osobní číslo: **474550**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Kamera pro astronomická pozorování**

Název bakalářské práce anglicky:

**Astronomical Observations Camera**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se vlastností CCD a CMOS snímačů a možnosti jejich chlazení s ohledem na užití v systému pro astronomická pozorování.
2. Na základě zjištění podle 1) vyberte vhodný snímač optického záření pro kameru pro astronomická pozorování. Navrhněte a realizujte přístroj, který umožní snímání záření s nízkou úrovní fotonového toku a snížení rušivého šumu v obraze. Předpokládá se chlazení a udržování systému pomocí Peltierových článků na teplotě  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Systém by měl umožňovat dlouhodobé sledování objektu a možnost integrace výsledků z více zachycených snímků.
3. Proveďte ověřovací měření přístroje.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.
5. Navrhněte případná další vylepšení.
6. Přístroj zůstane v majetku zadavatele.
7. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Berry, Veikko Kanto, John Munger: The CCD Camera Cookbook - How to Build Your Own CCD Camera. Willmann-Bell, Inc. Richmond 1994. ISBN 0-943396-41-7
- [2] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje. I.- III. BEN, Praha 2003 a pozdější reedice.
- [3] Katalogové listy senzorů CCD a CMOS různých firem - např. ON Semi, Sony TI.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **27.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta

## 0.1 Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
RPi	Raspberry Pi
DSLR	Digital Single-Lens Reflex
RGB	Red Green Blue
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
BSI	Back-Side Illumination
MIPI	Mobile Industry Processor Interface
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NTC	Negative Temperature Coefficient
AD převodník	Analogově-Digitální převodník
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
TCP	Transmission Control Protocol
I2C	Inter-Integrated Circuit
HAL	Hardware Abstraction Layer
LL	Low layer
DMA	Direct Memory Access
PWM	Pulse-Width Modulation
PI regulátor	Proporcionálně-Integrační regulátor
Image Signal Processor	ISP

**Tabulka 1:** Tabulka s použitými zkratkami



# Kapitola 1

## Úvod, motivace

Protože astronomické objekty jako galaxie, nebo mlhoviny, nejsme schopni ve většině případů vidět pouhým okem, používáme dalekohled, který zesílí světelný tok, který daný objekt emituje, tak, aby měl pozorovatel větší šanci na jeho zpozorování. Pro pozorování některých objektů je ale potřeba využít vybavení, které v některých ohledech předčí lidský zrak. Na řadu tedy přichází obrazové snímače, které dokáží světelný tok nepřetržitě snímat a zaznamenávat. Cílem této práce je návrh takového systému pro použití s obvyklým dalekohledem.

Astrofotografie je, vzhledem ke své povaze, finančně výrazně nákladná aktivita. V rámci této práce jsem se proto snažil obejít obvyklé metody astrofotografie a navrhnout obecně co možná nejefektivnější způsob zachycování a zaznamenávání obrazu.





# Část I

## Teoretický rozbor

## Kapitola 2

### Porovnání systémů získávající obraz

Pokud chceme snímat obraz z okuláru dalekohledu, existují 2 hlavní způsoby. Použití DSLR kamery, nebo specializované astronomické kamery.

#### 2.1 DSLR kamery

Většina amatérských astrofotografů využívá k zachycování obrazu DSLR kamery. Jejich výhoda spočívá v relativně jednoduché obsluze, univerzálnosti a ceně [13]. Nástavce, které se používají pro uchycení kamery k dalekohledu, kameru nijak trvale nemění a lze ji tedy používat i pro normální fotografování. Kamera má také většinou displej, na kterém lze vyfocené fotografie hned po vyfocení vidět a v případě potřeby lze upravit parametry snímání obrazu.

Nevýhoda DSLR kamer spočívá v obecném zaměření. Výrobci se spíše zaměřují na parametry jako rychlost snímání a barevná přesnost. Za normálních okolností je navíc ve fotografované scéně dostatek světla. Během krátké doby snímání se tedy neprojevívá tepelný šum a kamera nepotřebuje chlazení. Astrofotografie má specifické nároky na snímání obrazu. Protože se snažíme zachytit většinou velmi slabě zářící objekt, dobu snímání objektu se snažíme co nejvíce prodloužit. Se zvyšující se délkou snímání se začíná projevovat tepelný šum, který má bez chlazení kamery negativní vliv na kvalitu snímaného obrazu.

#### 2.2 Jednouúčelové kamery pro astrofotografii

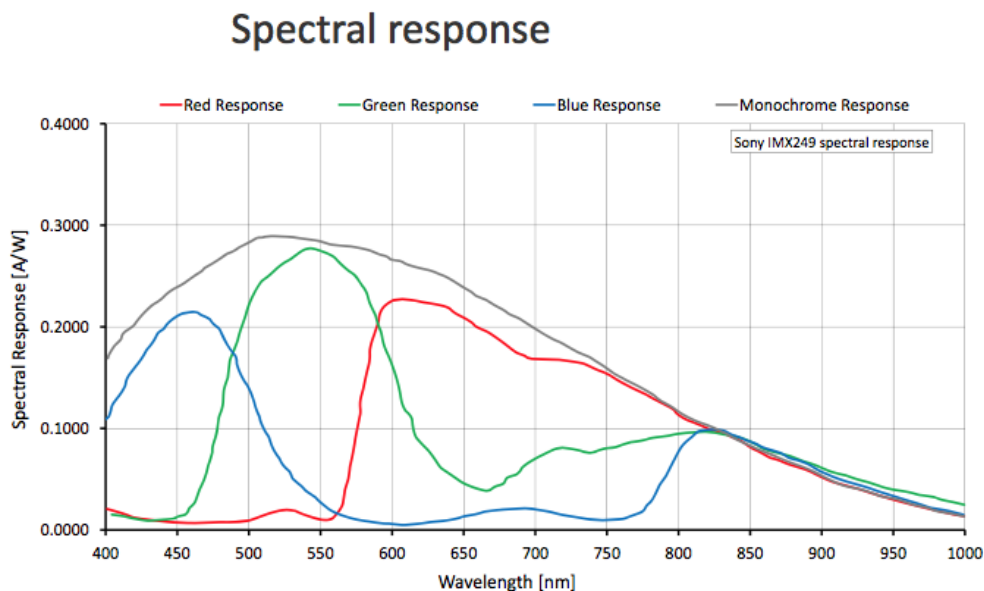
Astrofotografické kamery mají proti DSLR kamerám výhodu v tom, že jsou přímo navrhovány s ohledem na parametry, které vylepšují jejich výkon co se týče snímání tmavých objektů. Lepší kamery jsou tedy chlazené a s monochromatickým snímačem. Předpokládá se totiž použití externích optických

filtrů, které jsou efektivnější v propouštění žádaných vlnových délek, než filtry v barevných obrazových snímačích, které jsou navíc často omezeny jen na člověkem viditelnou část spektra.

Hlavní nevýhoda těchto kamer je vysoká cena. Spolu s rostoucí délkou snímání navíc rostou i požadavky na ostatní vybavení, jako teleskop a jeho naváděcí a stabilizační schopnosti. Během snímání obrazu tyto kamery také většinou potřebují separátní počítač pro ukládání snímků.

## 2.3 Úprava dostupných kamer

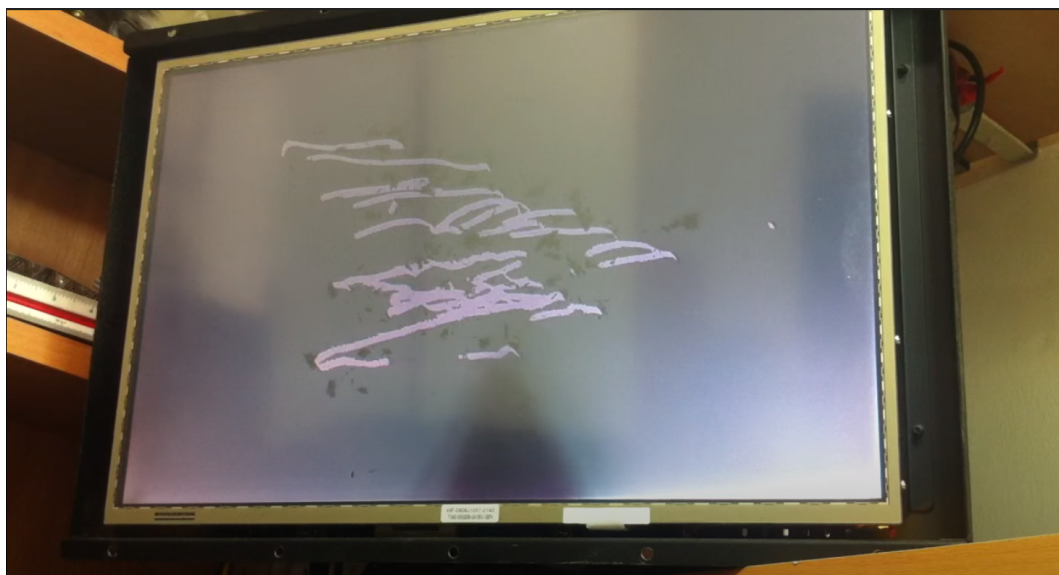
Jednou z možností úpravy kamer za účelem zlepšení schopností snímat astronomické objekty je přidání chlazení optického senzoru. Pokud to konstrukce kamery dovolí, nejčastěji používaným způsobem chlazení je pomocí Peltierova článku. Provoz senzoru v co možná nejnižší teplotě zajistí, že se ve výsledném snímku minimalizuje negativní vliv tepelného šumu. Další možný způsob, jak zefektivnit optický snímač je odstranění RGB filtru, který se nachází na povrchu senzoru. Rozdíl v citlivosti mezi senzorem s RGB filtry a monochromatickým senzorem lze vidět v obr. 2.1:



**Obrázek 2.1:** Porovnání spektrální účinnosti senzoru IMX249 s RGB filtrem a bez něj, převzato z [6]

V závislosti na konstrukci konkrétního snímače jde ale většinou o riskantní

postup, který může vést k permanentnímu poškození snímače. Některé novější senzory mají navíc před filtrem umístěny mikročočky, které mají za účel zvýšit efektivitu senzoru. Odstranění filtrů spolu s čočkami by tedy mohlo vést ke zmenšení účinnosti snímače. Starší kamerový modul od Raspberry Pi, který využívá senzor OV5647, tento postup umožňoval. Snímek z videa, které zachycuje část postupu je vidět na obr. 2.2. Je vidět, jak se v místech odstranění filtru zachycovaný obraz zesvětlí. To je zapříčiněno větším množstvím světla, které na jednotlivé snímací pixely senzoru dopadá.



**Obrázek 2.2:** Eliminace barevného filtru umístěný na obrazovém snímači, převzato z [4]

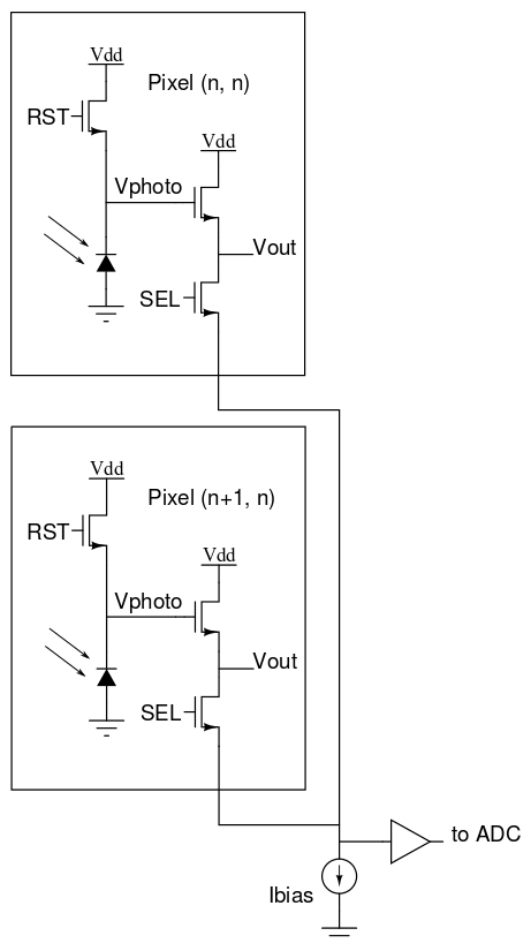
## Kapitola 3

### Porovnání technologií obrazových snímačů

Mezi 2 hlavní typy optických senzorů patří CCD a CMOS senzory. Oba dva typy mají společné to, že jejich plocha se skládá z fotocitlivých pixelů, které jsou schopny měřit na ně dopadající světlo. U CCD senzorů jsou hlavní stavební prvky fotodiody a kondenzátory. Na začátku snímání obrazu se kondenzátor nabije na výchozí hodnotu. Fotony dopadající na plochu fotocitlivé části fotodiody se díky fotoelektrickému jevu přeměňují na náboj, který má opačnou polaritu, než má náboj v nabitém kondenzátoru. Po sečtení těchto nábojů a změření zbývajících náboje v kondenzátoru lze tedy změřit počet fotonů, které dopadly na plochu diody. Po ukončení snímání obrazu obecně existují 2 způsoby přesunu kapacit k jejich změření.

První, "frame transfer", přesune všechny náboje z kondenzátorů do nefotocitlivého pole kondenzátorů, které se fyzicky nachází jinde, než na ploše pixelů. Náboje uložené v tomto poli se následně vyčítají postupným posunováním pomocí přiložení napětí na krajní kondenzátor a jeho následným změřením. U druhého způsobu, "interline transfer", se nefotocitlivé prvky, do kterých je uchován zbývajících náboj z kondenzátoru, fyzicky nachází vedle fotocitlivých pixelů. U CMOS senzorů se elektronika měřící snímání světelný tok nachází přímo v pixelu. Existují 2 hlavní typy senzoru. "Voltage mode" senzory využívají zapojení tranzistoru se společným source, kdy výstupní napětí tranzistoru je přímo úměrné napětí na fotodiodě, které je přímo úměrné dopadajícímu světlu, viz obr. 10.4. "Current mode" senzory místo výstupního napětí měří proud, který prochází tranzistorem, na jehož hradle je připojena fotodioda. Dále záleží na výrobci senzoru, jak jednotlivá napětí nebo proud převede na jas a jemu odpovídající obraz [13].

CCD senzory měly v počátku vývoje obrazových snímačů lepší parametry než CMOS, které se používaly spíše kvůli menším rozměrům. Díky vývoji v polovodičové technice ale CMOS senzory překonaly CCD senzory i v parametrech, u kterých měly CCD senzory původně výhodu [9]. Jmenovitě zejména



**Obrázek 3.1:** Vnitřní schéma fotocitlivých pixelů CMOS senzoru, převzato z [13]

citlivost, dynamický rozsah, linearita a temný proud, což je proud procházející fotodiodou v závěrném směru, který nevznikl dopadajícím světlem.

## Kapitola 4

### Možnosti chladících systémů

Za účelem snížení vlivu tepelného šumu, který vzniká v obrazovém snímači, je potřeba chladit senzor na co nejmenší teplotu. Mezi 4 hlavní typy chlazení patří kompresorové chlazení, absorpční chlazení, adsorpční chlazení a termoelektrické chlazení [7], jehož princip využívá Peltierův článek.

Protože kamera bude připevněna k dalekohledu, na její velikost a hmotnost jsou kladeny určité nároky, které použitím jakéhokoliv jiného než Peltierova článku téměř nelze splnit. Jiný potenciální způsob chlazení, který připadá v úvahu, spočívá v použití externí nádoby s tekutinou, která je chlazená na požadovanou teplotu některým z výše uvedených principů. Následným propojením pomocí hadiček a pumpy by se tekutina rozvedla do těla kamery, které by obsahovalo rozvaděč tepla, který by byl v kontaktu s obrazovým snímačem a kterým by mohla chlazená tekutina proudit. Použité hadice by ale mohly omezovat pohyb dalekohledu více, než přírodní vodiče použité u Peltierových článků. Tento způsob chlazení tedy není vhodný pro účely tohoto projektu.

Kromě relativně malých rozměrů a opakovatelnosti používání mají Peltierovy články výhodu v jednoduchém řízení výkonu. Jejich nevýhoda malé účinnosti a (v závislosti na množství odváděného tepla) nízkého odváděného tepla z chlazeného předmětu [10] v tomto projektu nehraje velkou roli, protože se předpokládá, že v blízkosti dalekohledu bude dostatečně dimenzovaný zdroj elektrické energie, jako například automobilová 12 V baterie a ztrátový výkon obrazového snímače by měl být  $< 1 \text{ W}$ , což by, vzhledem k práci Z. Bednáře [8], mělo být dostatečně málo na to, aby použití Peltierových článků mělo smysl.



## Část II

### Návrh kamery



## 4.1 Požadavky na funkcionalitu

Při sestavování požadavků na funkcionalitu systému jsem se snažil vybrat takové funkce, které by případné používání kamery co nejvíce ulehčily. Systém by tedy měl být schopný fungovat v "inicializačním" módu, kdy uživatel nastavuje ostatní vybavení, jako např. dalekohled a obraz potřebuje jako zpětnou vazbu správného nastavení. Dále by měl být systém schopný pořizovat na příkaz uživatele sérii fotografií s požadovaným nastavením a složit je do sebe tak, aby z fotografií vznikl jen jeden snímek, imitující delší dobu snímání. V řídicím programu by také měla být možnost pozorovat teploty jednotlivých Peltierových článků a v případě potřeby upravit parametry chlazení.

## Kapitola 5

### Výběr vhodného senzoru

Na začátku práce jsem se snažil sestavit svůj vlastní systém získávání obrazu, který by sestával z obrazového snímače a elektroniky, která by tento senzor ovládala. Při návrhu takového systému jsem měl dostatečnou kontrolu nad výběrem senzoru, což mi umožňovalo vybrat monochromatický senzor, jehož výhody jsou uvedeny v 2. Jediná společnost, která ve své nabídce měla zařazené volně dostupné obrazové senzory byla OnSemi. Z jejich nabídky jsem tedy vytvořil seznam senzorů, které by byly potenciálně vhodné pro použití v této práci.

Označení	Velikost pixelů [ $\mu m$ ]	Rozlišení	Cena [kč]	BSI
AR0237	3	1928x1088	130	Ne
AR0238	3	1928x1088	204	Ne
AR0330CS	2,2	2304x1536	245	Ne
MT9P031	2,2	2592x1944	668	Ne
MT9P401	2,2	2592x1944	504	Ne
MT9J003	1,67	3856x2748	740	Ne
AR0521	2,2	2592x1944	319	Ano
AR0239	3	1936x1188	232	Ano
AR0820AT	2,1	3848x2168	Nedostupné	Ano
AR0220AT	4,2	1828x948	520	Ano

**Tabulka 5.1:** Srovnání senzorů

V ideálním případě by ke všem senzorům byly dostupné charakteristiky kvantové účinnosti v absolutních jednotkách. Tato charakteristika určuje poměr mezi počtem fotonů dopadnutých na plochu senzoru a počtem vytvořených nábojů, které značí, že senzor zachytil dopadnutí fotonu na jeho plochu. Protože ale ne všechny parametry jednotlivých senzorů jsou veřejně

dostupné, přímé srovnání senzorů nebylo možné provést. Místo toho jsem senzory porovnával podle velikosti jejich pixelů a jestli obsahují technologii BSI, která kvantovou účinnost značně vylepší, protože přicházející světelný tok nemusí procházet přes vodivé kontakty spojující elektroniku na povrchu senzoru. Co se týče rozlišení senzoru, bral jsem ho spíše jako omezující podmínku. Senzory s rozlišením menším než Full HD jsem nebral v potaz. Senzory jsem tedy seřadil podle toho, jestli využívají technologii BSI a podle jejich velikosti pixelů.

Paradoxně nejvhodnější senzor, který má největší pixely a zároveň technologii BSI má menší než požadované rozlišení. Rozdíl zhruba 100 pixelů v každé dimenzi jsem se ale rozhodl zanedbat ve prospěch lepší citlivosti. První 3 senzory ale nebyly v době vyhotovování veřejně dostupné, proto jsem vybral 4. nejlepší senzor, AR0521. Ukázka použití tohoto senzoru lze vidět v [12]. Po získání přístupu k jeho datasheetu ale nastal problém v nemožnosti jednoduché implementace komunikačního rozhraní MIPI. Vzhledem k časové indispozici jsem tedy opustil návrh mého vlastního obrazového snímače.

Místo toho jsem použil už hotový kamerový modul pro RPi obsahující senzor Sony IMX219. Senzor má pixely o velikosti  $1.12\ \mu\text{m}$ , rozlišení  $3296 \times 2480$ , stojí zhruba 750 Kč a využívá technologii BSI. Není to tedy nejlepší možná volba obrazového snímače pro tento projekt, jiná možnost realizace ale v daném časovém období nepřipadala v úvahu.

V nedávné době firma Raspberry uvedla na trh nový kamerový modul s lepším senzorem IMX477. Má rozlišení  $4056 \times 3040$  a velikost pixelů  $1.55\ \mu\text{m}$ . Ovladače použité k ovládání tohoto senzoru by měly být stejné jako u IMX219, drtivá většina řídicího programu by tedy při případné výměně kamerového modulu byla stejná. Liší se ale plošný spoj kamery, na kterém je senzor umístěn. S případnou výměnou by tedy bylo potřeba navrhnout nový způsob chlazení senzoru.

Alternativou ke kamerovým modulům od společnosti Raspberry je nabídka firmy Arducam. Nabízí hned několik kamerových modulů, které ale nevyužívají oficiální ovladače firmy Raspberry. Pro jejich použití by tedy musely proběhnout rozsáhlejší úpravy v řídicích programech.



## Kapitola 6

### Realizace chlazení

Pro realizaci chlazení obrazového snímače jsem využil výsledků prací Z. Bednáře [8] a M. Hendrycha [10]. Pro získání správně dimenzovaného chladicího systému jsem zvolil konfiguraci tří kaskádně seřazených Peltierových článků z práce Z. Bednáře, tedy články TEC1-01708, TEC1-07108, TEC1-12714. Použitím těchto článků spolu s dostatečně dimenzovaným chladičem pro odvod tepla je možné dosáhnout minimální teploty  $-30^{\circ}\text{C}$  pro procházející proud  $I = 4\text{ A}$  [8], což by pro účely tohoto projektu mělo stačit.

## Kapitola 7

### Realizace plošných spojů

#### 7.1 Otočení senzoru kvůli chlazení

Jak je vidět v obr. 7.1, obrazový snímač je spojený s plošným spojem obsahující řídicí elektroniku přes konektor. Protože flexibilita a délka použitého kabelu není dostatečná na to, aby se modul obrátil o 90° a přitisknula se k němu chladná strana Peltierových článků, bylo potřeba senzor otočit. Pro tyto účely jsem tedy navrhnul plošný spoj, který lze vidět v příloze, spolu se seznamem všech ostatních součástí potřebných pro chod systému.



**Obrázek 7.1:** Konstrukce kamerového modulu Raspberry Camera Module V2

V rané fázi prototypování jsem měl snahu vytvořit celý plošný spoj, ke kterému je přes konektor senzor připojený. Na desce se ale nachází specializovaný krypto-autentikační čip ATSHA204A, který slouží pro autentifikaci senzoru a zamezení kopírování desek. Výhoda ve vytvoření celé desky spočívala v tom, že by se plocha plošného spoje pod senzorem mohla vyříznout a vzniklým otvorem by se mohl na senzor přitisknout chladič. Tento způsob by umožnil pevnější kontakt mezi chladičem a senzorem. Jediný způsob realizace by spo-

čival v použití jiného kryptočipu z už fungující desky. Opakované pájení by ale zvýšilo riziko zničení čipu. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl otočit pouze konektor.

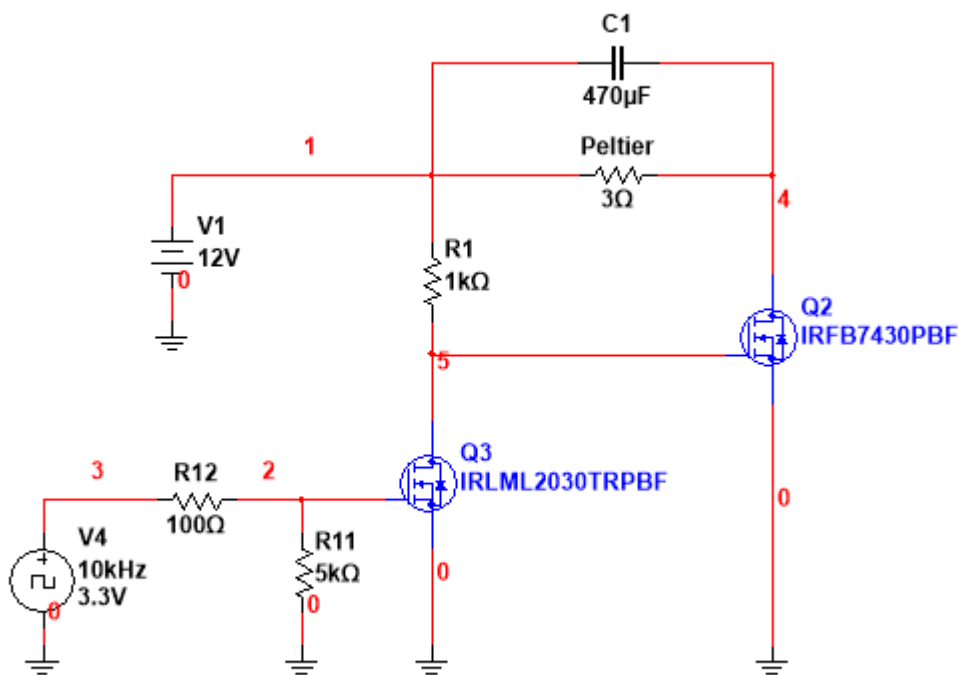
## 7.2 Ovládání Peltierových článků, ventilátoru, měření teploty

Pro ovládání výkonu Peltierových článků jsem se rozhodl použít mikrokontrolér STM32F401RE umístěný na Nucleo desce. Na rozdíl od RPi, které používám pro získávání obrazu, má tento mikrokontrolér vhodně dimenzované digitální výstupy, kterými lze ovládat MOSFET. Také má analogové vstupy, které využívám pro měření napětí na teplotních senzorech.

Proud protékající Peltierovy články ovládám výkonovým MOSFET IRFB7430PBF, viz 7.2, který je pro ochranu mikrokontroléru ovládaný MOSFETem IRLML2030TRPBF, který ovládám pomocí mikrokontroléru. Proud, který bude procházet Peltierovými články a výkonovým MOSFETem jsem stanovil na 4 A, podle práce Z. Bednáře [8]. Tuto hodnotu jsem ale během návrhu bral jako minimální hodnotu, obvod byl vyzkoušen v simulačním programu Multisim pro procházející proud 8 A s regulací výkonu na 50 % a průměrný ztrátový výkon na výkonovém MOSFETu v ustáleném stavu byl  $P = 3.08 \text{ W}$ . Pro proud 4 A při 50 % regulovaného výkonu vychází průměrný ztrátový výkon  $P = 508 \text{ mW}$ . Za předpokladu, že výkonový MOSFET bude mít svůj vlastní chladič, tyto hodnoty považuji za přijatelné.

Usoudil jsem, že spolu s řízením proudu procházejícího Peltieru bude vhodné ovládat i běh ventilátoru, který ochlazuje pasivní část chladiče, který se stará o rozvod tepla z Peltierových článků. Mohl by totiž mít negativní efekt na funkci kamery vyvolaný vibracemi během svého provozu. Proto jsem přidal obvod podobný 7.2, viz 7.3. Předpokládal jsem velikost spínaného proudu na 500 mA. Na tuto hodnotu jsem narazil jako na nejčastější hodnotu odebíraného proudu většiny ventilátorů s velikostí 12 cm s použitím v PC skříních. Protože spínaný proud nebude tak vysoký jako v případě Peltierů, vybral jsem výkonový MOSFET IRFZ24N, který je levnější než IRFB7430PBF. Paralelně s ovládaným ventilátorem je zařazena usměrňovací dioda z důvodu usměrnění indukovaného proudu, který zde vznikne při zaniknutí napájecího napětí.

Pro měření teploty jsem použil NTC termistor s výrobním označením NTCLE100E3102JB0. Při teplotě  $T = 25^\circ\text{C}$  má odpor  $R = 1 \text{ k}\Omega$ . Ostatní typy senzorů jako termočlánky, odporové teplotní senzory nebo měření teploty pomocí měření napětí na diodě v propustném směru nevyhovovaly buď z hle-

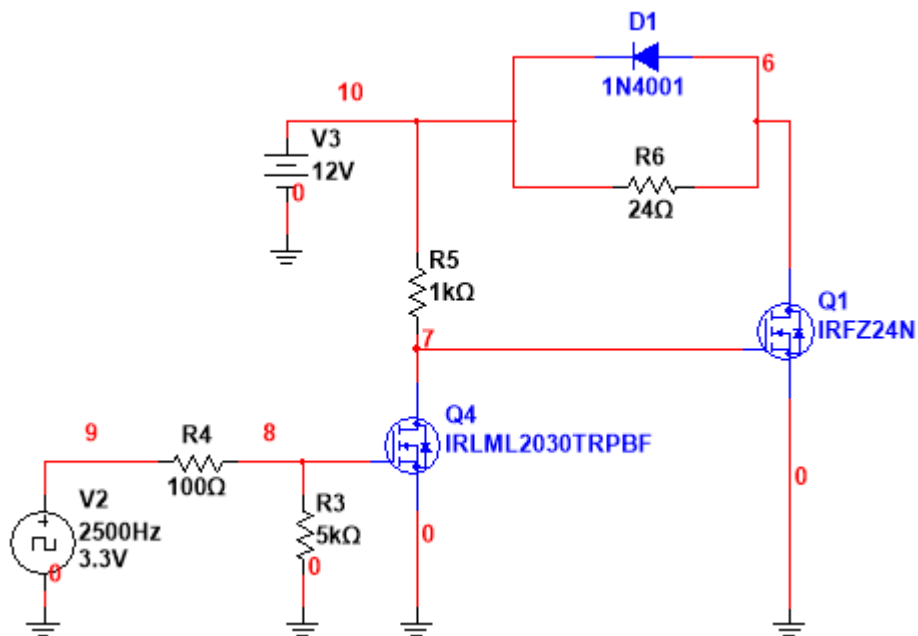


Obrázek 7.2: Ovládání Peltierových článků

diska potřeby dodatečných obvodů (kompenzace studeného spoje u termočlánků, integrované obvody u měření napětí na diodě), nebo z hlediska ceny a rozměrů (odporové teploměry).

Termistor je zapojený v napěťovém děliči se zdrojem 3.3 V, který je na desce Nucleo, viz 7.2. Napětí na termistoru měřím pomocí vnitřního AD převodníku v STM32F401RE s rozlišením 12 bitů. Nelineárnost termistoru jsem původně chtěl řešit pomocí změření skutečné převodní charakteristiky (výrobce dodaná je v 7.5) a následnou korekcí hodnot uvnitř mikrokontroléru. Z časových důvodů ale toto měření neproběhlo. I bez korekce by ale chyba měření měla být méně než  $0.5^\circ\text{C}$ . Protože přesnost měření teploty není v tomto případě to nejdůležitější, tuto chybu měření bych označil jako za dostačující.

Pro připojení těchto termistorů k desce jsem využil kolíkové lišty S2G08. Stejných kolíkových lišt používám i k připojení pinů mikrokontroléru k ploš-

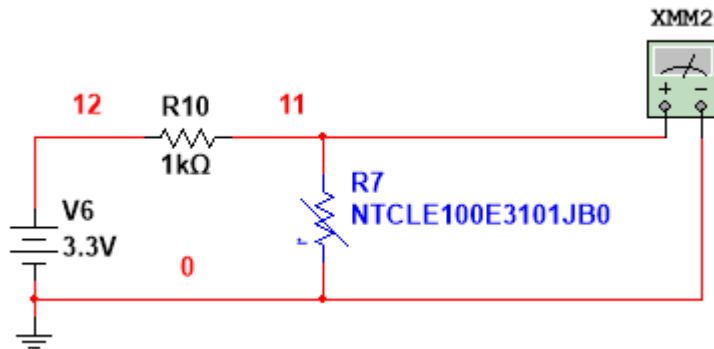


Obrázek 7.3: Ovládání ventilátoru

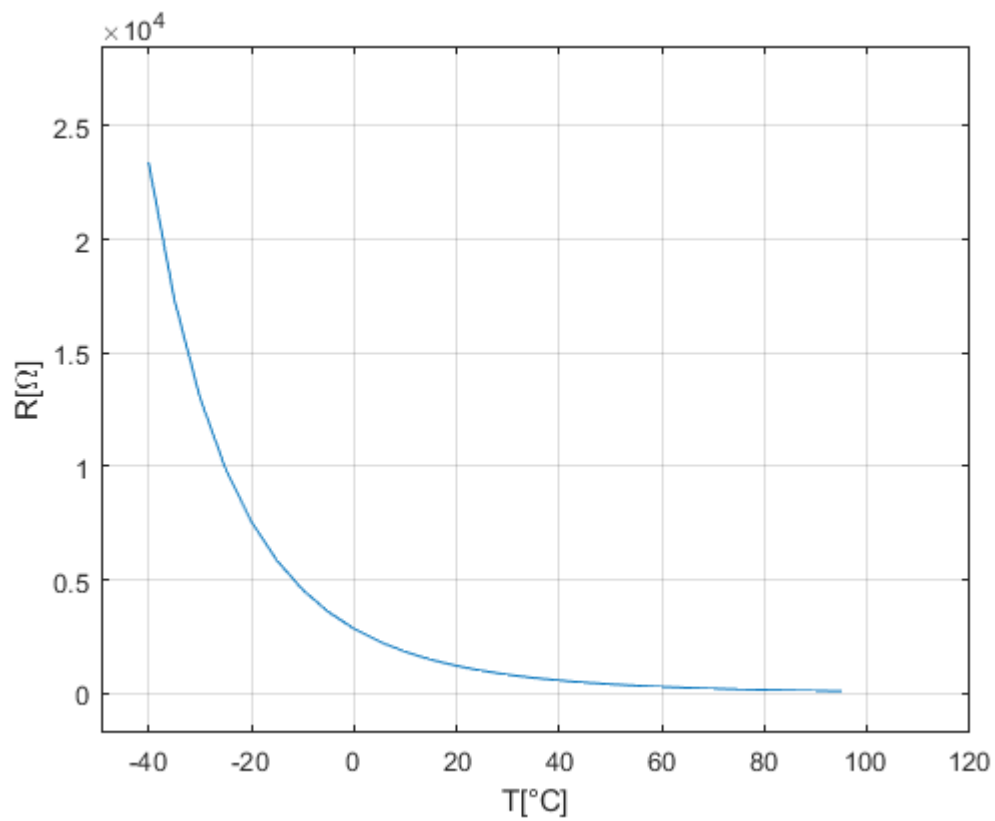
nému spoji.

Při návrhu plošného jsem předpokládal s výškou kovové vrstvy  $210\ \mu\text{m}$ . Pro výpočet šířky výkonových spojů využil kalkulačky na šířku spojů na <https://www.7pcb.com/trace-width-calculator.php>. Pro šířku spoje 2 mm při procházejícím proudu  $I = 8\ \text{A}$  se spoj oteplí o  $12.5\ ^\circ\text{C}$ . Vzhledem k předpokladu, že okolo plošného spoje bude dostatek pohyblivého se vzduchu, bych toto oteplení spoje označil jako za přiměřené.





Obrázek 7.4: Schéma měření teploty Peltierových článků



Obrázek 7.5: Převodní charakteristika NTC termistoru s hodnotami dodanými od výrobce senzoru

## Kapitola 8

### Řídicí programy

Kamera se skládá ze 3 částí: počítače, RPi a mikrokontroléru. PC komunikuje s RPi přes Ethernet a na základě požadavků uživatele vytváří požadavky na vytváření snímků nebo úpravu výkonu chlazení.

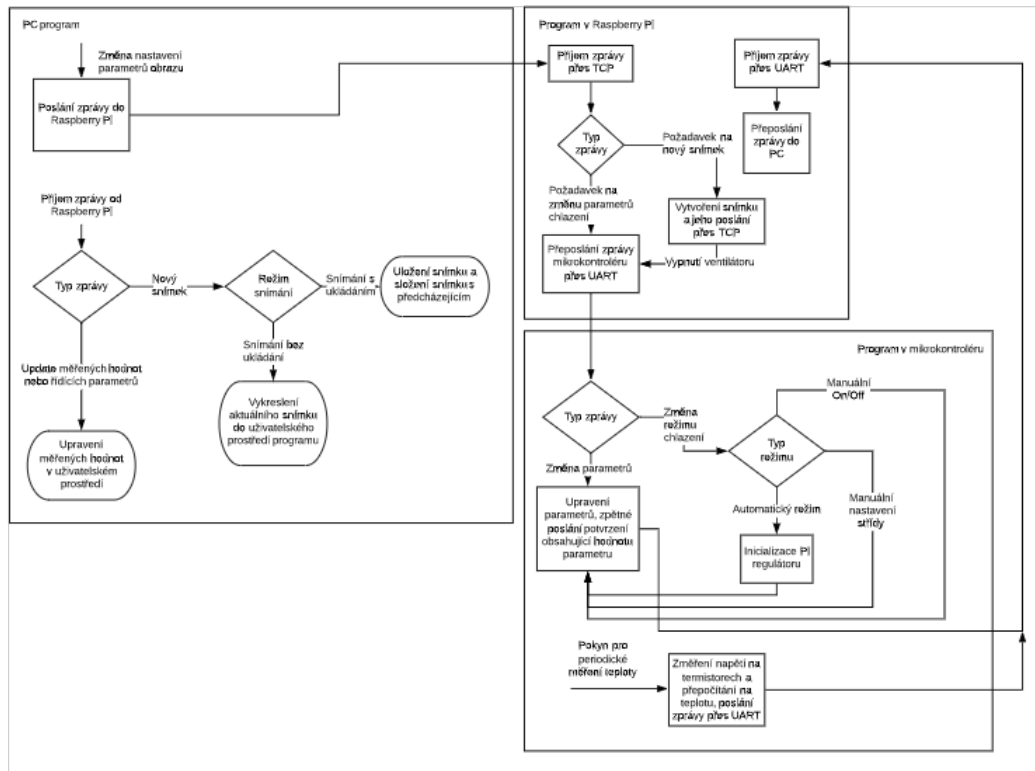
RPi může zpětně komunikovat s PC nebo mikrokontrolérem pomocí UARTu. Pokud mu přijde zpráva od PC, přijme jí a pokud je to požadavek na úpravu chlazení, přepošle tuto zprávu přes UART mikrokontroléru. Pokud to je požadavek na vytvoření obrazu, požadovaný obraz Pi vytvoří a pošle zpět do PC.

Mikrokontrolér řídí spínání výkonových MOSFET a měří teplotu pomocí termistorů. Změřené hodnoty posílá periodicky zpět do PC, viz 8.1.

#### 8.1 Program v PC

PC program má na starost sběr parametrů obrazu a chlazení od uživatele, vytváření požadavků na vytvoření snímku s danými parametry a jejich uložení v počítači spolu s postupným skládáním. Uživatel může všechny potřebné parametry ovlivňovat v okně programu, viz 8.2. PC komunikuje s RPi přes rozhraní Ethernet za pomoci protokolu TCP. Chování programu lze vidět ve vývojovém diagramu, viz 8.1.

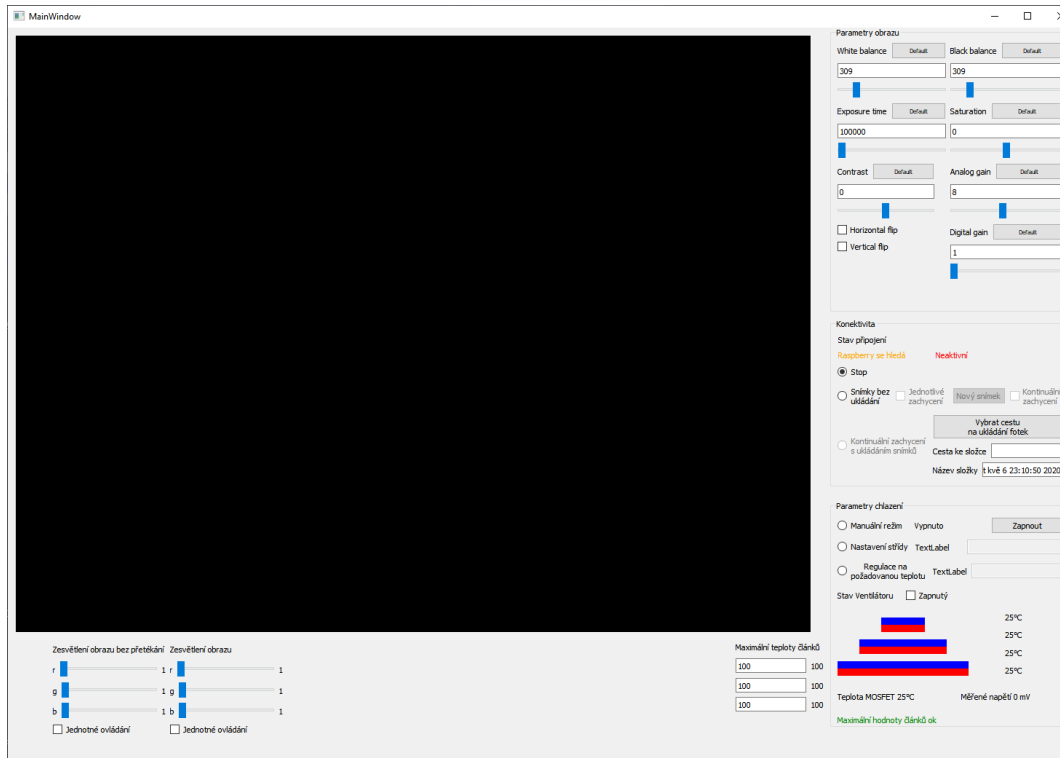
Program je vytvořený v jazyce C++ ve vývojovém prostředí Qt. Výběr tohoto prostředí jsem učinil v rané fázi práce, kdy jsem hledal dostatečně uživatelsky přívětivé vývojové prostředí s dostatečnými prostředky pro výtvar PC programu. V této fázi jsem ještě předpokládal, že vytvořím svůj vlastní kamerový modul, který s počítačem bude komunikovat prostřednictvím UARTu. Hledal jsem tedy vývojové prostředí s takovým programovacím jazykem, který by dovoloval rychlé zpracování příchozích zpráv. Rozhodující parametr byl maximální Baud rate, se kterým lze otevřít sériový port. Python a C# byly na Windows softwarově limitovány, u Qt jsem narazil na fyzický limit



Obrázek 8.1: Vývojový diagram řídicích programů

u USB-UART převodníku. Qt jsem tedy zvolil z tohoto důvodu. Další výhody Qt spočívají v jednoduchém konstruování událostmi řízené architektury programů. Program tedy neobsahuje nekonečné smyčky, které zneefektivňují chod programu. Místo nich používá signály, které se emitují při uživatelském vstupu, nebo emitováním v ostatních částech kódu. Signály jsou napojeny na sloty, což mohou být klasické funkce. Po emitování signálu se vykoná funkce napojená na slot. Po jejím vykonání procesor přejde do non-busy waiting stavu, kdy vykonává ostatní činnosti.

Samotný program využívá dvou vláken. První se stará o sběr požadovaných parametrů obrazu a chlazení od uživatele spolu s vykreslováním okna uživatelského prostředí a zpracovávání přijímaných snímků. Druhé vlákno obstarává komunikaci přes TCP protokol. Pro sdílení dat mezi vlákny jsem použil signálů, které Qt nabízí. Uživatelský vstup je proveden většinou pomocí základních nástrojů, jako jsou textové boxy, tlačítka a posuvníky. Pro vykreslování obrazu nabízí Qt relativně rozšířené možnosti. Pro účely tohoto



Obrázek 8.2: Uživatelské prostředí počítačového programu

projektu jsem využil třídu QImage a formát obrazu RGB32. Jeden pixel obrazu tedy představuje čtveřici 8-bitových čísel odpovídající propustnosti a 3 jasovým složkám barev červená, zelená a modrá. Qt také nabízí vlastní implementaci TCP socketu, kterou jsem i použil. Pro použití TCP jsem se rozhodl díky jeho zaručené spolehlivosti.

Skládání několika snímků jsem implementoval sečtením jasových složek RGB s ohledem na přetékání 8-bitového číselného typu. Pro účely prvotního nastavení dalekohledu jsem přidal možnost aktuálně vykreslovaný snímek barevně upravit tak, aby byly lépe vidět případné astronomické objekty. První způsob spočívá ve vynásobení jasové složky určitým číslem s ohledem na přetékání datového typu. Druhý způsob přetékání ignoruje. V obou případech je výsledkem obraz, který neodpovídá realitě, ale jsou v něm vidět obrysy předmětů, které by bez úpravy obrazu nebyly vidět. Uživatel tak může upravit orientaci dalekohledu tak, aby upravit polohu snímaného objektu na ploše obrazovky, případně může upravit další parametry kamery.

## 8.2 Program v Raspberry Pi

Pro užití v tomto projektu je na RPi instalovaný operační systém Raspbian, což je systém odvozený z Debianu. Funguje na něm tedy Linuxová verze Qt. Stejně jako program v PC je tedy i program pro Raspberry Pi vytvořený ve vývojovém prostředí Qt. To značně urychlilo vývoj programu, protože část programu zodpovědná za komunikaci je v počítači a RPi shodná.

V raných fázích projektu jsem pro využívání kamerového modulu používal neoficiální funkci `raspiraw`. Tato funkce umožňuje přístup k neupraveným datům ze senzoru. Můj původní plán obsahoval implementaci demozaikování obrazu, spolu s implementací vlastních funkcí pro korekci "lens shading" a "black level". Tyto funkce za normálních podmínek provádí ISP umístěný v senzoru kamery. Manuální implementací jsem ale chtěl zajistit potenciálně kvalitnější výsledky, protože jsem předpokládal, že použité algoritmy nepočítají s chlazením senzoru a mohou být "více agresivní" co se týče potlačení šumu v obraze.

Funkce `raspiraw` ale neumožňovala délku snímání obrazu delší než zhruba 1.2 s. Pro prodloužení doby snímání do 10 s by bylo potřeba manuálně nastavit určité registry senzoru. Pro identifikaci registrů by bylo potřeba využít data-sheetu senzoru. Alternativní metoda by byla využití oficiální funkce `raspistill` nebo `raspiyuv`, které umožňují 10 s snímání obrazu nativně. Ke kamerovému modulu by se následně připojil analyzátor I2C sběrnice, která je využívána pro komunikaci mezi kamerovým modulem a Raspberry Pi. Přes analyzátor by se následně zjistila potřebná čísla registrů. Vzhledem k časové náročnosti obou dvou metod jsem se ale rozhodl využít už zpracovaných snímků z oficiálně podporované funkce `raspiyuv`. V až pozdějších etapách práce ale vyšlo najevo, že funkce `raspistill` nepřímo umožňuje obrazový výstup v neupravené podobě. V době zjištění tohoto faktu ale už nezbýval čas na implementaci výše zmíněných funkcí pro korekci obrazu.

Obvyklým výstupem funkce `raspiyuv` jsou snímky ve formátu jpeg. Pro co nejlepší zachování kvality snímků jsem využil jeho funkci výstupu obrazu před zkomprimováním do tohoto formátu. Výstup z této funkce je ve formátu trojic osmibitových čísel odpovídající jasovým složkám RGB. Výsledný soubor obsahuje  $3296 \cdot 2480 \cdot 3 \cdot 8$  bitů, zabírá tedy zhruba 24 Mb.

Program se skládá ze tří vláken. První vlákno se stará o komunikaci přes TCP a přeposílá případné požadavky od PC do ostatních vláken. Druhé vlákno se stará o pořizování snímků z kamerového modulu s parametry, které zadal uživatel. Tyto snímky poté vrací zpět vláknu obstarávající TCP komunikaci. Třetí vlákno obstarává komunikaci přes UART, přes který je RPi

spojeno s mikrokontrolérem. Tyto zprávy sestávají z typu zprávy a zprávy samotné.

## 8.3 Program v mikrokontroléru

Mikrokontrolér STM32F401RE lze programovat v jazyce C nebo Assembleru. V tomto projektu jsem se rozhodl využít jazyka C s tím, že potenciální ztráta výkonu proti Assembleru vynahradí uživatelská přívětivost C. Použitím C jsem mohl využít i program STM32CubeMX, který slouží pro základní inicializaci periférií mikrokontroléru, jako jsou jeho analogové vstupy a časovače. Pro obsluhu vstupů a výstupu mikrokontroléru jsem upřednostnil nabízené HAL ovladače před LL ovladači, opět z důvodů uživatelské přívětivosti.

Během programování jsem se snažil co nejvíce využít přerušeni a periférie procesoru. Pro přijímání znaků z UART používám DMA, generování PWM signálu probíhá přes časovače, kontinuální měření napětí a jeho průměrování probíhá přes DMA a přerušeni. Hlavní smyčka programu obsahuje přepočtení měřeného napětí na termistorech na teplotu pomocí vzorce uvedeného v data-sheetu použitého termistoru [1], u kterého zanedbávám člen  $D_1 \ln^3 \frac{R}{R_{ref}}$ , jehož vliv je menší, než  $0.1^\circ\text{C}$ . Výsledný vzorec má tedy tvar

$$T = (3.354 \cdot 10^{-3} + 2.909 \cdot 10^{-4} \ln \frac{R}{R_{ref}} + 1.632 \cdot 10^{-6} \ln^2 \frac{R}{R_{ref}})^{-1} \quad (8.1)$$

V případě použití automatického režimu chlazení mikrokontrolér nastavuje střidu PWM signálu, který ovládá spínání výkonového regulátoru, podle PI regulátoru. PI regulátor jsem zvolil z důvodu eliminace regulační odchylky. Během návrhu jsem předpokládal, že průběh teploty bude dostatečně pozvolný na to, aby regulátor nemusel obsahovat dynamiku-vylepšující derivační složku. Realizace regulátoru je podobná pseudokódu z [11]. Vzhledem k tomu, že jsem neměl k dispozici regulovaný systém během realizace regulátoru, jeho parametry zřejmě nebudou ideálně vyladěny. Protože tyto parametry regulátoru jsou ale ve formě proměnných v kódu mikrokontroléru, jejich případná změna je jen otázkou změny vnitřní proměnné.

Funkčnost programu byla ověřena pomocí jednoduchého zapojení využívající nepájivé pole. Výkonové tranzistory byly nahrazeny pro snadnější kontrolu funkce LED diodami a 1 termistor je nahrazený potenciometrem pro simulaci změny teploty.

## Kapitola 9

### Konstrukce těla kamery

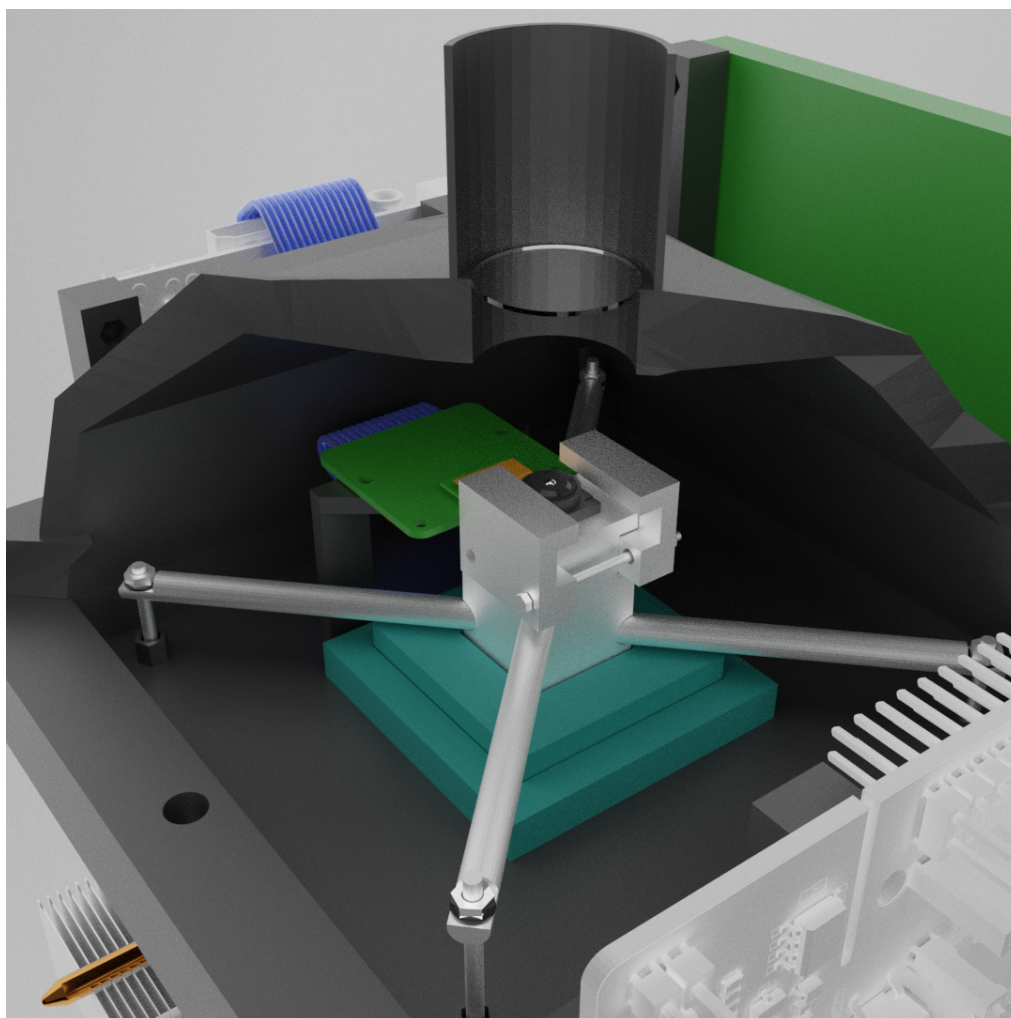
Tělo kamery by mělo být schopné pojmout všechny dílčí komponenty kamery, tedy plošné spoje obsahující spínací tranzistory, mikrokontrolér a RPi. Dále by mělo nabídnout dostatečné rozdělení studené a horké části Peltierových článků, spolu s hermetickým uzavřením chlazeného prostoru a následným naplněním tohoto prostoru inertním plynem z důvodu omezení tvorby námrazy na ploše senzoru. V rámci projektu jsem vypracoval 3D model, který lze vidět na obr. 9.1 a 9.2), který by měl obsahovat všechny základní části. Bohužel jsem z časových důvodů nemohl samotnou konstrukci fyzicky vyrobit a odzkoušet.

Pro způsob přichycení článků jsem použil podobný způsob, který použil M. Hendrych [10] ve své práci. Na konec kovového bloku, který je spojený se studenou částí nejchladnějšího Peltierova článku, se přitiskne obrazový snímač, který se zde usadí pomocí 2 upevňovacích bloků, jak lze vidět v obr. 9.2. Pro zlepšení tepelné výměny mezi chladičem a senzorem se mezi ně umístí vrstva teplovodivé pasty. Stejně jako v práci M. Hendrycha [10], tepelné odizolování studené části Peltierových článků je realizováno pomocí nylonových průchodek.

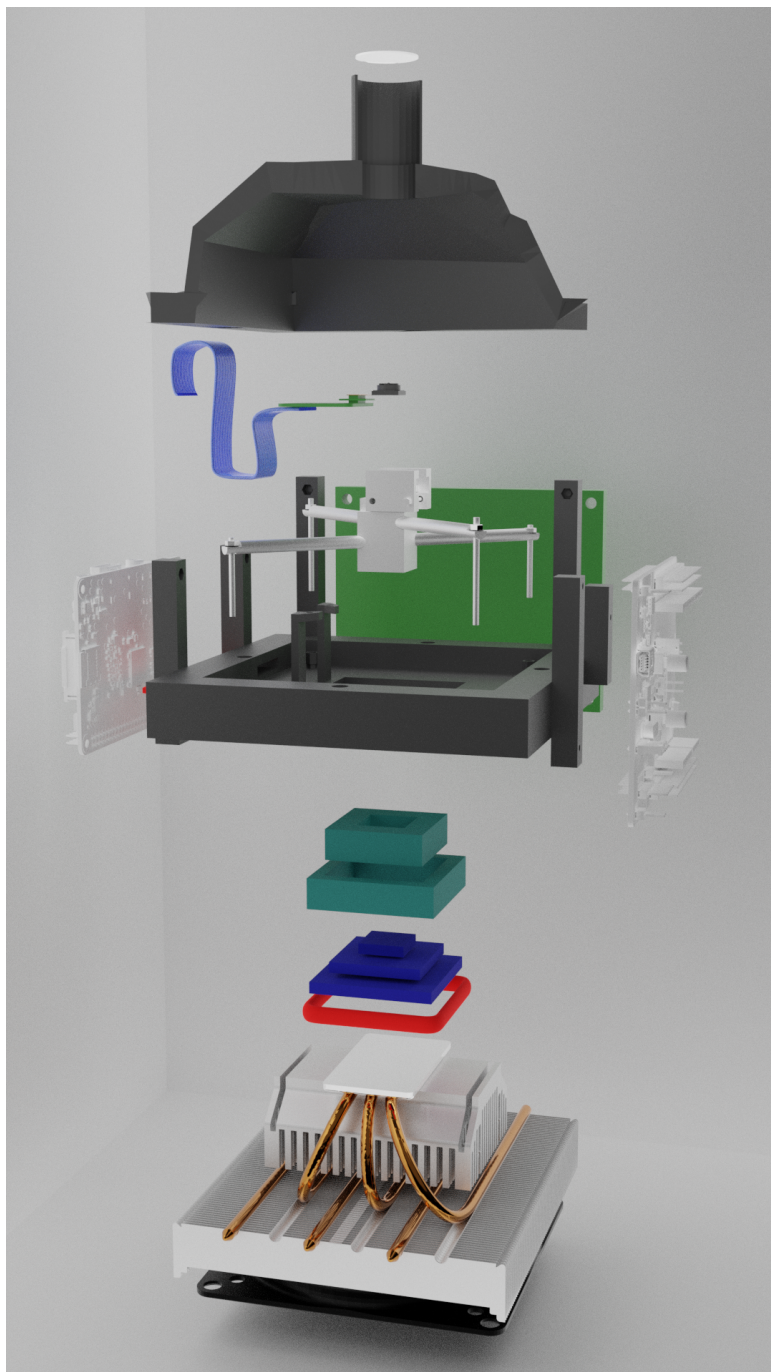
Zeleno-modrý materiál představuje izolaci, která má zabránit šíření tepla z Peltierových článků do chladného prostoru. Černý materiál představuje části kamery, které by mohly být vytisknuty na 3D tiskárně. 2 bílé desky po stranách kamery představují mikrokontrolér a RPi. Kamerový modul je připojený k RPi přes modrý kabel, který je provlečen přes otvor v kameře, který je následně díky hermetickému uzavření vyplněn těsnící hmotou, např. silikonem, na obrázcích červeně. Stejná těsnící hmota je využita pro utěsnění otvoru mezi horkou částí Peltierových článků a plastovým tělem kamery. Přilepené sklíčko zase utěsní otvor, který je použit pro montáž kamery k dalekohledu. Použitý chladič je stejný, jako byl použit v práci Z. Bednáře [8]. Rozteče otvorů pro upevnění chladiče jsou ale zvolené tak, aby bylo možné

použít libovolný chladič určený pro chlazení procesorů v osobních počítačích s patičí Intel LGA115x. Modely desek RPi, Nuclea a chladiče byly převzaty z [3], [2] a [5].





**Obrázek 9.1:** Průřez kamery v konečném stavu



**Obrázek 9.2:** Průřez kamery s viditelnými dílčími částmi



## Část III

### Závěr

Zadání této práce bylo:

- Na základě prvotního výzkumu vyberte vhodný snímač optického záření pro kameru pro astronomická pozorování. Navrhněte a realizujte přístroj, který umožní snímání záření s nízkou úrovní fotonového toku a snížení rušivého šumu v obraze. Předpokládá se chlazení a udržování systému pomocí Peltierových článků na teplotě  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Systém by měl umožňovat dlouhodobé sledování objektu a možnost integrace výsledků z více zachycených snímků.
  - Finální výběr senzoru byl ovlivněn dostupností senzorů a omezenými lidskými prostředky. Pokud mnou vybraný senzor nebude vyhovovat, díky určité modularitě kamery ho lze vyměnit za verzi zmíněnou v kapitole 4. Protože ale na trhu existují astronomické kamery se senzory, které jsou méně citlivější než senzor Sony IMX219, nemyslím si, že tento výběr je vyloženě špatný. Návrh chlazení jsem z větší části převzal z práce Z. Bednáře [8]. Při integraci chlazení do těla kamery jsem se snažil co nejlépe zachovat podmínky, za kterých byly Peltierovy články provozovány. Použité chlazení by tímto mělo být už ověřené. Pokud by se ale ukázalo, že z jakéhokoliv důvodu nelze dosáhnout požadované teploty, modularita kamery umožňuje využití výkonnějšího chladiče a případné zvýšení proudu dodávaného do Peltierových článků. Řídící programy dále umožňují dlouhodobé sledování objektu, které je omezené jen velikostí úložiště, na které se ukládají jednotlivé fotografie. Skládání jednotlivých fotografií ale ničím omezené není.
- Proveďte ověřovací měření přístroje.
  - Kvůli organizačním a časovým důvodům toto měření nemohlo proběhnout, protože nebyl k dispozici funkční fyzický model kamery. Vlastnosti PI regulátoru nebylo možné ověřit s reálnými Peltierovými články, protože jsem v jednu chvíli neměl k dispozici dostatečné napájení Peltierových článků, dostatečný chladič a způsob měření teploty. Jak jsem ale uvedl v 7.3, případné správné nastavení potřebných parametrů je vzhledem ke způsobu provedení regulátoru jednoduché. Programy obstarávající zachycování snímků jsem ale dostatečně vyzkoušet a fungují podle očekávání.

Pro další vylepšení kamery bych se zaměřil na zmenšení plošného spoje s výkonovou elektronikou a zároveň na integraci mikrokontroléru STM32

do jedné desky. Výsledný plošný spoj by se následně mohl vložit přímo do těla kamery za předpokladu, že nezanikne výhoda v univerzálních montážních otvorech chladiče. Pro jednodušší ovládání kamery bych se dále snažil zakomponovat řídicí program z PC do programu RPi s tím, že by se PC obrazovka dala nahradit kompaktním dotykovým displejem, který lze s RPi používat.



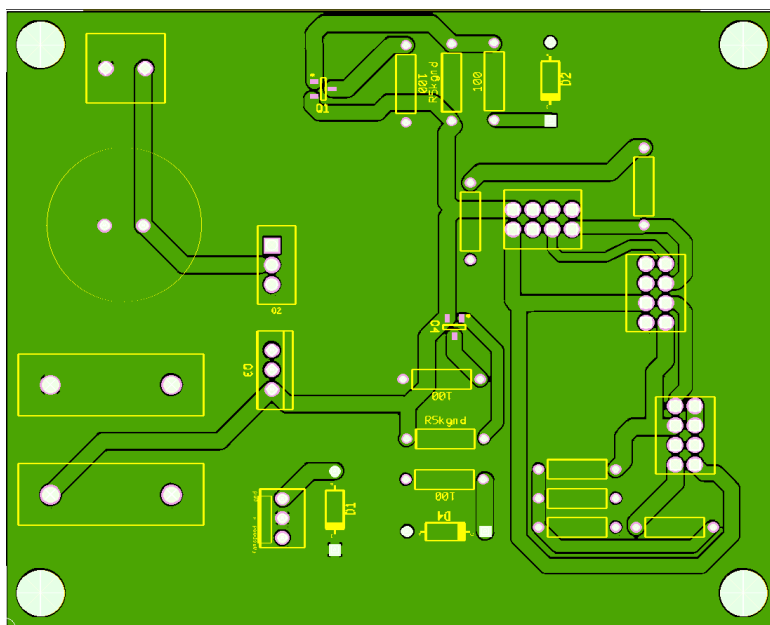
## Literatura

- [1] *Datasheet k ntc termistoru*. [http://www.farnell.com/datasheets/2792960.pdf?\\_ga=2.248436996.2072717689.1589843519-970457648.1588779512](http://www.farnell.com/datasheets/2792960.pdf?_ga=2.248436996.2072717689.1589843519-970457648.1588779512), citováno dne: 21.05.2020.
- [2] *Nucleo board 3d model*. <https://grabcad.com/library/nucleo-board-1>, citováno dne: 21.05.2020.
- [3] *Raspberry pi 3d model*. [https://grabcad.com/library/raspberry-pi-3-model-b-reference-design-solidworks-cad-raspberry-pi-raspberrypi-rpi-1/details?folder\\_id=3899995](https://grabcad.com/library/raspberry-pi-3-model-b-reference-design-solidworks-cad-raspberry-pi-raspberrypi-rpi-1/details?folder_id=3899995), citováno dne: 21.05.2020.
- [4] *Raspberry pi camera v2.1*. [https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/schematics/rpi\\_SCH\\_Camera2\\_2p1.pdf](https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/schematics/rpi_SCH_Camera2_2p1.pdf), citováno dne: 21.05.2020.
- [5] *Scythe shuriken 3d model*. <https://grabcad.com/library/scythe-shuriken-1>, citováno dne: 21.05.2020.
- [6] *Spectral response*. <https://vitalvisiontechnology.com/gige-cameras/alliedvision-gige-cameras/mako-g-234/#1508769203756-034c13ce-488a>, citováno dne: 21.05.2020.
- [7] R. BAROŇ, *Principy chlazení, chladící zařízení v průmyslu komerční bezpečnosti*, 2012.
- [8] Z. BEDNÁŘ, *Analýza vlastností soustavy Peltierových článků*, 2016.
- [9] FLIR, *Machine vision sensor review*. <https://www.flir.com/landing/iis/machine-vision-camera-sensor-review/>, citováno dne: 21.05.2020.

- [10] M. HENDRYCH, *Analýza vlastností kaskády Peltierových článků*, 2017.
- [11] D. KOHANBASH, *Pid control (with code), verification, and scheduling*. <http://robotsforroboticists.com/pid-control/>, citováno dne: 21.05.2020.
- [12] E. ORBACH, *debayering raspberry pi camera (monochrome mod)*. <http://eladorbach.blogspot.com/2016/05/debayering-raspberry-pi-camera.html>, citováno dne: 21.05.2020.
- [13] T. YORK, *Fundamentals of image sensor performance*. <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse567-11/ftp/imgsens/>, citováno dne: 21.05.2020.

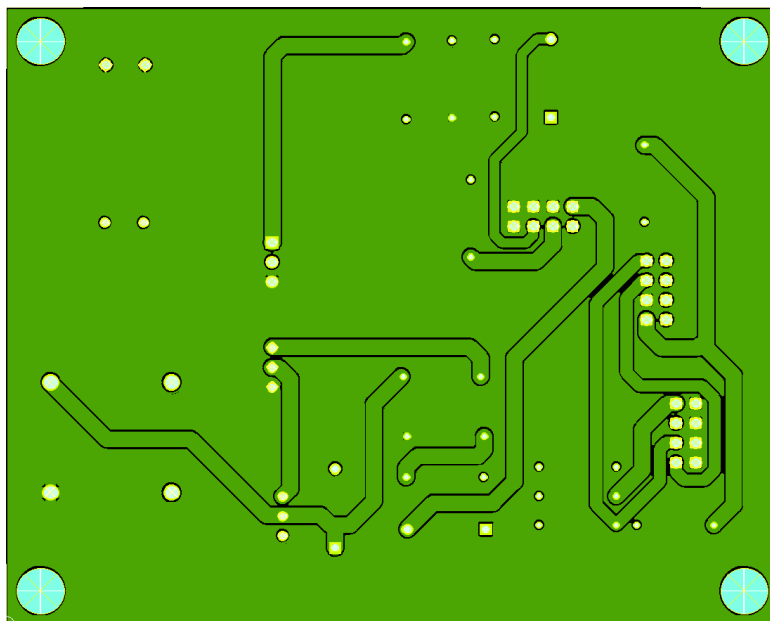
# Kapitola 10

## Přílohy

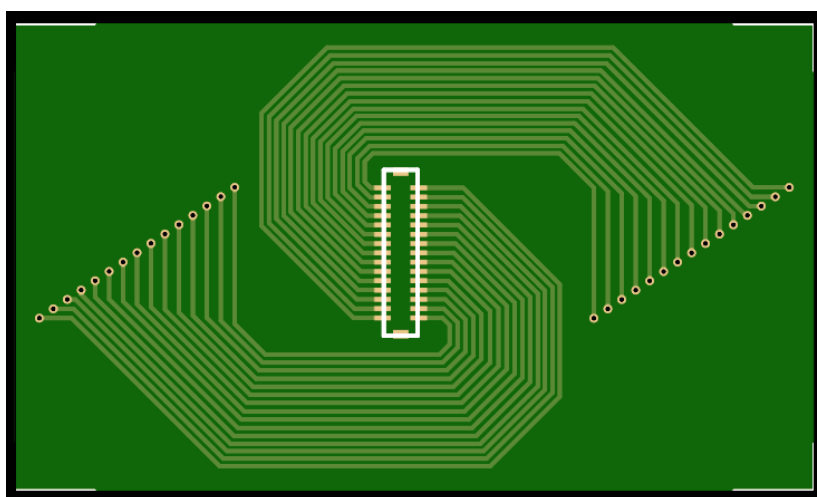


Obrázek 10.1: Horní strana hlavního plošného spoje

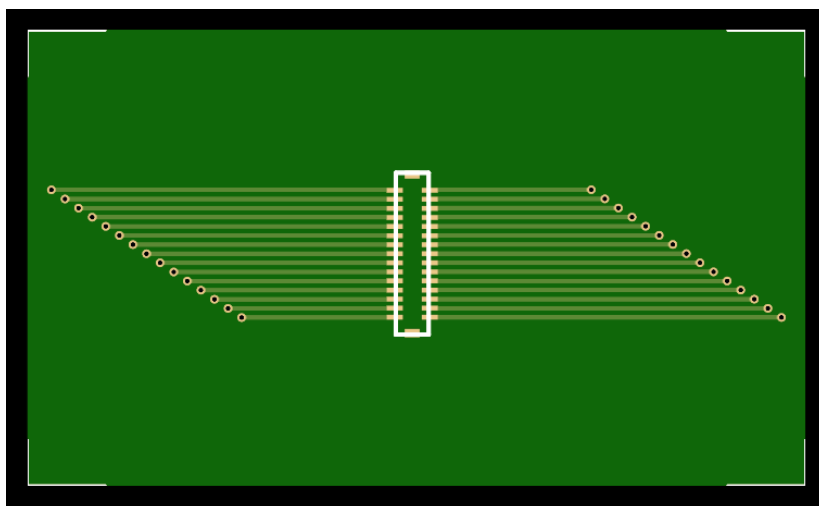




**Obrázek 10.2:** Dolní strana hlavního plošného spoje



**Obrázek 10.3:** Dolní strana plošného spoje pro otočení konektoru



**Obrázek 10.4:** Horní strana plošného spoje pro otočení konektoru