



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

AUTOMATIZOVANÝ ASTRO-TRACKER

AUTOMATED ASTRO-TRACKER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Majerník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Tomáš Majerník

ID: 247040

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Automatizovaný astro-tracker

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou motorizovaných astro-trackerů a jejich periferií. Navrhněte automatizovaný tracker na bázi raspberry pi s příslušnými periferiemi, a možností rozšířit o pokročilou optiku a ostření. Systém by měl komunikovat s otevřenými platformami jako je Stellarium aj. a měl by být mobilní. Celé zařízení otestujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 5.6.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem motorizovaného astro-trackeru na bázi platformy Raspberry Pi. Cílem je vytvořit systém schopný přesného sledování nebeských těles s využitím krokových motorů, senzorů zpětné vazby a komunikace s otevřenými platformami, jako je Stellarium.

Klíčová slova

astro-tracker, Raspberry Pi, krokové motory, optika, zaostření, Stellarium, motorizace

Abstract

The work focuses on the design of a motorized astro-tracker based on the Raspberry Pi platform. The aim is to develop a system capable of accurately tracking celestial objects using stepper motors, feedback sensors, and communication with open platforms such as Stellarium.

Keywords

astro-tracker, Raspberry Pi, stepper motors, optics, focusing, Stellarium, motorization

Bibliografická citace

MAJERNÍK, Tomáš. *Automatizovaný astro-tracker*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr VYROUBAL, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Tomáš Majerník</i>
VUT ID studenta:	<i>247040</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2024/25</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Automatizovaný astro-tracker</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 5. června 2025

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a trpělivost při zpracování této bakalářské práce. Děkuji také za inspiraci a podporu, která byla neocenitelná během celého procesu tvorby této práce.

V Brně dne: 5. června 2025

podpis autora

Obsah

ÚVOD	9
1 ASTRO-TRACKER A VYUŽITÍ.....	10
2 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM	12
2.1 AZIMUTÁLNÍ MONTÁŽ	12
2.2 PARALAKTICKÁ MONTÁŽ.....	13
2.3 POROVNÁNÍ AZIMUTÁLNÍ A PARALAKTICKÉ MONTÁŽE.....	14
3 KOMPONENTY ZAŘÍZENÍ.....	15
3.1 ŘÍDICÍ JEDNOTKA	15
• <i>Raspberry Pi</i>	15
• <i>Controller Board</i>	15
3.2 POHYBOVÉ APARÁTY.....	16
• <i>Krokové motory</i>	16
• <i>Drivery</i>	16
3.3 SENZORY	17
• <i>Gyroskop</i>	17
• <i>Magnetometr</i>	18
• <i>Global Positioning System</i>	18
3.4 NAPÁJENÍ	18
• <i>USB Power Delivery</i>	18
4 OPTIKA	20
4.1 TYPY OPTICKÝCH SYSTÉMŮ.....	20
• <i>Refraktory (čočkové dalekohledy)</i>	20
• <i>Reflektory (zrcadlové dalekohledy)</i>	21
• <i>Katadioptrické systémy</i>	21
4.2 PŘIBLIŽOVÁNÍ	21
4.3 OSTŘENÍ	22
4.4 OPTIKA PRO ASTRO-TRACKING	22
5 SOFTWAREVÉ PLANETÁRIUM.....	23
5.1 STELLARIUM.....	23
6 SHRnutí TEORETICKÉ ČÁSTI.....	24
7 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	25
• <i>Hlavní cíl</i>	25
• <i>Elektronický návrh</i>	25
• <i>Napájení a mobilita</i>	25
• <i>Požadavky na uživatelskou zkušenost</i>	25
8 NÁVRH ZAŘÍZENÍ	26
8.1 KONCEPT ELEKTRONICKÉHO SYSTÉMU	26
8.2 NÁVRH ELEKTRONICKÉ ČÁSTI	27

•	Řídicí jednotka	27
•	Krokové motory a řadiče	27
•	Senzory.....	28
•	Kamera	29
•	Napájení.....	29
8.3	ASTRO MONTÁŽ.....	29
9	REALIZACE PŘÍSTROJE.....	31
9.1	ELEKTRONIKA	31
•	Řadič USB C.....	31
•	Napájení řídicí jednotky a motorů	32
•	Deska plošného spoje	33
9.2	KONSTRUKCE	34
•	Osa azimutu	35
•	Osa elevace.....	36
9.3	SOFTWARE.....	37
•	Ovládání TMC2209 driverů.....	37
•	Zpracování obrazu z kamery a jeho živý přenos.....	38
•	Podpora pro nastavování parametrů kamery	38
•	Uživatelské rozhraní (UI)	38
•	Komunikace s astronomickým programem Stellarium	39
•	Automatizované řízení a přesnost pohybu	40
•	Senzorika	40
10	SHRNUTÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI	41
11	ZÁVĚR.....	43
	LITERATURA.....	44
	SEZNAM OBRÁZKŮ	46
	SEZNAM TABULEK.....	47
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	49

ÚVOD

Astrofotografie je fascinující obor, který propojuje vědu a umění s cílem zachytit krásu vesmírných objektů, jež jsou lidskému oku často neviditelné. Tento proces však přináší jedinečné výzvy, především kvůli slabému světlu hvězd a rotaci Země, která způsobuje zdánlivý pohyb nebeských těles. K překonání těchto překážek se využívají astro-trackery, zařízení navržená pro přesné sledování nebeských objektů a kompenzaci pohybu Země, což umožňuje vytvoření ostrých a detailních snímků i při dlouhých expozičních časech.

Cílem této práce je prozkoumat problematiku motorizovaných astro-trackerů a jejich periferií a navrhnout koncept automatizovaného astro-trackeru založeného na platformě Raspberry Pi. Návrh zahrnuje základní prvky, jako jsou krokové motory, senzory a systémy pro automatizované ostření optiky. Významnou částí je také integrace systému s otevřenými platformami, jako je Stellarium, které umožní snadné plánování a řízení sledování nebeských těles.

Hlavním přínosem této práce je návrh cenově dostupného a uživatelsky přívětivého zařízení, které zjednoduší proces astrofotografie a nabídne všestranné využití v amatérské i profesionální astronomii.

1 ASTRO-TRACKER A VYUŽITÍ

Astro-trackery představují nepostradatelný nástroj pro zachycení krásy vesmíru prostřednictvím astrofotografie, která umožňuje detailní snímání hvězd, mlhovin a dalších nebeských objektů. Tyto přístroje kompenzují pohyb způsobený rotací Země, což je nezbytné pro vytváření ostrých a jasných snímků při dlouhých expozičních časech. Díky této technologii mohou fotografové i vědci zachytit fascinující detaily vzdálených objektů, které jsou lidskému oku běžně skryty.



Obrázek 1.1: Astronomy Picture Of the Day NASA 9.12.2024 [1]

Dlouhé expozice však kladou vysoké technické nároky na technické vybavení. Fotoaparáty s možností manuálního nastavení a objektivy s vysokou světelností jsou samozřejmostí. Při použití dalekohledů nebo teleobjektivů, které poskytují potřebné přiblížení, je důležité zajistit také stabilitu a přesnost pohybu zařízení. Vzhledem ke skutečnosti, že Země rotuje, se hvězdné objekty na obloze zdánlivě pohybují. To může vést k rozmazání snímků (star trail [1]), pokud není tento pohyb kompenzován.

Zařízení, která dokáží tento pohyb sledovat a kompenzovat, se nazývají astro-trackery. Jejich hlavní funkcí je pohyb v půlkulovém prostoru s vysokým rozlišením, často až v řádech tisícín úhlových sekund. Díky tomu jsou schopny přesně sledovat pohyb nebeských těles a umožnit ostré a detailní snímky i při velmi dlouhých expozicích a velkém přiblížení. Mechanicky je astro-tracker zařízením se dvěma stupni volnosti. První stupeň zajišťuje otáčení kolem osy Z, což si lze představit jako pohyb sledující horizont. Druhý stupeň pak umožňuje naklánění nahoru a dolů. Tuto základní konfiguraci je možné dále rozšířit, například přidáním možnosti přesného zarovnání osy Z s osou rotace Země. To zvyšuje přesnost sledování, ale také složitost konstrukce a obsluhy zařízení.

Astro-trackery jsou tedy zařízení navržená především pro přesné sledování nebeských těles a kompenzaci pohybu způsobeného rotací Země. Díky schopnosti pohybu s vysokým rozlišením umožňují stabilní zaměření na zvolený objekt i při velkém přiblížení. To z nich činí klíčovou součástí vybavení nejen pro astrofotografii, ale i pro další oblasti, kde je přesnost a stabilita při sledování klíčová, například při astronomických pozorováních nebo vědeckém měření. V praxi tak napomáhají nejen zachování ostrosti obrazu, ale i získání spolehlivých dat z dlouhodobých pozorování.

Navzdory své užitečnosti nejsou astro-trackery snadno dostupné. Mnoho modelů je drahých, náročných na montáž i obsluhu, proto jejich efektivní využití často vyžaduje další vybavení, jako je dalekohled nebo fotoaparát s vhodným objektivem. Přesto zůstávají klíčovým nástrojem pro všechny, kteří se chtějí věnovat zachycování tajemství noční oblohy a objevovat vzdálené kouty vesmíru.

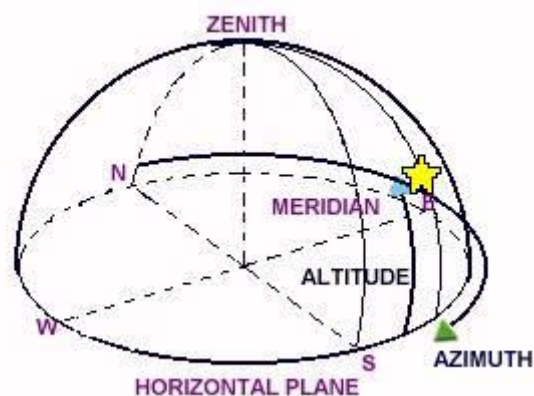
2 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM

Jak již bylo zmíněno, zařízení kompenzuje pohyb zeměkoule. Přesněji tedy rotace Země okolo její vlastní osy. Tento pohyb způsobuje, že ačkoliv samotný posun těles na obloze pouhým okem běžně nevidíme, je potřeba jeho vliv kompenzovat, hlavně při pozorování vzdálených objektů s velkým přiblížením.

Používané montáže nebo mechanismy pracují ve sférických souřadnicích, každá ale na jiném souřadnicovém systému, který má své výhody a nevýhody.

2.1 Azimutální montáž

První takovou montáží je azimutální. S tím souvisí použití azimutálního souřadnicového systému, někdy také nazývaného jako obzorníkového. Tuto soustavu lze popsat jako levotočivou a topocentrickou soustavu, která je závislá a plně vázána na stanoviště pozorovatele.



Obrázek 2.1: Azimutální souřadnice [2]

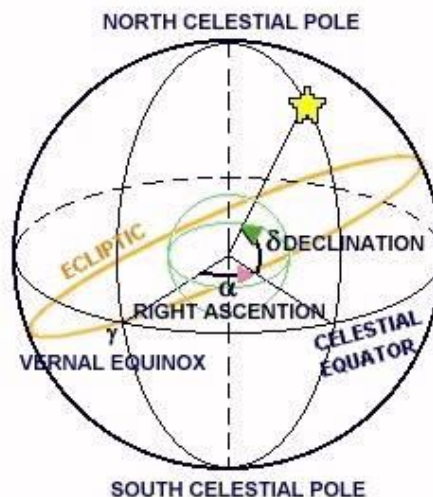
Prvním krokem je vytvoření roviny ideálního horizontu, která je zároveň rovinou azimutálního systému v místě pozorovatele. V případě pohybu sledovaného objektu po horizontu máme azimutální osu a azimutální souřadnici charakterizující její polohu. Tato souřadnice může nabývat hodnot od 0° do 360° . Druhá souřadnice je výška nad azimutem, tedy elevace, která je závislá podle výškové osy. Ve většině může tato souřadnice nabývat hodnot od 0° do 90° , teoreticky i záporných hodnot, ale objekty se zápornou souřadnicí běžně nelze v praxi pozorovat. Pro zjednodušení lze použít analogii. Azimut představuje kompas světových stran. Elevaci lze pozorovat, například jak vysoko se nachází slunce nebo měsíc.

Výhodou konstrukce založené na azimutálních souřadnicích, která se velmi často využívá u velkých dalekohledů v planetáriích a pozorovatelkách, je schopnost umožnit pohyb velmi rozměrných a těžkých dalekohledů, a také její vhodnost pro pozemní pozorování.

Má ale také spoustu nevýhod, jednou z nich je pohyb os, které jsou nelineární. Znamená to větší komplexnost na řízení pohybových aparátů, které musí neustále upravovat jejich rychlost a přesnost. Další velkou nevýhodou je otáčení sledovaného objektu. Je tak zapříčiněna horší zpracovatelnost snímků při jejich proložení a získání tak vyšších detailů.

2.2 Paralaktická montáž

Další montáží je paralaktická, která využívá rovníkové soustavy. Oproti azimutální soustavě je rovníková časově nezávislá, nebo se mění jen minimálně. Její charakteristickou vlastností je rovnoběžnost osy otáčející se roviny s osou zemského rovníku. Díky této vlastnosti mohou paralaktické montáže obsluhovat požadavky sledovaného objektu pouze na jedné ose, které budou sledovat objekt stejnou rychlostí, jakou se objekt pohybuje na noční obloze.



Obrázek 2.2: Rovníkové souřadnice [2]

Základní rovinou této soustavy je zemský rovník. Vztažným bodem je Jarní bod, který je tvořen společnou polopřímku roviny světového rovníku a roviny ekliptiky. V tomto bodě se v přesném okamžiku rovnodennosti nachází Slunce. Ačkoli bylo uvedeno, že tato soustava zůstává neměnná, Jarní bod se v dlouhodobém časovém horizontu mění a bude se měnit i nadále, jedná se však o proces trvající stovky let.

Pro určení pozice je tedy důležitý vztažný Jarní bod. Od něj se měří v protisměru hodinových ručiček délková souřadnice rektascenze, která může nabývat hodnot 0° až 360° . Šířkovou souřadnicí je deklinace v rozmezí hodnot od -90° do $+90^\circ$.

Paralaktická montáž je svými vlastnostmi ideální montáží pro sledování nebeských objektů pomocí kamer, fotoaparátů a různých senzorů. Mechanismy použité pro fungování v rovníkových souřadnicích odstranily neduhy azimutální montáže, a to je například otáčení sledovaných objektů.

Lze tak používat dlouhé expozice a získané snímky není potřeba nijak otáčet pro prolnutí vícero snímků. Při správně nastavené montáži byla nelineárnost pohybů os odstraněna, je kompenzováno pouze otáčení Zeměkoule, které se v čase nemění (v krátkém časovém horizontu). Nesmí se opomenout ani třetí osa, která slouží k zarovnání s osou zemského rovníku – to však zvyšuje nároky na mechanickou složitost montáže.

Informace pro předchozí podsekcce byly převzaty z [3; 4]

2.3 Porovnání azimutální a paralaktické montáže

Přestože paralaktická montáž poskytuje lepší kompenzaci rotace Země a je ideální pro astronomická pozorování, azimutální montáž nachází své místo v některých aplikacích díky své jednoduché konstrukci a vysoké nosnosti. Tento typ montáže je účinný tam, kde je kladen důraz na mechanickou robustnost a nižší nároky na prostor. Ačkoliv azimutální montáže nekompensují pohyb oblohy tak dobře jako paralaktické, v praxi bývají upřednostňovány pro svou jednoduchost, což je činí vhodnými pro konstrukce s omezeným prostorem nebo tam, kde není potřeba vysoce sofistikovaná korekce pohybu objektů. Tato výhoda paradoxně vede k jejich širšímu využití i v případech, kdy by se zdálo, že paralaktická montáž je lepší volbou.

Tabulka 1: Porovnání vlastností astronomických montáží

	Azimutální montáž	Paralaktická montáž
Poloha pozorovatele	Závislá	Nezávislá
Časově proměnná	Ano - velice	Ne - minimálně
Katalogizace objektů	Ne	Ano
Pozemní pozorování	Ano	Ne
Linearita pohybu os	Ne	Ano
Počet proměnlivých os	2	1 (při správném nastavení)

3 KOMPONENTY ZAŘÍZENÍ

V minulé kapitole byla sepsána hlavně mechanická stránka. Automatizované pozorování však vyžaduje také propracovanou elektroniku – zejména řídicí jednotku, pohonné motory, senzory pro zpětnou vazbu a systémy pro zjišťování polohy, náklonu, směru natočení a dalších údajů, které zvyšují přesnost a efektivitu provozu.

3.1 Řídicí jednotka

Základem je řídicí jednotka obstarávající výpočetní procesy a vstupně/výstupní zařízení. Propojuje moduly senzorů a zařízení, které jsou potřebné pro aplikaci a podle získaných dat rozhoduje dle svého naprogramování o dalších krocích ke splnění požadavku. Může obsahovat bezdrátovou i drátovou komunikaci pro dálkové ovládání, výstup pro zobrazovací zařízení, vstup pro snímací zařízení a jiné. Výběr řídicí jednotky záleží na požadované aplikaci a schopnosti návrhatele.

- **Raspberry Pi**

Raspberry Pi (RPI), známý jednodeskový počítač vyvinutý nadací Raspberry Pi Foundation, který je navržený primárně pro výuku programování a elektroniky [5]. Na trhu je od roku 2012 a od té doby se stal oblíbeným hlavně díky své nízké ceně, kompaktnímu designu, širokým možnostem využití, komunitní podpoře a nepřebornému množství periférií rozšiřující potenciál jednotlivých projektů při jejich rychlém prototypování.

Největší výhodou Raspberry je přítomnost General-Purpose Input/Output (GPIO) pinů, umožňující přímého použití komunikačních sběrnic, jako je I2C, UART a SPI. Dále podpora různého signálového kódování, které může programátor i navrhnout sám od nuly. Společně s výpočetním výkonem, velkou pamětí RAM a rozsáhlou konektivitou, je tento jednodeskový počítač velmi vhodným kandidátem pro tuto aplikaci.

- **Controller Board**

Na druhou stranu se lze podívat na astro-tracker z trochu jiného pohledu. Není-li potřeba širokého spektra podpory různých komunikačních protokolů, výpočetního prostoru a konektivity, lze použít řídicí jednotky určené pro CNC přístroje a tiskárny 3D. Jednou z nich je MKS GEN-L V2.1, která je kombinací desky Arduino Mega 2560 [6] a desky RAMPS 1.4 [7].

Kombinuje tak vlastnosti mikrokontroleru s velmi velkým počtem GPIO, schopností pracovat až 16 MIPS (Millions of Instructions Per Second) při hodinovém taktu 16 MHz, včetně propojovací desky RAMPS obsahující vše potřebné pro řízení několika krokových motorů, napájení tepelných těles pro 3D tiskárny a další očekávané funkce potřebné pro funkčnost těchto zařízení.

3.2 Pohybové aparáty

Existuje celá řada způsobů, jak objekt elektronicky uvést do pohybu. Ať už je to prostý elektromotor s potenciometrem na výstupu, nebo servo motor se schopností se otáčet i nad rozsah 360°. Krokové motory obecně jsou ale pro tuto aplikaci nejvhodnější.

- **Krokové motory**

Jejich vlastnost pohybovat se při velmi malých krocích je zde nepřekonatelná. Hlavně v situaci při malém počtu otáček za sekundu a vysokého budícího proudu lze dosáhnout nemalých točivých momentů. Díky tomu si našly své místo v aplikacích, kde je zapotřebí přesného pohybu a manipulace. Nevýhodou je ale potřeba tyto motory neustále napájet, jelikož při absenci jakéhokoliv převodu motor ztratí svoji pozici a lze je považovat za posunuté. S vysokými proudy souvisí zvýšená povrchová teplota těchto motorů, proto je v krajních případech i nutnost odvodu tepla.

Dalším neduhem je důsledek použití mikro-krokování, kdy jeden krok, který může být například 0,9° se rozdělí na dalších několik kroků, jako například 1/2–1/256 kroku, proto je třeba myslet na to, že dochází ke značnému snížení točivého momentu, a to již při malém krokování, jako je 1/8 kroku.

O chování krokových motorů a jejich parametrů lze napsat samostatnou práci, pro tuto kapitolu bude stačit, že jsou při dobrém výběru vhodné právě díky velkému točivému momentu, schopnosti mikro-krokovat a možnosti přidání senzorů pro kontrolu zpětné vazby úspěšného posuvu.

- **Drivery**

Ovládání motorů zajišťují tzv. drivery neboli řadiče – komponenty, které nastavují proudy v cívkách motoru tak, aby se otáčel požadovaným způsobem. Na trhu si lze tyto drivery rozdělit podle mnoha kritérií. Jedno z nich je, jak probíhá komunikace. Nastavuje se přímo podle pinů, nebo probíhá přenos nastavení po nějaké sběrnici?

Prodávají se dva produkty, které nejsou nastavitelné po sběrnici, a to A4988 a DRV8825, kdy druhý zmíněný driver má lepší parametry, ať už v rozlišení kroků (až 1/32 kroku), tak i v maximálním proudu, který činí 1,5 A bez aktivního chlazení (2,2 A s aktivním chlazením, plně schopen až 2,5 A). [8] Velkou výhodou je nízká cena, ale nevýhodou tohoto řadiče je potřeba mnoho pinů pro nastavení, je-li potřeba nastavit mikro-krokování, směr otáčení, zapnutí motoru, samotný impuls pro provedení kroku, tento modul využije šest pinů bez využití dalších bezpečnostních prvků.

Na trhu jsou k dispozici i chytřejší drivery, proto zde budou zmíněny hlavně drivery od Trinamic Motion Control (zkráceně TMC). Produkty řady TMC 2xxx jsou známé po celém světě díky možnosti komunikace po sběrnici, což výrazně snižuje potřebu využívat GPIO piny mikrokontroleru. Spousta z nich nabízí také zpětnou kompatibilitu v režimu STEP/DIR, který má stejný režim, jaký se využívá pro DRV8825. V aplikacích, kde je potřeba více motorů, jsou drivery TMC upřednostňovány.

Jejich hlavní nevýhodou je v některých případech až pětinasobná cena oproti DRV8825. Za zvýšenou cenu lze ale získat funkce jako je tišší chod motorů, přesnější pohyb mikrokrokováním až 1/256 kroku, zpětné vazby, zda motor nelze dále otáčet, a jiné.

Tabulka 2: Porovnání řadičů DRV8825 a TMC2209

	DRV8825 [8]	TMC2209 [9]
Počet fází	2	2
Max proud [A]	2,5	2,8 (2 A RMS)
Pracovní napětí [V DC]	8,2 – 47	4,75 – 29
Mikrokrokování [μkroky]	2, 4, 8, 16, 32	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256
Režim ovládání	STEP/DIR	STEP/DIR, UART
Obvodové zapojení	GPIO	GPIO, UART
Další funkce	Overcurrent Protection, Thermal Shutdown, VM Undervoltage Lockout, Fault Condition Indication Pin	StealthChop2, StallGuard, SpreadCycle, CoolStep

3.3 Senzory

V předchozích kapitolách byla zmíněna přítomnost zpětné vazby. I přesto, že není povinná, je v mnoha případech nápomocná pro pohodlnější ovládání a přesnější pohyb. Tato zpětná vazba je provedena za pomoci klasických senzorů IMU (Inertial Measurement Unit) obstarávající pozici v prostoru (náklon) a směr natočení (kompas). Dalším užitečným senzorem hlavně při prvotním nastavení je GPS (Global Positioning System), který odstraní ruční zadávání pozice stanoviště, které by v nepřítomnosti tohoto zařízení bylo potřeba získat z externích zařízení, jako je například mobilní telefon.

- **Gyroskop**

Jedním z použitelných senzorů je gyroskop. Většinou je používán v aplikacích jako senzor náklonu v prostoru. Zde tomu není jinak a jeho měření slouží jako kontrola správně provedeného pohybu, popřípadě počáteční kalibrace stavu polohy natočení před začátkem sledování. Gyroskop lze nahradit magnetickými dekodéry na výstupech motorů. Pro kontrolu pohybu a počáteční kalibraci lze použít senzor typu end-stop (mechanický spínač), který je umístěn na přesně definovaném místě. Po jeho sepnutí je tak známa výchozí poloha natočení. Výhodou jednoho senzoru je ale zjednodušení zapojení a programování, s možností využití gyroskopických dat pro kontrolu ovládání rychlosti otáčení. [10]

- **Magnetometr**

Magnetometr je senzor, který měří magnetickou indukci. Dokáže rozpoznat jak směr, tak i jeho velikost. Jednotkou měřené veličiny bývá tesla (T) nebo gauss (G). V samotném senzoru se nejčastěji objevují tři osy pro kompletní pokrytí pole. Využíván je nejčastěji jako digitální kompas, který ve větší integraci s dalšími senzory může fungovat jako náklonu kompenzovaný kompas (tilt compensated compass), který vždy bude ukazovat azimutální souřadnici bez rozdílu v náklonu. Zde může přispět ve zlepšení počáteční kalibrace pro přesné zaměření severu, které je nutné pro efektivní funkčnost trackovacího zařízení, a také dále poskytovat lepší zpětnou vazbu o případných odchylkách při provozu. [10]

- **Global Positioning System**

Přínos systému GPS není potřeba rozvádět. Využíván snad ve všech odvětvích právě díky jedné jediné vlastnosti, a to určit pozici skoro kdekoliv na světě. Zde tomu není jinak – pro úplnou automatizaci je potřeba do výpočetních systémů zadat přesnou polohu pozorovatele. Tracker tak bude schopen plně určit nastavení na pohybových osách, a dosáhnout správných nebeských souřadnic. Tento modul ale značně přidává na ceně, komplexnosti a může někdy zanechat problémy s rušením od okolí. Je proto potřeba se rozhodnout, zda bude integrace GPS vhodným řešením, a případně si promyslet a zaimplementovat náhradní řešení pro zadání pozice.

3.4 Napájení

Výběr napájení závisí zejména na požadavcích mobility zařízení. Ideálním řešením je obvykle napájení stejnosměrným napětím (DC) v rozmezí 12–24 V, které umožňuje vytvoření bateriového úložiště přizpůsobeného přímo pro tuto aplikaci. Další možností je využití stále oblíbenějších přenosných powerbank, které díky technologii Power Delivery (PD) mohou poskytovat vysoký výkon, a proto jsou vhodné i pro napájení zařízení, jako je astro-tracker.

- **USB Power Delivery**

Universal Serial Bus Power Delivery (USB PD) je definice metod přímého propojení dvou portů, které se mohou mezi sebou domlouvat na napětí, proudu a/nebo směru toku energie proudícího prostřednictvím USB kabelu. Nejčastěji se využívá v aplikaci s konektorem USB typu C, který obsahuje komunikační vodič CC. Skrze tento napájecí protokol lze ve verzi PD 3.1 dosahovat až výkonů 240 W při nastavení 48 V a 5 A. Kompletní možné konfigurace z jednoho možného módu se nacházejí v Tabulka 3.

Tabulka 3: Konfigurace Power Delivery ve fixním módu

Rozsah	Dostupné proudy a napětí	PD Rozsah
Standardní Rozsah (SPR)	3A: 5V, 9V, 15V, 20V	15 - 60W
	5A ¹ : 20V	>60 - 100W
Rozšířený Rozsah (EPR)	3A ² : 5V, 9V, 15V, 20V	15 - 60W
	5A ² : 20V	>60 - 100W
	5A ² : 28V, 36V, 48V	>100 - 240W
1) Potřeba kabelu schopného 5A.		
2) Potřeba kabelu schopného EPR.		

Další informace a vlastnosti o módech USB PD lze najít na stránkách zaštiťující USB specifikace [11].

Tento protokol lze najít v přenosné elektronice jakou jsou chytré telefony, tablety, ale právě díky verzi PD 3.1 už i v noteboocích. Jeho příchod společně s iniciativou Evropské Unie přinesl sjednocení velké většiny nabíjecích a komunikačních portů v širokém spektru elektroniky.

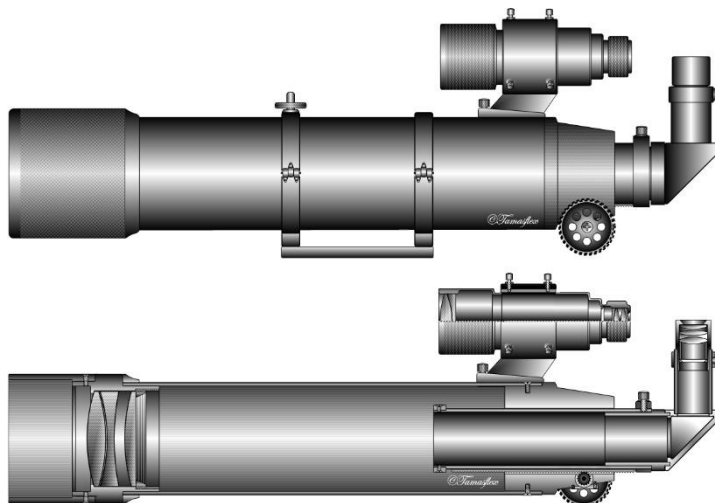
4 OPTIKA

Optika a systémy používající optické systémy jsou důležitou součástí astronomických přístrojů umožňující zachytit a zaostřit světlo z kosmických objektů na detektor, nejčastěji kameru, nebo oko pozorovatele. V astronomii se optika využívá k rozpoznávání slabých světelných signálů ze vzdálených objektů, což vyžaduje vysoce precizní mechanismy a kvalitní součásti. Důraz je kladen na snížení ztrát intenzity světla při průchodu optickou soustavou a minimalizaci optických vad, jako jsou chromatická aberace nebo koma.

4.1 Typy optických systémů

- **Refraktory (čočkové dalekohledy)**

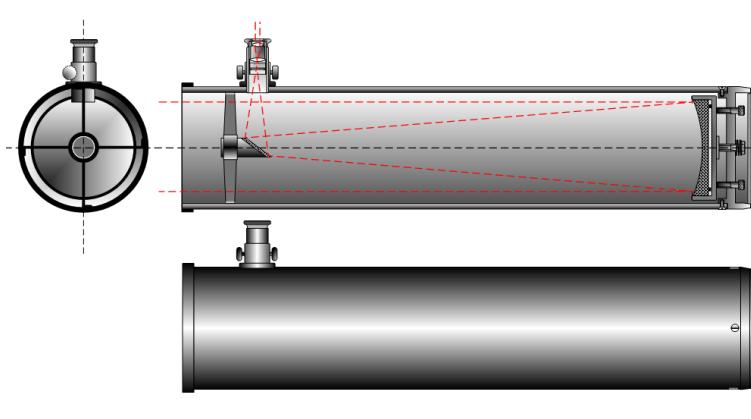
Princip refraktorových systémů spočívá v použití čoček ke shromažďování a zaostření světla, za fyzikálního jevu lomu světelných paprsků na skle čoček. Výhodou je jednoduchá konstrukce a ostrý obraz s vysokým kontrastem, což je ideální pro pozorování planet a Měsíce. Nevýhodou je chromatická aberace (rozklad světla do spektra), která se projevuje barevnými okraji okolo sledovaného objektu a rovněž vyšší hmotností při použití větších průměrů čoček. Dále se musí počítat se ztrátou intenzity světla o 4 % za každou čočku, kterou musí světelný paprsek projít. Na astronomických observatořích se používají většinou jako hledači objektů a pro kontrolu polohy při fotografování. [12]



Obrázek 4.1: Schéma refraktorového Keplerova dalekohledu [13]

- **Reflektory (zrcadlové dalekohledy)**

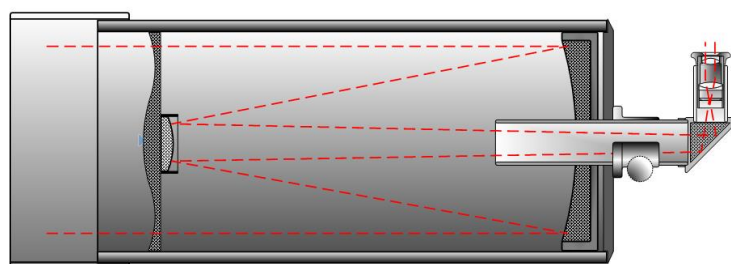
Reflektory jsou založeny na odrazu světla od zakřivených dutých zrcadel. Nabízí výhody jako je absence chromatické aberace a nižší hmotnost oproti refraktorům. Používají se často pro pozorování objektů hlubokého vesmíru, jakými jsou například galaxie a mlhoviny. Nevýhodou může být částečné zastínění primárního zrcadla centrální částí sekundárního zrcadla, které ovlivňuje množství dopadajícího světla. Oproti refraktorům a jejich čočkám lze amatérsky postavit reflektorový dalekohled se slušnými parametry. [12]



Obrázek 4.2: Schéma reflektorového Newtonova dalekohledu [13]

- **Katadioptrické systémy**

Kombinace čoček a zrcadel umožňuje vytvořit kompaktní a výkonné systémy. Tyto systémy jsou ideální pro mobilní aplikace a široké spektrum pozorování, ale bývají dražší a složitější na výrobu. Dosahují velkých ohniskových vzdáleností v kompaktních provedení, odstraňují většinu optických vad refraktorů a mimoosových zkreslení. [14]



Obrázek 4.3: Schéma katadioptrického Schmidt-Cassegrainova dalekohledu [13]

4.2 Přibližování

Přibližování (zoom) je změna zorného úhlu optického systému, které umožňuje větší nebo menší zobrazení objektu bez potřeby fyzické změny polohy přístroje. Z praktického hlediska se jedná o změnu poměru ohniskových vzdáleností vstupního a výstupního optického členu (objektiv a okulár).

Lze rozlišit dva způsoby přibližování – optické přibližování a digitální přibližování. První z nich je fyzický posun optických členů pro změnu výsledné ohniskové vzdálenosti objektivu. Poskytuje velmi kvalitní obraz i při větším přiblížení díky zachování optické kvality obrazu. Digitální přibližování se děje pomocí softwaru, který obraz uřízne a zvětší na úkor ztrát kvality detailů obrazu. Velmi často se používá u mobilních telefonů, kdy se efektivně zvětší obraz, ale není zachována původní optická kvalita. Zhorší se tak ostrost a zvýší šum na obrázku.

4.3 Ostření

Optické ostření závisí na úpravách optické soustavy (např. objektivu, dalekohledu nebo kamery), aby výsledný obraz byl správně zaostřen. Hlavním cílem je přizpůsobit zaostřovací mechanismus tak, aby se světelné paprsky přicházející z objektivu sbíhaly přesně na detektoru a vytvářely ostrý obraz.

Ostření lze dosáhnout mnoha způsoby, jako například změnou vzdálenosti mezi čočkami a detektorem, citlivou změnou ohniskové vzdálenosti nebo přidáním překážky pro rozbíhající se paprsky, které by způsobily rozostření. Záleží ale na použitelnosti různých řešení v chtěné aplikaci.

Dále lze využít manuálního nebo automatického ostření. Každý z nich má své výhody a nevýhody, ale z pohledu astro-trackeru se nejčastěji bude využívat automatického, nebo alespoň elektronického ostření pro přesnější nastavení a odstranění vlivu uživatele, který by musel ručně otáček ostřicím kroužkem a mohl tak zapříčinit vibrace do trackeru.

4.4 Optika pro astro-tracking

Obecně k výběru vhodné optiky pro astro tracking je potřeba zohlednit několik důležitých kritérií, které souvisí s požadovaným úkonem astro-trackeru. Prvním z nich je samotná ohnisková vzdálenost, která ovlivňuje zvětšení a zorné pole dalekohledu. Delší ohnisková vzdálenost je ideální pro detailní pozorování, zatímco kratší ohnisková vzdálenost poskytuje širší úhel záběru.

Dalším klíčovým parametrem je světelnost, poměr mezi ohniskovou vzdáleností a průměrem objektivu, který určuje, kolik světla optika dokáže shromáždit. Světelnější optika, tedy ta s nižším f /číslem, je zvláště vhodná pro astrofotografii zaměřenou na slabé objekty. Důležité je také zorné pole, které určuje, jak velkou část oblohy lze najednou pozorovat – široké zorné pole je vhodné při sledování pohybu nebeských těles. Nesmí se však zapomenout ani na váhu optického systému, protože astro-tracker má omezenou nosnost a nedokáže manipulovat s příliš těžkou optikou. [12]

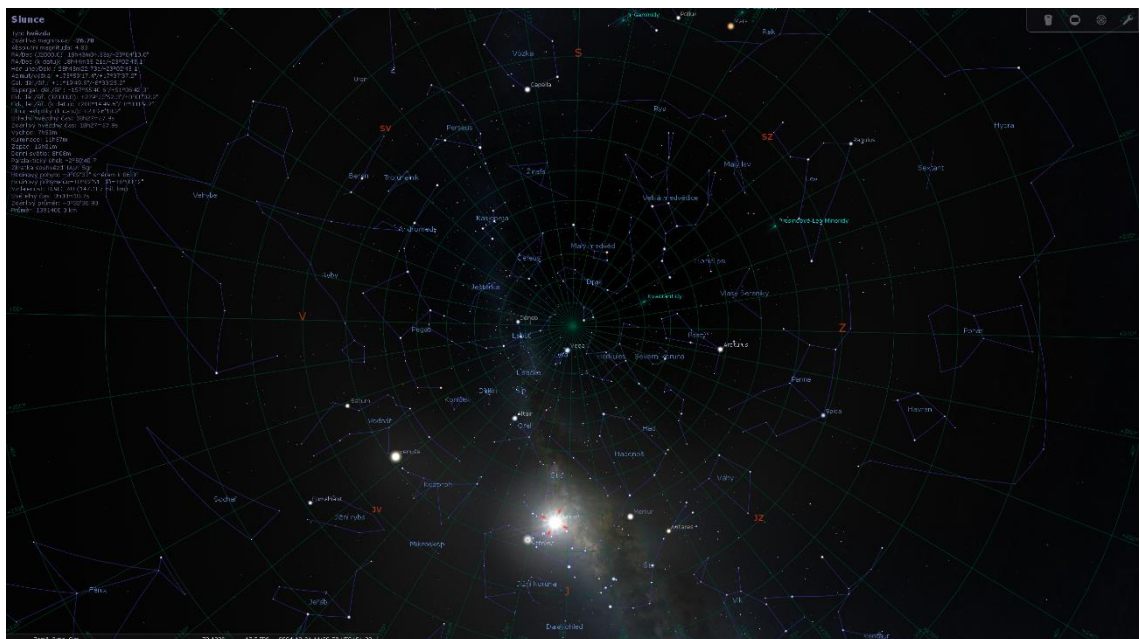
Možnost použít plně elektrické zařízení, které lze ovládat dálkově bez fyzické přítomnosti uživatele není na škodu, spíše naopak. V tomto případě je vhodné plně odstranit vliv uživatele, jako třeba nechtěné vibrace při nastavování, cit v ruce, nepřesné nastavení a další možné nevyžádané dopady.

5 SOFTWAREVÉ PLANETÁRIUM

Existuje-li zařízení schopné sledovat objekt, je potřeba získat data o hledaném objektu. Tato data lze získat například ze softwarových planetárií neboli software určený pro simulaci pohybu vesmírných objektů z pohledu naší planety. Nejčastěji se lze setkat s programy jakými jsou Celestia, KStars, Stellarium, Sky Map, Sky Guide, a mnoho dalších [15]. Každý z nich nabízí různou škálu funkcí a databází hvězdných objektů. Některé z nich nemají plnou podporu na všech platformách (Windows, IOS, Android, Linux), nebo jsou funkčně jinak založené. Dále se kapitola zaměří na software Stellarium.

5.1 Stellarium

Stellarium představuje open-source planetárium, který umožňuje simulaci noční oblohy tak, jak by mohla být viditelná běžným okem nebo dalekohledem v jakýkoliv čas a na jakémkoliv místě na planetě Zemi. Vznikl jako projekt v roce 2001, a jeho autorem je Fabien Chéreau. Od té doby si prošel spoustou úprav, a právě se nachází ve verzi 24.4 (ke dni 30.12.2024) na oficiálních stránkách stellarium.org. Důvod pro volbu tohoto programu je jeho jednoduchost, možnost vzdáleně ovládat jak samotné planetárium, tak i připojené dalekohledy, komunikující skrze komunikační protokoly, jako jsou TCP/IP, INDI nebo ASCOM. Vedle těchto funkcí nabízí výchozí katalog více jak 600 000 hvězd a možnost stáhnout další katalogy s milióny dalších objektů. [16; 15]



Obrázek 5.1: Ukázka programu Stellarium [Vlastní zdroj]

6 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Astro-tracker slouží k automatickému sledování nebeských objektů během dlouhých expozic. Kompenzuje zdánlivý pohyb hvězd způsobený rotací Země, což umožňuje ostré snímky bez rozmazání. Systém obvykle disponuje dvěma osami (azimut a elevace) nebo jednou polaritou (rovníková montáž), která sleduje pohyb v rektascenzi, čímž minimalizuje rotaci zorného pole.

Azimutální montáž (osa horizontální/vertikální) je jednodušší a robustnější, hodí se pro těžší přístroje, ale vyžaduje nepřetržité přepočty rychlostí a dodatečnou korekci rotace obrazu. Paralaktická (rovníková) montáž s osou natočenou k severnímu nebeskému pólu vyžaduje přesné ustavení, avšak umožňuje řízení pouze jedné osy (rektascenze), což zajišťuje stabilnější sledování bez rotace zorného pole.

Řídicí jednotka Raspberry Pi jako nízkonákladová platforma s dostatkem rozhraní (I²C, SPI, UART, Wi-Fi) pro senzory a motory. Krokové motory NEMA 17 s mikrokrokováním (DRV8825, TMC2209) pro přesné, tiché a spolehlivé polohování. IMU (gyroskop, akcelerometr, magnetometr) pro orientaci a kalibraci a GPS modul pro automatické určení zeměpisných souřadnic a polohy Severu. USB-C Power Delivery (20 V/3 A, 60 W) nebo standardní 12 V zdroj, s DC-DC měniči pro 5 V pro řídicí jednotku a senzory.

Pro astrofotografii se volí mezi refraktory (čočky), reflektory (zrcadla) a katadioptrickými systémy (kombinace). Důležité jsou vhodné ohniskové vzdálenosti, světelnost (nízké f-číslo) a kompatibilita s motorizovaným ostřením. Prioritou je optické zvětšení před digitálním zoomem a automatické ostření minimalizující vibrace.

Programy jako Stellarium umožňují simulaci oblohy, přesné získání rektascenze a deklinace, a přímou komunikaci s trackerem přes protokoly INDI/ASCOM. Díky online databázím stovek tisíc hvězd je možné plánovat snímkování a automatizované nastavení systému podle reálného času a geografické polohy.

7 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

- **Hlavní cíl**

Automaticky kompenzovat rotaci Země tak, aby při dlouhých expozicích zůstal vybraný nebeský objekt ostrý a ve středu zorného pole. Zařízení by mělo být navrženo tak, aby jej uživatel mohl rychle sestavit a zprovoznit bez nutnosti odborného nářadí nebo komplikovaných postupů.

- **Elektronický návrh**

Řídicí jednotka – Raspberry Pi

Zajištění výpočetního výkonu pro řízení motorů, sběr dat z IMU a komunikaci se Stellariem. Připojení kamery (CSI či USB) pro živý náhled, usnadňující zaostření a pozicování bez externí obrazovky. Vytvoření jednoduchého webového rozhraní pro ovládání (tlačítka „Kalibrace“, „Spustit sledování“, „Nastavení“).

Motory a senzory

Krokové motory NEMA 17 řízené drivery TMC2209. IMU modul pro automatické určení orientace, kalibraci rovnoběžné montáže bez složitého ručního ustavování a pravidelné drobné korekce polohy při sledování.

Komunikace se Stellarium

Přenos rektascenze a deklinace zvoleného objektu do trackeru. Periodické aktualizace souřadnic pro plynulé sledování a kompenzaci mechanických odchylek.

- **Napájení a mobilita**

USB-C Power Delivery

Napájení 20 V/3 A (60 W) z běžných powerbank nebo adaptérů, přičemž DC–DC měniče zajistí 5 V pro Raspberry Pi a 12 V pro motory.

Konstrukční modularita

Jednoduché zapojení konektorů (předpřipravené kabely) pro všechny moduly. Snadná montáž mechanické části bez zvláštních nástrojů. Možnost budoucího rozšíření (např. automatické ostření, spektrální senzory).

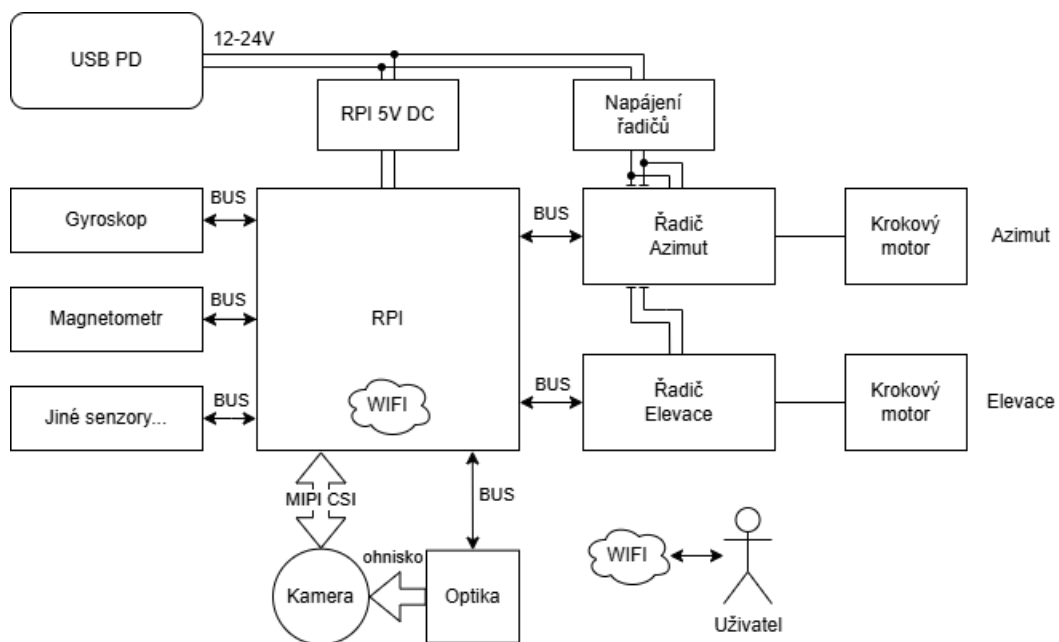
- **Požadavky na uživatelskou zkušenost**

Rychlé spuštění, přehledné webové GUI: jednoduché menu pro kalibraci IMU, nastavení sledovaného objektu a spuštění sledování. Minimalizace nutných zásahů – uživatel vybere objekt ve Stellarium a jediným kliknutím aktivuje sledování.

8 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

V této kapitole budou popsány jednotlivé technické stránky zařízení, a to hlavně z pohledu elektronického, softwarového, ale i optického. Mechanická konstrukce bude použita z open source projektu Open Astro Tracker a bude upravena pro potřeby nového systému, který bude založen na platformě Raspberry Pi. Motory, řadiče a některé senzory by měly zůstat totožné pro jednodušší úpravu z původního projektu a zachování kompatibility.

8.1 Koncept elektronického systému



Obrázek 8.1: Blokové schéma elektronického systému

Raspberry Pi (RPI) je centrální řídicí jednotkou systému, která komunikuje se všemi ostatními komponentami. Přes sběrnice (BUS), jakými je například I²C, přijímá data z gyroskopu, magnetometru a dalších senzorů, což jí umožňuje určit přesnou polohu a orientaci zařízení. Na základě těchto informací RPI řídí pohyb astro-trackeru, zpracovává obraz z kamery a umožňuje vzdálené ovládání přes Wi-Fi.

Kamera připojená přes rozhraní MIPI CSI slouží k pořizování snímků noční oblohy. Tyto snímky mohou být využity pro přesnější kalibraci a sledování nebeských objektů. Optika, která zahrnuje zaostřovací mechanismus, zajišťuje ostrost a dobré zacílení obrazu sledovaných objektů.

Řadiče azimutu a elevace jsou napojeny na krokové motory, které umožňují přesné a plynulé pohyby v horizontální i vertikální ose. RPI vysílá řídicí signály k těmto řadičům, které následně ovládají motory. Tato konfigurace umožňuje systému přesně sledovat pohyb nebeských těles na obloze.

Napájení celého systému zajišťuje USB PD, které dodává vstupní napětí v rozsahu 12–20 V. Toto napětí je pomocí DC-DC měniče upraveno na stabilních 5 V pro napájení RPI. Samostatný modul „Napájení řadičů“ poskytuje správné napětí a proud potřebný pro provoz řadičů motorů, čímž je zajištěn spolehlivý chod všech pohonných komponent. Tato rozdělená napájecí struktura umožňuje napájet zařízení širokým spektrem zdrojů napájení, jako jsou powerbanky, nabíječky apod.

8.2 Návrh elektronické části

- **Řídicí jednotka**

Řídicí jednotkou systému bude Raspberry Pi, které poskytuje dostatečný výkon pro veškeré požadavky na zpracování dat. Díky integrované podpoře širokého spektra komunikačních linek a protokolů, jako jsou MIPI, UART a I2C, je ideální pro připojení a ovládání kamer, řadičů a senzorů. USB porty umožňují snadnou komunikaci s externími fotoaparáty, například pro jejich dálkové ovládání nebo přenos dat.

Raspberry Pi 5 disponuje také integrovanou Wi-Fi a ethernetovým připojením, což zajišťuje spolehlivou konektivitu v jakémkoliv prostředí – ať už pro přímé ovládání zařízení, nebo i pro přenos dat na vzdálený server (možnost sledovat živý obraz na jakémkoliv zařízení).

Napájecí obvody Raspberry Pi umožňují dodávat 5V nebo 3,3V pro napájení připojených komponent, jako jsou kamery připojené přes MIPI rozhraní, senzory (například IMU a GPS) nebo dokonce malý displej, pokud to aplikace vyžaduje. Tato flexibilita umožní systému se snadno přizpůsobit konkrétním potřebám, které mohou při tvorbě vzniknout.

- **Krokové motory a řadiče**

Krokové motory byly vybrány na základě požadavků na přesnost $0,9^\circ$ na krok a budicí proud 2 A. Vhodnou volbou jsou motory NEMA 17, konkrétně model 17HM19-2004S1, což je bipolární krokový motor s krokem o velikosti $0,9^\circ$, točivým momentem až $46 \text{ N}\cdot\text{cm}$, proudem na fázi až 2 A, odporu vinutí $1,4 \Omega$ a indukčností vinutí $4 \text{ mH} \pm 20 \%$.

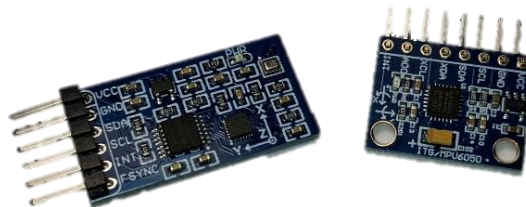
Motory budou řízeny pomocí budičů TMC2209, které byly popsány dříve. V kombinaci s motory NEMA 17 je očekávána vysoká přesnost, jemné rozlišení kroku a úspora GPIO při použití více motorů pro ovládání všech os za použití komunikační sběrnice UART. Budiče by měly podporovat rozlišení až $1/256$ kroku, umožnit řízení motorů s proudem až 2 A na fázi, napájet motory v rozsahu 4,75–29 V DC a přinést užitečné funkce, jako je tichý chod, ochrana proti prokluzu a úspora energie při udržování polohy.



Obrázek 8.2: Motory NEMA 17 a řadiče TMC2209 [Vlastní zdroj]

- **Senzory**

Senzory budou integrovány v jednotce Waveshare 10 DOF IMU Sensor (D) [17], která poskytuje 10 stupňů volnosti: gyroskop (3°), akcelerometr (3°), magnetometr (3°) a barometr (1°). Senzor ICM20948 je charakterizován jako nízkoenergetický MEMS senzor pohybu, určený primárně pro přenosnou elektroniku a aplikace chytrých domácností, komunikující přes SPI nebo I²C. Kompletní parametry a vlastnosti lze nalézt zde [18]. Pokud magnetometr nebude potřebný, lze tento senzor nahradit běžnějším modelem, například MPU-6050, který obsahuje pouze gyroskop a akcelerometr [19]. nebo jinou dostupnější alternativou.



Obrázek 8.3: Senzorové moduly s ICM20948 a MPU-6050 [Vlastní zdroj]

Systém bude navržen tak, aby umožňoval snadné přidání GPS modulu, který by usnadnil další použití a rozšířil možnosti zařízení. Prostor z pohledu komunikačních linek a napájecích možností.

- **Kamera**

Pro sledování objektů bude využita kamera od společnosti Arducam. Model Arducam Pi Hawk-eye je vybaven senzorem Sony s rozlišením 64 megapixelů, velikostí pixelů $0,8 \mu\text{m} \times 0,8 \mu\text{m}$ a funkcí slučování dat z okolních pixelů (2×2 binning). Velikost senzoru činí 9,25 mm ($1/1,7''$ diagonálně).

Kamera je dále vybavena elektronicky ovládanou ostřicí optikou, která nabízí rozsah ostření od 8 cm do nekonečna (infinity) a podporuje jak automatické, tak manuální ostření prostřednictvím knihoven Raspberry. Senzor poskytuje zorné pole 84° (FoV). [20] Pro dosažení požadovaného přiblížení bude nezbytné doplnit ji o vstupní přibližovací čočku.



Obrázek 8.4: Kamera Arducam Pi Hawk-eye [Vlastní zdroj]

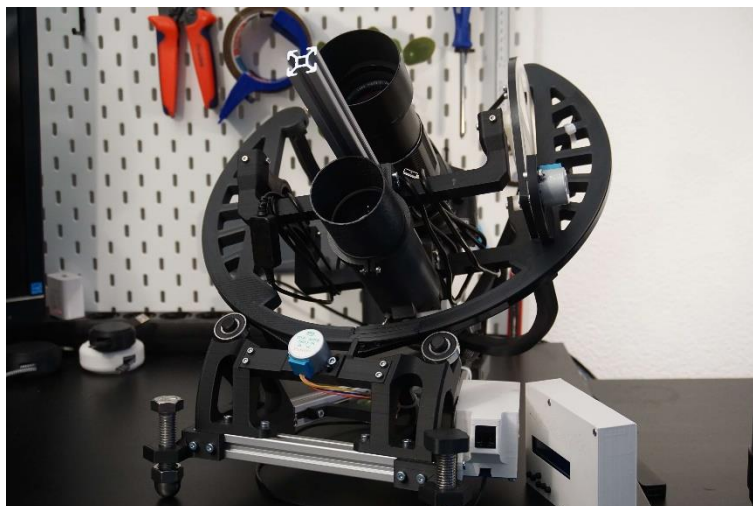
V průběhu práce může být kamera nahrazena jiným modelem, pokud se ukáže, že její parametry nejsou dostatečné nebo vhodné. Jednou z alternativ je využití kamery se senzorem Sony IMX290, která po fyzických úpravách může být vhodná pro snímání za nízké intenzity dopadajícího světla.

- **Napájení**

Napájecí část by měla být přizpůsobena pro napětí podporovaná standardem USB PD, konkrétně v rozmezí 12–20 V. Spuštění protokolu zajistí modul, který na základě specifikací nastaví požadované parametry energetického toku. Na tuto napájecí větev budou připojeny DC-DC konvertory, které zajistí stabilní napájení řídicí jednotky čistým napětím 5 V a zároveň budou schopny dodávat napětí potřebné pro napájení motorů, jejichž specifikace zatím není určena. Součástí systému bude také možnost přímého připojení napětí v uvedeném rozmezí, což umožní případné přidání bateriového packu.

8.3 Astro montáž

Mechanická část zařízení je založena na montáži z open-source projektu Open Astro Tracker, který slouží jako hlavní inspirace pro tuto práci. Tento projekt je zaměřen na vytvoření dostupné a snadno sestavitelné montáže, která je vhodná pro astronomickou fotografii a držení lehčích zařízení, jako jsou fotoaparáty s objektivy.



Obrázek 8.5: Fotografie Open Astro Tracker [21]

Jednou z klíčových vlastností Open Astro Trackeru je jeho jednoduchost a dostupnost. Konstrukce je navržena tak, aby ji bylo možné snadno vyrobit s pomocí 3D tisku a běžně dostupných součástí. Většina komponent je vytištěná z plastu, což snižuje náklady a umožňuje snadné modifikace nebo výměnu poškozených částí. Navíc hliníkové profily zaručují pevnost, lehkost a flexibilitu, což usnadňuje přidání dalších vylepšení, jako jsou systémy pro automatizované ovládání, další kamery nebo senzory. [21]

Tato montáž je velmi kompaktní a snadno přenosná, což ji dělá ideální volbou pro implementaci navrhovaného elektronického systému. Díky své jednoduché konstrukci a možnostem personalizace poskytuje tato montáž skvělý základ pro další experimenty.

9 REALIZACE PŘÍSTROJE

Realizaci této práce lze rozdělit na tři části. První z nich je elektronická část, která se zabývá návrhem a tvorbou plošného spoje, který by umožnil efektivnější propojení všech potřebných komponent. Druhá část je zaměřena na tvorbu mechanismu a úprav originální montáže. Ve třetí části se lze podívat, jakým způsobem je řešen software pro ovládání krokových motorů, komunikaci s ostatními platformami a také grafické uživatelské rozhraní hostované přes protokol html přímo na Raspberry Pi.

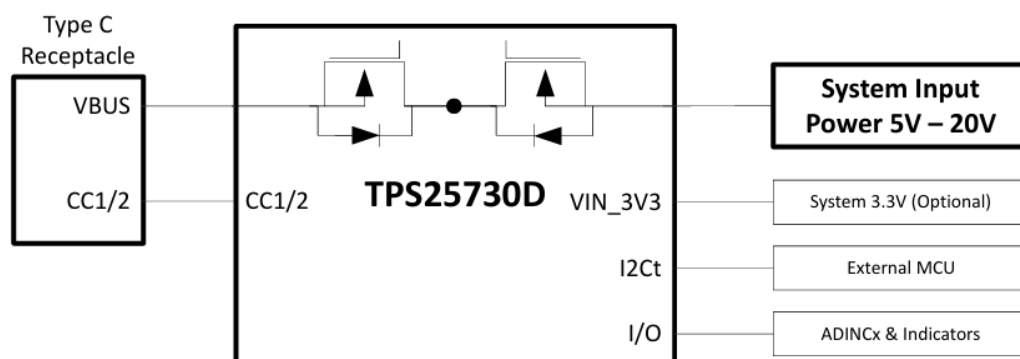
9.1 Elektronika

Jedna z prvních praktických částí je deska plošného spoje pro kompletní propojení napájecích a ovládacích obvodů. Deska obsahuje obvody pro řízení USB Power Delivery, měniče napětí pro napájení Raspberry Pi a motorů, a také fyzické připojení řadičů krokových motorů a jiných senzorů.

- **Řadič USB C**

Byl vybrán řadič TPS25730 firmy Texas Instruments [22], který patří mezi specializované řadiče napájecího protokolu Power Delivery. Tento obvod je navržen výhradně pro napájení zařízení (sink role), a tedy neumožňuje napájení dalších zařízení (source nebo dual-role). Jeho jmenovitá maxima jsou 20 V a 5 A. Podporuje revize protokolů PD 2, PD 3 a PD 3.1 bez funkce Programmable Power Supply (PPS). Dále nabízí komunikaci s řídicí jednotkou přes sběrnici I2C, pro jeho funkčnost není ale potřeba. Maximální napětí a proud jsou nastavovány pomocí rezistorových děličů připojených na vstupy ADCINx. Řadič podle těchto hodnot vyjedná s připojeným zdrojem vhodný PD profil.

V této aplikaci je cílem získat napájecí profil 20 V při maximálním proudu 3 A, což odpovídá výkonu 60 W. Tento profil poskytuje dostatečný výkon jak pro napájení krokových motorů, tak pro Raspberry Pi včetně periférií.

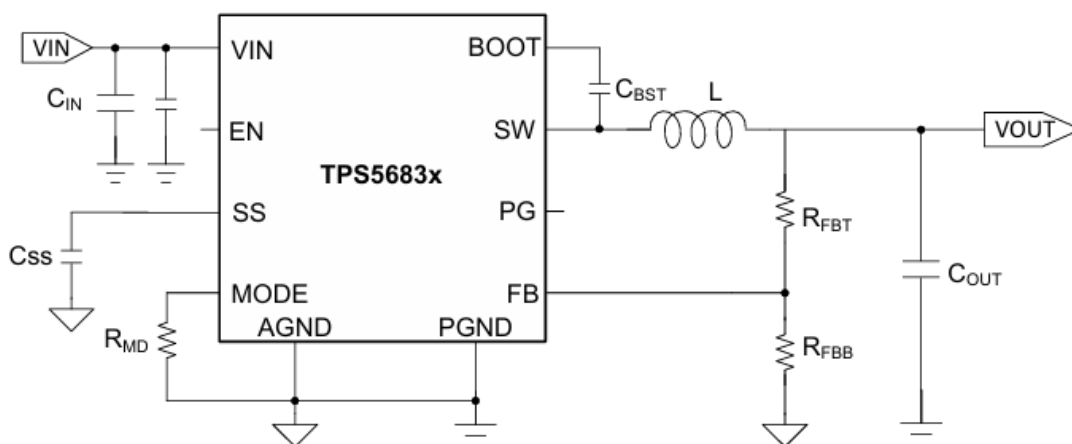


Obrázek 9.1 TPS25730D sink konfigurace [22]

Zařízení tak lze napájet z široké škály zdrojů, od powerbanek až po univerzální USB C nabíječky. Není tedy v každém případě nutné být připojen k elektrické síti. Pro ochranu proti přepětovým špičkám a elektrostatickému výboji (ESD), které mohou vzniknout při připojování USB-C kabelu, je na vedení VBUS umístěna transilová (TVS) dioda. Ta je připojena mezi VBUS a zem a zajišťuje ochranu řadiče TPS25730 i dalších částí napájecího systému.

- **Napájení řídicí jednotky a motorů**

Výstup z řadiče USB PD poskytuje napětí 20 V, což není vhodné přímo pro napájení jednotlivých částí systému. Proto jsou v návrhu použity dva oddělené step-down měniče typu TPS56837 [23] – jeden pro napájení řídicí jednotky Raspberry Pi, druhý pro napájení řadičů a samotných krokových motorů.



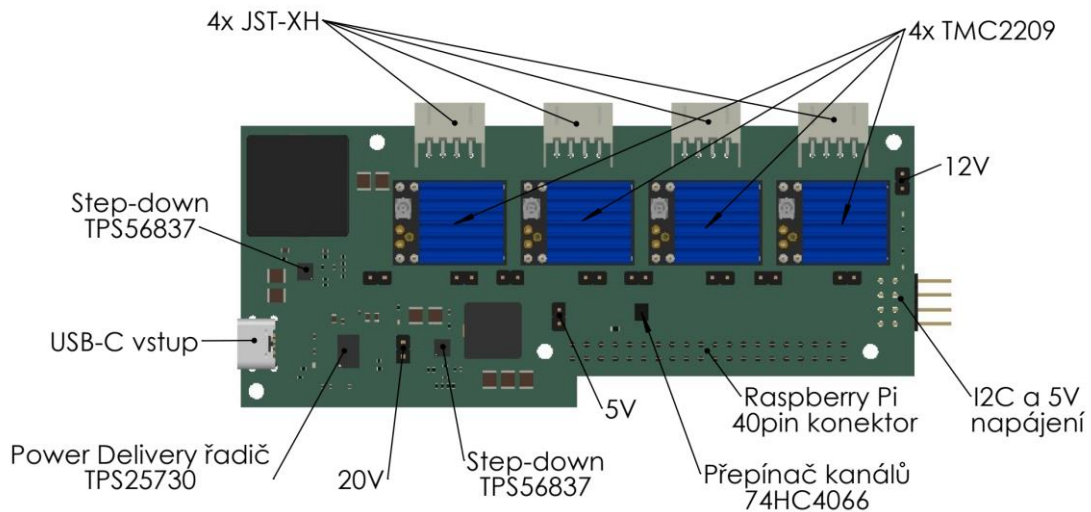
Obrázek 9.2 Zjednodušené zapojení TPS56837 [23]

První měnič převádí vstupní napětí 20 V na stabilních 5 V, které jsou určeny pro napájení RPi a jeho periférií, jako je IMU modul, případně kamera. TPS56837 umožňuje vstupní napětí v rozsahu 4,5–28 V a výstupní proud až 8 A, což s rezervou pokrývá i špičkové zatížení. Výstupní napětí je nastaveno pomocí rezistorového děliče na pinu FB. Díky vysoké účinnosti (až 95 %) a možnosti externí synchronizace je vhodný i pro aplikace s vysokými nároky na stabilitu a teplotu.

Druhý měnič je nakonfigurován na výstupní napětí 12 V, které je optimální pro napájení řadičů TMC2209 a krokových motorů typu NEMA 17. Snížením napětí z 20 V na 12 V se výrazně snižuje výkonová ztráta na řadičích i samotné tepelné zatížení motorů. Při celkové zátěži čtyř motorů může být jejich odběr značný, a proto byla napájecí větev motorů oddělena. Napájecí větve 5 V a 12 V sdílí společnou zemní referenci (GND), aby se zabránilo problémům s integritou signálu.

- **Deska plošného spoje**

Při návrhu desky plošného spoje bylo postupováno v souladu s doporučeními uvedenými v datasheetech obvodů TPS25730 a TPS56837, především s ohledem na šířku vodivých cest, rozložení proudových zón a správné vedení zemních ploch. Rozmístění komponent odpovídá funkčnímu toku signálu – od vstupu napájení přes napěťové měniče až po výstupy k perifériím. Samotná deska je dle doporučení pro TPS56837 čtyřvrstvá pro efektivnější přenos tepla při velkém proudovém zatížení.



Obrázek 9.3 Pohled na plošný spoj Astro-Tracker

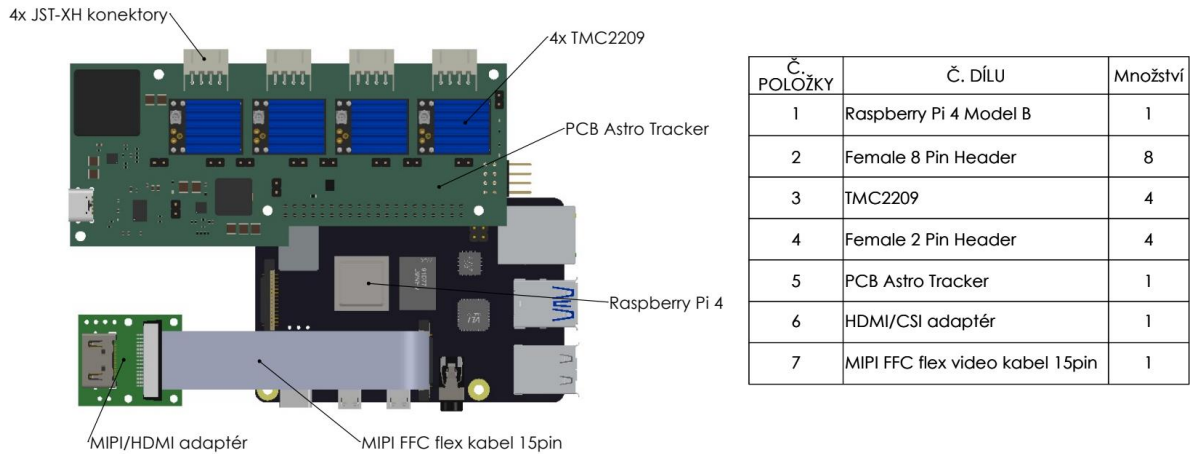
Napájecí USB-C vstup je umístěn na levé straně desky, následovaný řadičem Power Delivery a dvojicí step-down měničů. Ty zajišťují oddělené napájecí větve – 5 V pro Raspberry Pi a jeho periferní zařízení a 12 V pro napájení řadičů a krokových motorů. Napájecí vedení jsou umístěna především ve vrchní vrstvě desky, což umožňuje lepší odvod tepla přímo přes měděné plochy a případné napojení na chladič. Střední vrstvy slouží jako spojitě zemní plochy (ground planes), které snižují elektromagnetické rušení.

Konektory pro připojení motorů se nacházejí v horní části desky a směřují směrem od Raspberry Pi, opačně než jeho GPIO nebo USB porty. Toto uspořádání bylo zvoleno kvůli přehlednému vedení kabeláže. Na desce jsou dále THT konektory pro osazení řadičů TMC2209, které umožňují snadnou výměnu, a doplňkové konektory pro volitelné funkce, jako je například detekce chyb. Nachází se zde i připojení senzorů komunikujících na I2C sběrnici, například dříve zmíněný magnetometr.

Pro konfiguraci řadičů krokových motorů byly implementovány dva způsoby. Prvním je manuální nastavení adres přes vývody MS1 a MS2, které jsou vyvedeny na pájecí plošky a lze je jednoduše propojit se zemí nebo 3,3 V pomocí pájecího můstku. Druhou možností je dynamická konfigurace sériové UART komunikace. Tato funkce je realizována přes analogový přepínač 74HC4066 [24], který umožňuje směrování jediného UART kanálu z Raspberry Pi na jednotlivé řadiče podle potřeby. Díky tomu lze

provádět adresování řadičů a měnit jejich nastavení za běhu, aniž by bylo nutné využít více sériových portů.

Toto řešení nabízí flexibilní řízení a zároveň zachovává možnost ladění i během provozu. Oproti statickým adresám toto řešení umožňuje čtení zpráv komunikace UART z řadičů. Kompletní schéma zapojení a návrh všech vrstev desky plošného spoje včetně rozložení součástek jsou uvedeny v přílohách této práce.



Obrázek 9.4 Pohled na kompletní elektroniku

9.2 Konstrukce

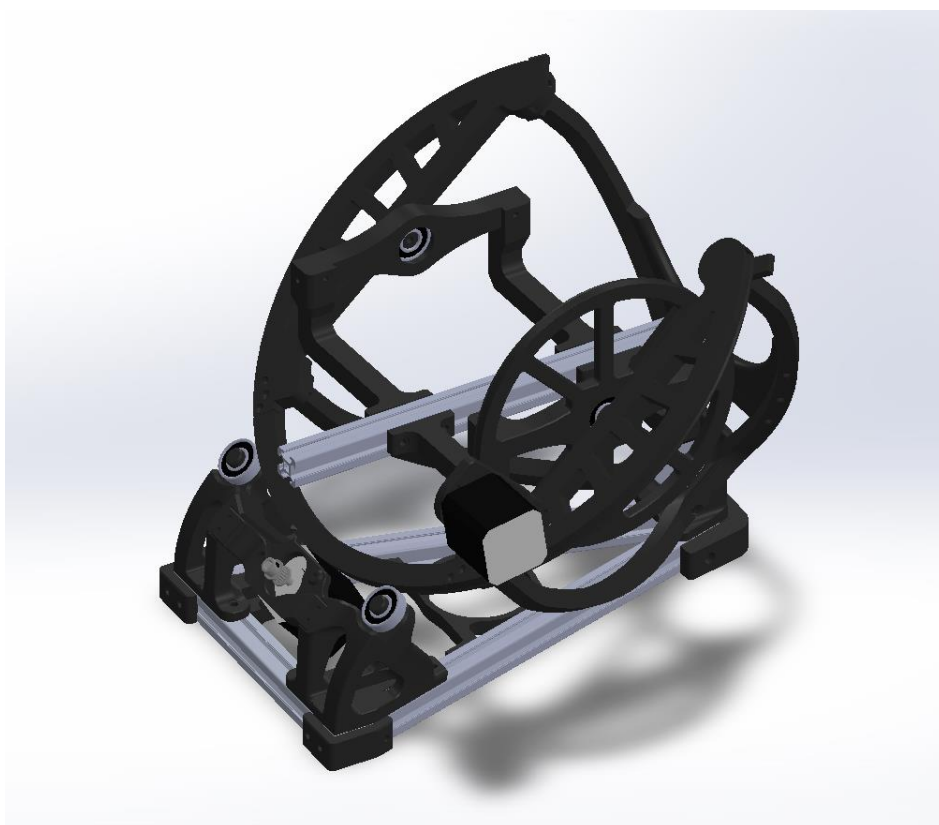
Návrh konstrukce probíhal ve 3D CAD softwaru SolidWorks, kde byly vytvořeny jednotlivé modely, sestavy a provedena kontrola kolizí. Výsledkem je i poziční výkres a přehledná výrobní dokumentace, včetně kusovníku, který obsahuje seznam všech použitých dílů – od 3D tištěných komponent, až po hotové hliníkové profily a další konstrukční prvky. Návrh je optimalizován pro snadnou montáž a případnou údržbu v terénu.

Mechanická konstrukce je kombinací hliníkových profilů 20×20 mm, které výrazně zvyšují tuhost a umožňují snadné modulární rozšiřování, a 3D tištěných dílů, které slouží k uchycení motorů, ložisek, elektroniky a optických prvků. Pro tisk byla použita výplň typu adaptive cubic s hustotou 15 %, výškou vrstvy 0,2 mm, přičemž u více mechanicky namáhaných částí byl počet perimetrů zvýšen až na sedm, zatímco pro méně namáhané části postačovaly tři perimetry. Menší části byly vytištěny na tiskárně Prusa Mini+ a díly, které přesahovali maximální tisknutelnou velikost 180 mm v jakémkoliv směru poté na Creality Ender 3.

Základem mechanické konstrukce astro-trackeru je návrh převzatý z otevřeného projektu Open Astro Tracker, který je známý svou jednoduchostí, dostupností a rozsáhlou komunitní podporou. Tento původní design je postaven na dvouosém systému, kde jedna osa simuluje rotaci Země (Right Ascension) a druhá koriguje náklon (Declination).

V původní verzi jsou obě osy poháněny krokovými motory a zaměřují se především na kompaktní a přenosné řešení pro DSLR fotoaparáty.

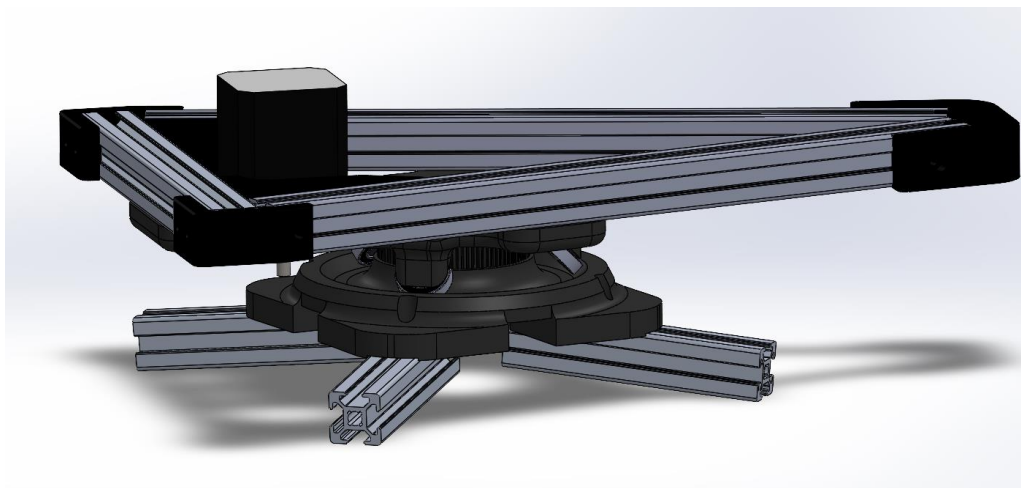
V rámci této práce byla konstrukce rozšířena o další dvě osy, které umožňují přesnější nastavení, širší rozsah pohybu a jednodušší ruční nebo poloautomatické ovládání. Celkově tak vznikla čtyřosá konstrukce, jejímž hlavním režimem je automatické řízení. Z hlediska orientace a kinematiky bylo nezbytné, aby byly všechny osy logicky sesouhlaseny – tedy aby konstrukce sdílela jeden střed rotace a umožňovala přímé i reverzní řízení.



Obrázek 9.5 3D model Open Astro Tracker v programu SolidWorks

- **Osa azimutu**

První z přidanych os do původního dvouosého návrhu rozšiřuje funkčnost zařízení o otáčení v horizontální rovině, tedy pohyb, který sleduje kruhovou trajektorii rovnoběžnou s obzorem. Tato osa slouží k základnímu natočení celého systému do požadovaného azimutu, čímž výrazně usnadňuje následné přesné ustavení a sledování nebeských objektů.



Obrázek 9.6 Pohled na mechanismus pro nastavení azimutu

Z konstrukčního hlediska se jedná o otočnou platformu umístěnou mezi pevnou základnou a horní nosnou rovinou, která nese zbývající části systému včetně Open Astro Trackeru. Otáčení je realizováno pomocí řemenového převodu typu GT2 (šířka 6 mm), který spojuje výstup krokového motoru s kruhovým vedením platformy.

Spodní část konstrukce tvoří hliníkové profily 20×20 mm, uspořádané do tvaru "kříže", které slouží jako opěrné nohy a zajišťují stabilitu celého zařízení. Horní otočná plošina je pak samonosná a umožňuje plné natočení o 360°, přičemž zůstává nezávislá na dalších osách systému.

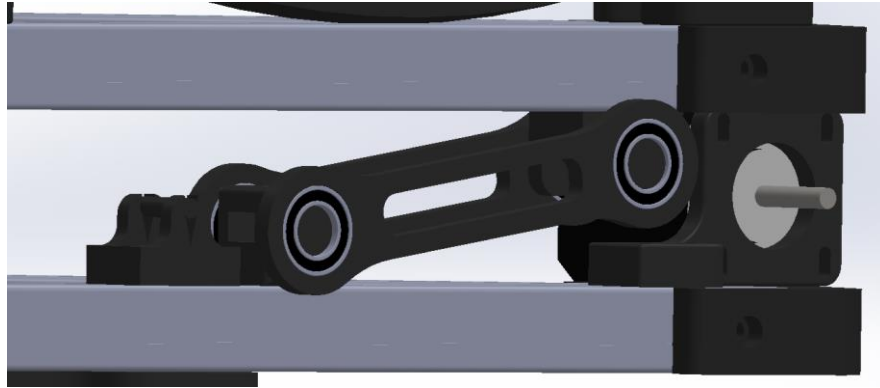
Tato osa hraje klíčovou roli zejména při hrubém zaměření zařízení podle azimutu – například ve fázi počáteční orientace před zapojením automatického sledování. Konstrukce odpovídá principu kompasového řízení, kdy lze orientaci zařízení intuitivně chápat i bez video náhledu. To zvyšuje flexibilitu při nasazení v různých podmínkách, včetně mobilního použití.

- **Osa elevace**

Druhá z přidávaných os rozšiřuje pohybové možnosti zařízení o řízení naklápění v rovině svislé, tedy o změnu elevace celého pozorovacího systému. Tato osa je zásadní pro správné ustavení montáže vůči Zemi, protože umožňuje nasměrovat zařízení tak, aby byla osa Right Ascension (RA) rovnoběžná s osou otáčení Země. Tím je zajištěna možnost přesného sledování nebeských objektů při použití pouze jediné aktivní osy během expozice.

Elevace je pevně uchycena na otočné platformě azimutální osy a tvoří navazující stupeň řízení. Jejím úkolem je naklánět celý systém Open Astro Tracker, který je k ní mechanicky připojen. Naklopením této osy dochází k přizpůsobení zařízení zeměpisné šířce pozorovacího stanoviště – tedy výšce světového pólu nad horizontem. Osa elevace tak tvoří jeden ze základních prvků přesného polárního ustavení celého systému.

Možnost mechanicky a programově řízeného naklápění zvyšuje flexibilitu zařízení zejména při mobilním nasazení, kde není vždy možné zaručit přesné ruční nastavení montáže. Elevace tedy slouží nejen k úpravě sklonu, ale i ke zjednodušení kalibrace systému před samotným pozorováním.



Obrázek 9.7 Pohled na mechanismus pro nastavení elevace

9.3 Software

Software systému byl koncipován tak, aby zajišťoval úplnou správu všech hardwarových prvků a podporoval jejich vzájemnou interakci. Klíčovým cílem bylo implementovat flexibilní a škálovatelné řešení, které umožňuje řízení krokových motorů, zpracování obrazu z kamery a komunikaci s externími zařízeními a aplikacemi, jako je astronomický software Stellarium.

- **Ovládání TMC2209 driverů**

Jedním z hlavních prvků systému je komunikace s drivery TMC2209, která umožňuje přes UART sběrnici nastavení různých parametrů, včetně mikrokrokování, proudu do cívek motorů, a dalších funkcí podporovaných těmito řadiči. UART komunikace zajišťuje efektivní a spolehlivý přenos dat mezi softwarem a hardwarem, což je klíčové pro dosažení vysoké přesnosti a plynulosti pohybu motorů.

Pro ovládání krokových motorů byly využity již existující knihovny pro řízení TMC2209, konkrétně knihovna PyTmcStepper [25], která umožňuje přístup k funkcím pro ovládání motorů přes UART. Tato knihovna poskytuje základní funkce pro komunikaci s motory, včetně nastavování mikrokrokování, proudu a dalších parametrů.

Aby bylo možné pracovat s touto knihovnou, byl vytvořen wrapper, který zjednodušuje interakci s knihovnou a poskytuje vyšší úroveň abstrakce pro snadnou správu více motorů v systému. Wrapper zajišťuje pohodlné nastavení parametrů pro každý motor a jejich ovládání pomocí jednoduchých funkcí, které jsou přímo přizpůsobeny pro potřeby tohoto systému.

Systém je vybaven kanálovým přepínačem, který umožňuje snadné přepínání mezi jednotlivými motory (např. RA a DEC), a to pomocí GPIO pinů Raspberry Pi. Toto řešení zajišťuje plynulý provoz bez konfliktní komunikace na sběrnici UART.

- **Zpracování obrazu z kamery a jeho živý přenos**

Systém také zahrnuje zpracování obrazu, který je přijímán z kamery připojené přes rozhraní CSI (Camera Serial Interface). Tento obraz je následně odeslán jako živý video stream prostřednictvím WebSocket protokolu, což umožňuje komunikaci v reálném čase. WebSockets jsou ideálním nástrojem pro streamování, jelikož poskytují obousměrnou, nízkolatenční komunikaci, která je nezbytná pro zobrazování živých dat. Uživatel má možnost sledovat tento video stream prostřednictvím webového rozhraní, které je hostováno přímo na Raspberry Pi.

Uživatel má také možnosti zapnout funkci časosběru, která uloží v určeném časovém intervalu snímek do složky přímo na Raspberry. Tyto snímky lze poté přenést a zpracovat do videa, nebo pro jiné účely

- **Podpora pro nastavování parametrů kamery**

V rámci softwarového řešení byla implementována podpora pro nastavování parametrů kamery, které uživatel může upravit prostřednictvím webového uživatelského rozhraní. Tyto parametry zahrnují:

- Jas (Brightness): Nastavení úrovně jasu obrazu pro lepší viditelnost.
- Kontrast (Contrast): Úprava kontrastu pro zlepšení detailů obrazu.
- Zisk (AnalogueGain): Nastavení zisku pro zesílení signálu kamery.
- Expozice (ExposureTime): Nastavení času expozice pro správné osvětlení snímků v různých světelných podmínkách.
- Další dostupné parametry.

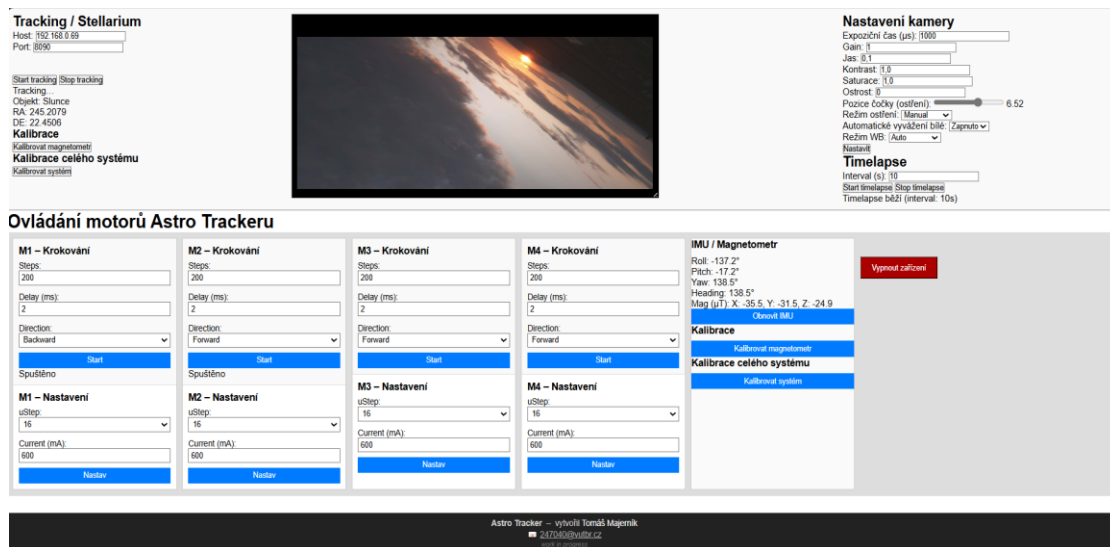
Systém zajišťuje, že všechny změny jsou aplikovány v reálném čase a reflektovány ve streamovaném videu, což umožňuje přesné doladění obrazového výstupu.

- **Uživatelské rozhraní (UI)**

Uživatelské rozhraní bylo navrženo jako webová stránka v HTML, která je hostována přímo na Raspberry Pi. Tento přístup umožňuje uživatelům plné využití funkcí systému prostřednictvím lokální Wi-Fi sítě, a to bez nutnosti připojení k internetu. Raspberry Pi funguje jako přístupový bod (Access Point), tedy vytváří vlastní Wi-Fi síť, na které není závislé na žádné externí infrastruktuře – zároveň se ale může připojit i k existující síti.

Webové rozhraní poskytuje uživatelům následující funkce:

- Ovládání motorů: Nastavení mikrokroků, proudu a směru pro každý motor zvlášť.
- Nastavení parametrů kamery: Měnit nastavení kamery (jas, kontrast, zisk, expozice) v reálném čase.
- Živý přenos z kamery: Sledování náhled z kamery v reálném čase.
- Nastavení timelapse: Interval mezi snímky, zapnutí/vypnutí časosběru.
- Přístup k datům senzorů: Sledovat údaje o aktuální pozici sledovaného objektu.



Obrázek 9.8 Uživatelské rozhraní hostované na Raspberry Pi přes webový prohlížeč

- **Komunikace s astronomickým programem Stellarium**

Pro integraci s astronomickým softwarem Stellarium byl implementován protokol HTTP, který umožňuje odesílání požadavků a přijímání dat ve formátu JSON. Tento protokol zajišťuje komunikaci mezi systémem a Stellarium, což umožňuje automatické sledování astronomických objektů.

Po odeslání požadavku podle dokumentace [26] na adresu:

```
http://localhost:8090/api/objects/info?format=json
```

se systém připojí k Stellarium a obdrží aktuální údaje o sledovaném objektu ve formátu JSON. Tento výstup obsahuje základní informace, jako jsou altitude a azimut objektu, nebo i jiné informace, které jsou následně použity pro výpočet nových pozic motorů.

Příklad odpovědi při sledování hvězdy Arcturus může vypadat takto:

```
{...,
  "altitude": 48.036170959472656,
  "azimuth": 122.81036782019432,
  "localized-name": "Arcturus",
  ...}
```

Tato data jsou pak automaticky zpracována a využita ke kontrole pozice motorů, které mají za úkol nasměrovat teleskop na správnou polohu na obloze. Systém využívá hodnoty `hour_angle` a `declination` pro výpočet změny pozice a provádí potřebný pohyb motorů.

- **Automatizované řízení a přesnost pohybu**

Pro dosažení vysoké přesnosti a plynulosti pohybu motorů je systém vybaven technologií mikrokrokování. Každý motor používá drivery TMC2209, které umožňují nastavení různých úrovní mikrokroků (např. 1/16 mikrokroku). To znamená, že pohyb motoru může být nastaven na velmi jemné kroky, což je klíčové pro precizní směřování teleskopu na sledovaný objekt.

Díky integrovanému algoritmu pro výpočet kroků na základě změny pozice (RA a DEC) a převodových poměrů systém dokáže efektivně řídit pohyb motorů na základě aktuálního sledovaného objektu. Tento výpočet je dynamicky aktualizován na základě dat získaných ze Stellaria, což umožňuje automatické přizpůsobení pohybu motorů v reálném čase.

$$steps = \frac{|\Delta\theta|}{360^\circ} \times N_{rev} \times \mu \times r \quad (9.1)$$

kde:

- $\Delta\theta$ = „delta_degrees“ – změna úhlu (v stupních), kterou chceme motorem vykonat
- N_{rev} = FULL_STEPS_PER_REV – počet plných kroků motoru pro jednu úplnou otáčku (360°)
- μ = uStep_res – mikro-krokový rozlišení (počet mikro-kroků na jeden plný krok)
- r = gear_ratio – převodový poměr převodovky (výstupní osa / vstupní osa)

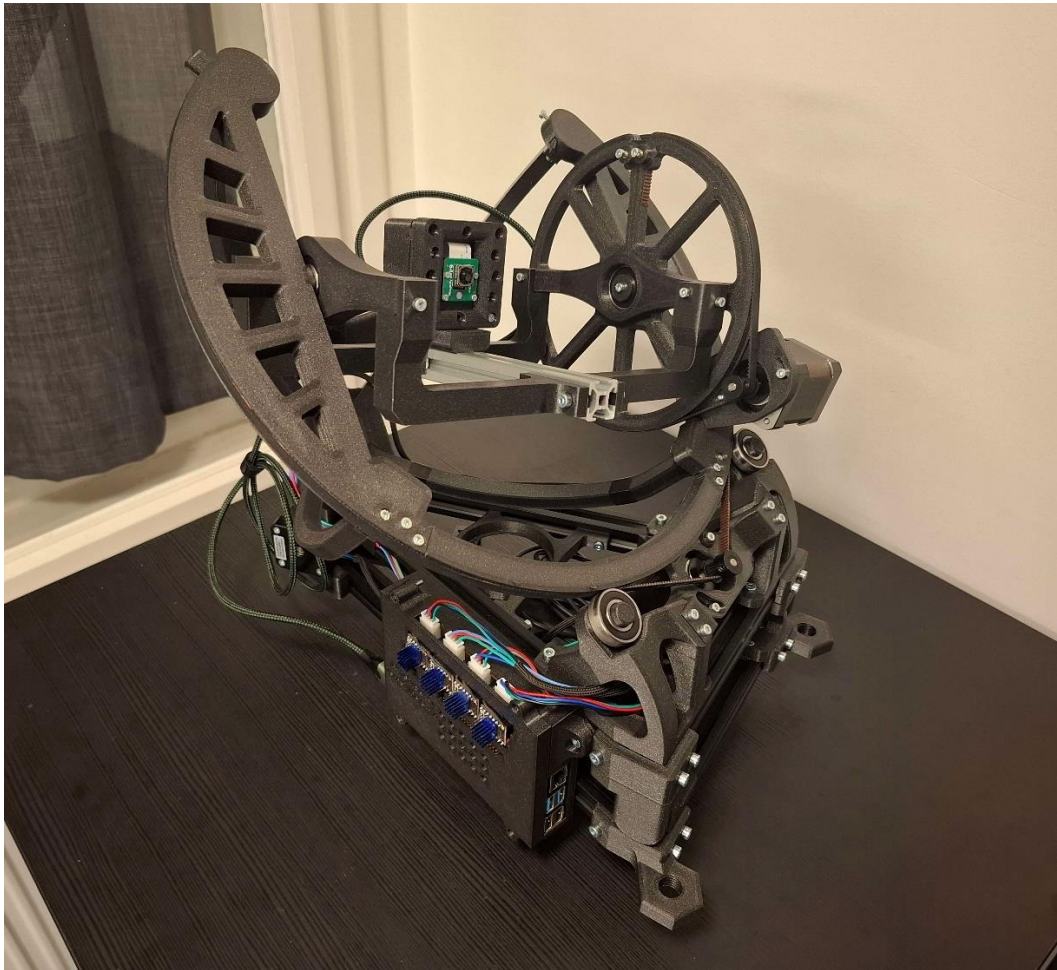
Celá rovnice jen říká, že nejdřív spočítáme, jakou část jedné plné otáčky (360°) představuje $|\Delta\theta|$, a pak tuto část vynásobíme počtem kroků na jeden celý otáčkový cyklus. Jelikož používáme mikrokrokování a převodovku, násobíme ještě rozlišením μ a převodem r .

- **Senzorika**

V zařízení je implementován IMU senzor ICM20948, který dodává zařízení možnost prvotní kalibrace os. Magnetometr je využíván pro nalezení severu a gyroskop pro sesouhlasení osy deklinace s osou zemské rotace. Tímto způsobem lze zařízení rozložit na místě, zapnout Stellarium s údaji o poloze a času, a poté jedním kliknutím trackovat daný objekt. Přesnost měřených dat je potřeba více filtrovat a kalibrovat, aby bylo možno dosáhnout přesnějších údajů. Aktuálně jsou schopny poskytovat odhad pozice s dostatečnou přesností pro dané účely.

10 SHRNUÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI

Bylo sestaveno zařízení se čtyřmi osami. Dvě z nich jsou umístěny v základně a slouží k ustavení montáže trackeru. Samotný tracker funguje jako rovníková montáž, přičemž disponuje osami rektascenze a deklinace. Díky tomu lze montáž přesně vyvážit do úpolohy, kdy plně vyniknou výhody rovníkové montáže pro plynulé a stabilní sledování nebeských těles.



Obrázek 10.1 Plně sestavený astro-tracker

Pro propojení všech komponentů byl navržen a vyroben plošný spoj, který tvoří srdce celého systému. Na desce je integrován řadič USB-C Power Delivery, jenž dodává do systému napětí 20 V/3 A. Toto vstupní napětí je pomocí step-down obvodů převedeno na 5 V pro napájení Raspberry Pi a na 12 V pro napájení krokových motorů. Během testování bylo naměřeno, že spotřeba zařízení se pohybuje v rozmezí 20–30 W (údaje převzaty přímo z napájecí powerbanky). Deska dále slouží jako konektorová základna pro připojení motorů i jejich řadičů, a je uzpůsobena k přímému nasazení na 40pinový header Raspberry Pi, čímž se minimalizuje počet kabelů a zvyšuje spolehlivost spojení.

Softwarová část je plně funkční: systém dokáže řídit všechny motory a komunikovat s připojenými periferiemi, jako je magnetometr pro automatickou kalibraci orientace. Byly implementovány algoritmy pro přesné zaměřování a sledování objektů na obloze. Uživatelé mají k dispozici webové rozhraní hostované přímo na Raspberry Pi, ke kterému se připojí přes Wi-Fi. V tomto rozhraní lze kromě spuštění sledování nastavovat i parametry integrované kamery a sledovat živý obraz s velmi nízkou latencí.

Celý systém je navržen tak, aby montáž i uvedení do provozu byly co nejjednodušší: stačí srovnat a zafixovat základnu, připojit napájení a spustit webové rozhraní. Díky modulárnímu návrhu plošného spoje je v budoucnu možné snadné rozšíření o další senzory či funkce (např. elektronicky řízený zoom nebo rozšířená diagnostika).

Pro ověření funkčnosti zařízení bylo provedeno testovací pozorování východu Slunce. Během tohoto experimentu byl po dobu jedné hodiny pořizován časosběrný záznam s intervalem mezi snímky nastaveným na 10 sekund. Pořízené snímky byly následně analyzovány pomocí knihovny OpenCV, která určila pozici nejjasnějšího pixelu v každém záběru. Na základě těchto dat byla vypočtena odchylka skutečné dráhy Slunce od její průměrné trajektorie napříč celým záznamem. Výsledná průměrná odchylka činila zhruba 7 úhlových minut. Tento výsledek lze považovat za velmi dobrý a potvrzuje schopnost systému přesně sledovat objekt na obloze. Přesto existuje prostor pro další zlepšení, zejména v oblasti zpětné vazby ze sensorů, přesnější kalibrace os na začátku měření a optimalizace konstrukčního řešení.

11 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a zrealizovat funkční koncept automatizovaného astro-trackeru na bázi platformy Raspberry Pi, který by umožňoval přesné sledování nebeských těles a zároveň poskytoval uživatelsky přívětivé rozhraní. Podařilo se sestavit čtyřosou konstrukci, která kombinuje dvě hrubé osy – azimut a elevaci – pro počáteční ustavení montáže, s dvojicí přesných paralaktických os rektascenze a deklinace. Díky tomu tracker kompenzuje rotaci Země pouhým řízením osy rektascenze, čímž zamezuje rotaci zorného pole a minimalizuje potřebu dodatečných úprav snímků. Mechanické řešení bylo postaveno na krokových motorech NEMA 17 a robustní hliníkové konstrukci.

Elektronická část systému je centrálně řízena Raspberry Pi 4B. Na navržené desce plošných spojů je integrovaný řadič USB-C PD, dva step-down konvertory pro 5 V a 12 V, přičemž během zkoušek se prokázalo, že celková spotřeba dosahuje asi 20–30 W. Řízení motorů zajišťují drivery TMC2209 připojené k Raspberry Pi prostřednictvím UART a GPIO, přičemž nastavení proudu a mikrokrokování bylo optimalizováno tak, aby pohyb byl plynulý a tichý. Pro automatickou kalibraci směru vůči severnímu nebeskému pólu je v systému implementován modul IMU, který poskytuje magnetometr, akcelerometr a gyroskop. Testovací pozorování ukázali, že IMU dokáže rychle určit orientaci s přesností $\pm 1,0^\circ$ a zajistit tak správné ustavení paralaktické osy bez náročného ručního doladování.

Na softwarové úrovni vznikl Pythonový skript, který v pravidelných intervalech načítá souřadnice sledovaného objektu z planetária Stellarium a přepočítává požadovanou změnu úhlu na počet kroků. Webové uživatelské rozhraní hostované přímo na Raspberry Pi poskytuje ovládání kalibrace IMU, spuštění či zastavení sledování, nastavení parametrů kamery a živý přenos videa z Arducam Pi Hawk-eye. Vedle dosažených parametrů a plně funkčního prototypu se však v průběhu testů odhalily i omezení. Magnetometr v zástavbě budov vykazoval občasné odchylky způsobené lokálními magnetickými vlivy, což vedlo k nepřesnostem v první kalibraci. Pro eliminaci těchto odchylek by bylo vhodné v budoucnu doplnit plate solving, tedy automatické rozpoznávání hvězdné konfigurace z krátkých snímků, a tím jemně upravovat polární nastavení.

Tato bakalářská práce přinesla plně funkční prototyp automatizovaného astro-trackeru, který naplňuje stanovené cíle a vytváří pevný základ pro další rozvoj. Přes identifikovaná omezení prokázala, že navržený systém je schopný spolehlivě sledovat nebeské objekty a z hlediska uživatelské přívětivosti se výrazně přibližuje ideálu „plug-and-play“. Tyto výsledky představují významný krok směrem k dostupnému a modulárně rozšiřitelnému řešení astro-trackeru, které může sloužit jak amatérským pozorovatelům, tak rozšířit vědecké projekty menších pracovišť.

LITERATURA

- [1] *Astronomy Picture of the Day 9.12.2024*. Online. NASA. Astronomy Picture of the Day Index. Dostupné z: <https://apod.nasa.gov/apod/ap241209.html>. [cit. 2024-12-29].
- [2] *Coordinate Systems*. Online. Dostupné z: <http://members.uia.net/tajames/astrometry/notes-coordinates.html>. [cit. 2024-12-29].
- [3] VANÝSEK, Vladimír. *Základy astronomie a astrofyziky*. Praha: Academia, 1980.
- [4] *Základy astronomie*. Online, Skripta - verze 0.20, vedoucí Miloslav Zejda. Brno: Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, 2021. Dostupné z: astro.physics.muni.cz/study/courses/f1251/. [cit. 2024-12-02].
- [5] *Raspberry Pi*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2011, 2024-11-30. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=1260385145>. [cit. 2024-12-02].
- [6] ARDUINO. *Mega 2560 Rev3*. Online. ARDUINO. Arduino. 2020, 2024-04-25. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/>. [cit. 2024-12-07].
- [7] REPRAP CONTRIBUTORS. *RAMPS 1.4*. RepRap. 2016, 2024-06-02. Dostupné také z: https://reprap.org/mediawiki/index.php?title=RAMPS_1.4&oldid=190744.
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. *DRV8825 Stepper Motor Controller IC*. Online. TEXAS INSTRUMENTS. Texas Instruments. 2010, 2014-06. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/DRV8825>. [cit. 2024-12-07].
- [9] TRINAMIC MOTION CONTROL GMBH & CO. KG, HAMBURG, GERMANY. *TMC2209 Datasheet*. Online. ANALOG DEVICES. Analog Devices. 2018, 2023-02-16. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/tmc2209.html>. [cit. 2024-12-07].
- [10] IOANI, Leida. *Metody fúze dat z nesourodých snímačů pro lokalizaci*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Radovan Juráň. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/212606>. [cit. 2024-12-17].
- [11] USB PROMOTERS GROUP. *USB Power Delivery*. Online. 2024, 2024-09-17. Dostupné z: <https://usb.org/document-library/usb-power-delivery>. [cit. 2024-12-17].
- [12] ZAJONC, Ivo. *Teleskopie*. Online. 2008. Dostupné z: <https://www.astro.cz/clanky/ostatni/teleskopie-dil-prvni-jaky-dalekohled-je-vhodny-pro-astronoma-amatera.html>. [cit. 2024-12-18].
- [13] WIKIPEDIE. *Dalekohled*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Dalekohled&oldid=23640671>. [cit. 2024-12-29].
- [14] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Catadioptric system*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. 2001, 2024-10-18. Dostupné z:

- https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Catadioptric_system&oldid=1251779114. [cit. 2024-12-18].
- [15] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Planetarium software*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Planetarium_software&oldid=1263692207. [cit. 2024-12-29].
- [16] *Stellarium*. Online. Dostupné z: <https://stellarium.org/cs/>. [cit. 2024-12-30].
- [17] *Waveshare 10 DOF IMU Sensor (D)*. Online. Waveshare wiki. Dostupné z: [https://www.waveshare.com/wiki/10_DOF_IMU_Sensor_\(D\)](https://www.waveshare.com/wiki/10_DOF_IMU_Sensor_(D)). [cit. 2024-12-29].
- [18] TDK INVENSENSE. *ICM20948*. Online. TDK INVENSENSE. TDK InvenSense. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/9-axis/icm-20948/>. [cit. 2024-12-29].
- [19] TDK INVENSENSE. *MPU-6050*. Online. TDK INVENSENSE. TDK InvenSense. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>. [cit. 2024-12-29].
- [20] ARDUCAM. *64MP Autofocus Camera for Raspberry Pi*. Online. ARDUCAM. Arducam. 2012. Dostupné z: <https://www.arducam.com/64mp-ultra-high-res-camera-raspberry-pi/>. [cit. 2024-12-29].
- [21] *Open Astro Tracker*. Online. OpenAstroTech Wiki. Dostupné z: <https://wiki.openastrotech.com/en/OpenAstroTracker>. [cit. 2024-12-29].
- [22] *TPS25730*. Online. Texas Instruments. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/TPS25730>. [cit. 2025-05-11].
- [23] *TPS56837*. Online. Texas Instruments. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/TPS56837>. [cit. 2025-05-11].
- [24] *Neexperia 74HC4066; 74HCT4066*. Online. Neexperia. Dostupné z: <https://www.nexperia.com/products/analog-logic-ics/analog-switches-and-multiplexers/analog-switches/series/74HC4066-74HCT4066.html>. [cit. 2025-05-21].
- [25] CHR157I4N. *Chr157i4n / PyTmcStepper Public*. Online. GitHub. Dostupné z: <https://github.com/Chr157i4n/PyTmcStepper>. [cit. 2025-05-26].
- [26] *RemoteControl plugin HTTP API description*. Online. Stellarium Developers Documentation. Dostupné z: <https://stellarium.org/doc/24.0/remoteControlApi.html>. [cit. 2025-05-18].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Astronomy Picture Of the Day NASA 9.12.2024 [1].....	10
Obrázek 2.1: Azimutální souřadnice [2].....	12
Obrázek 2.2: Rovníkové souřadnice [2].....	13
Obrázek 4.1: Schéma refraktorového Keplerova dalekohledu [13].....	20
Obrázek 4.2: Schéma reflektorového Newtonova dalekohledu [13].....	21
Obrázek 4.3: Schéma katadioptrického Schmidt-Cassegrainova dalekohledu [13].....	21
Obrázek 5.1: Ukázka programu Stellarium [Vlastní zdroj].....	23
Obrázek 8.1: Blokové schéma elektronického systému.....	26
Obrázek 8.2: Motory NEMA 17 a řadiče TMC2209 [Vlastní zdroj].....	28
Obrázek 8.3: Senzorové moduly s ICM20948 a MPU-6050 [Vlastní zdroj].....	28
Obrázek 8.4: Kamera Arducam Pi Hawk-eye [Vlastní zdroj].....	29
Obrázek 8.5: Fotografie Open Astro Tracker [21].....	30
Obrázek 9.1 TPS25730D sink konfigurace [22].....	31
Obrázek 9.2 Zjednodušené zapojení TPS56837 [23].....	32
Obrázek 9.3 Pohled na plošný spoj Astro-Tracker.....	33
Obrázek 9.4 Pohled na kompletní elektroniku.....	34
Obrázek 9.5 3D model Open Astro Tracker v programu SolidWorks.....	35
Obrázek 9.6 Pohled na mechanismus pro nastavení azimutu.....	36
Obrázek 9.7 Pohled na mechanismus pro nastavení elevace.....	37
Obrázek 9.8 Uživatelské rozhraní hostované na Raspberry Pi přes webový prohlížeč.....	39
Obrázek 10.1 Plně sestavený astro-tracker.....	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání vlastností astronomických montáží	14
Tabulka 2: Porovnání řadičů DRV8825 a TMC2209	17
Tabulka 3: Konfigurace Power Delivery ve fixním módu	19

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

I2C	Inter-Integrated Circuit
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
CNC	Computer Numerical Control
GPIO	General-Purpose Input/Output
TMC	Trinamic Motion Control
DC	Direct Current
RMS	Root Mean Square
MIPI CSI	Mobile Industry Processor Interface Camera Serial

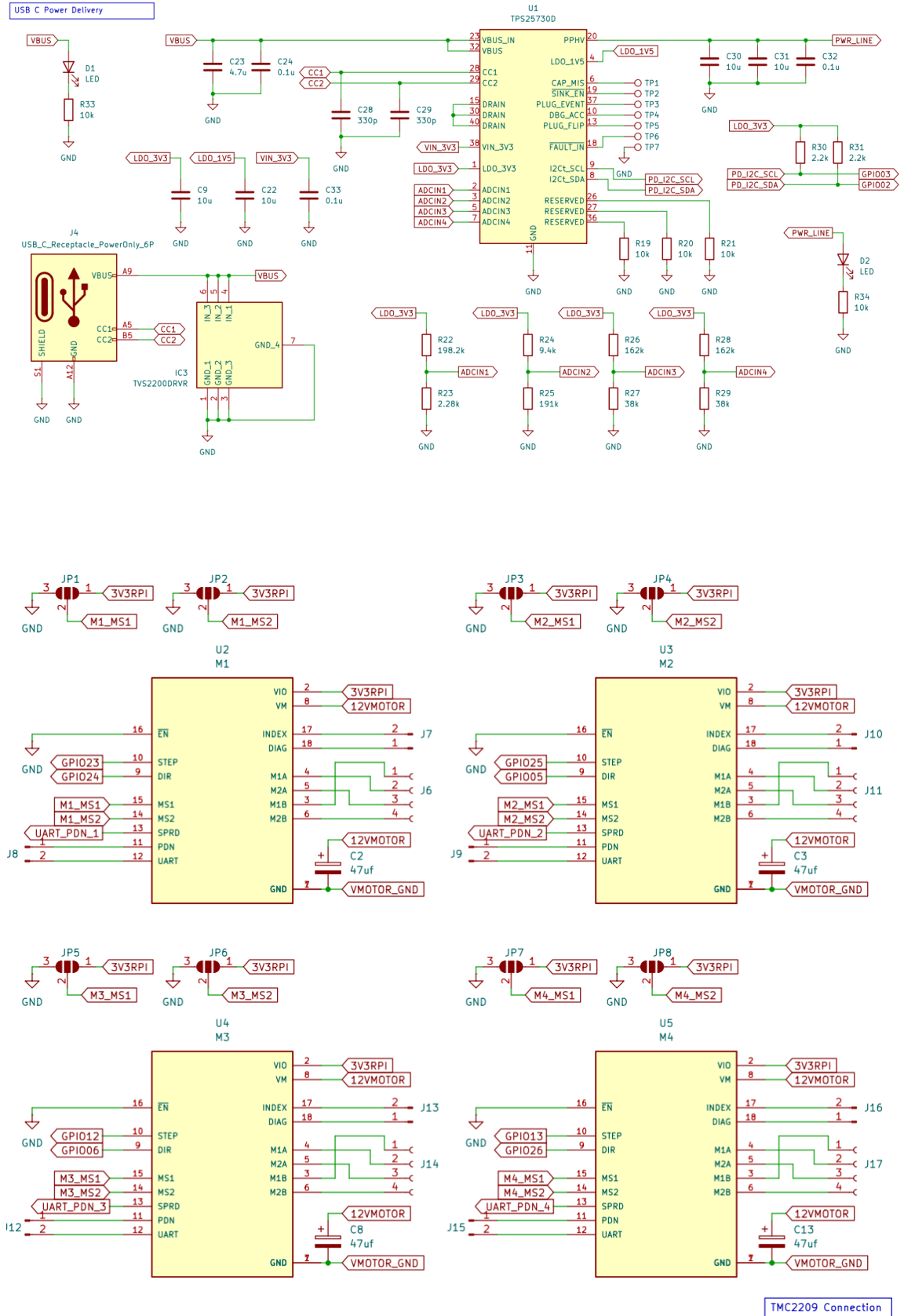
Interface

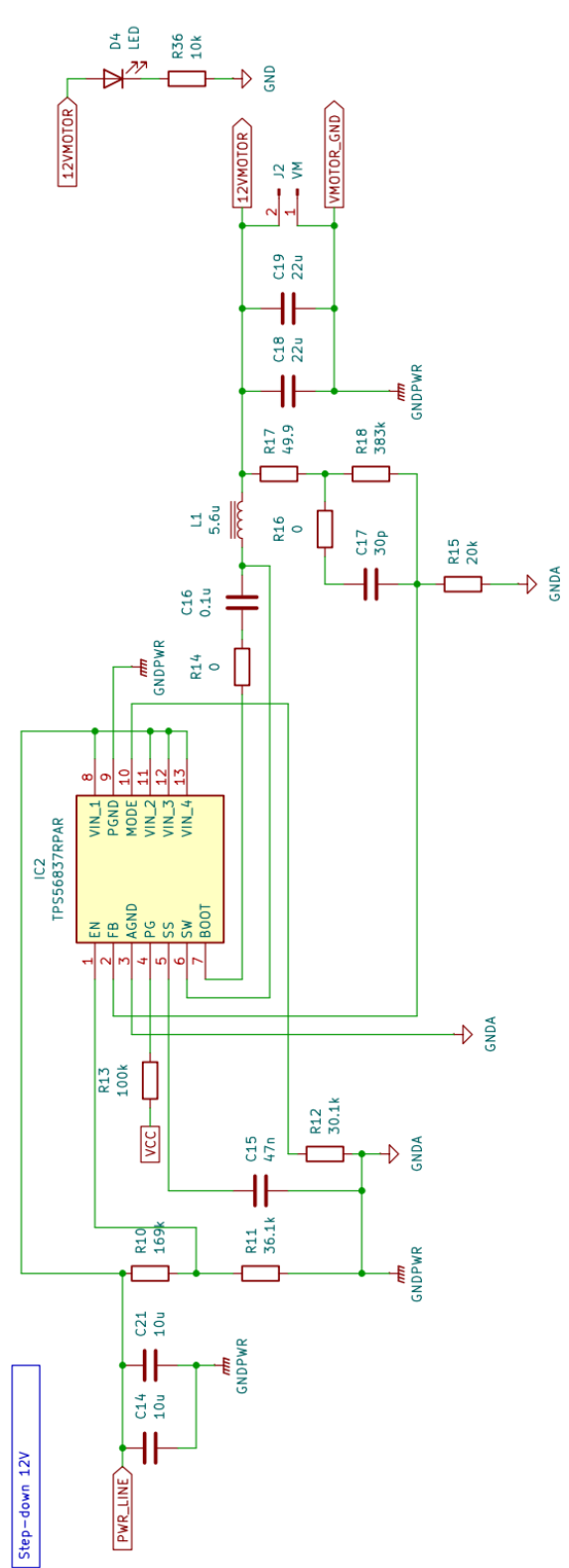
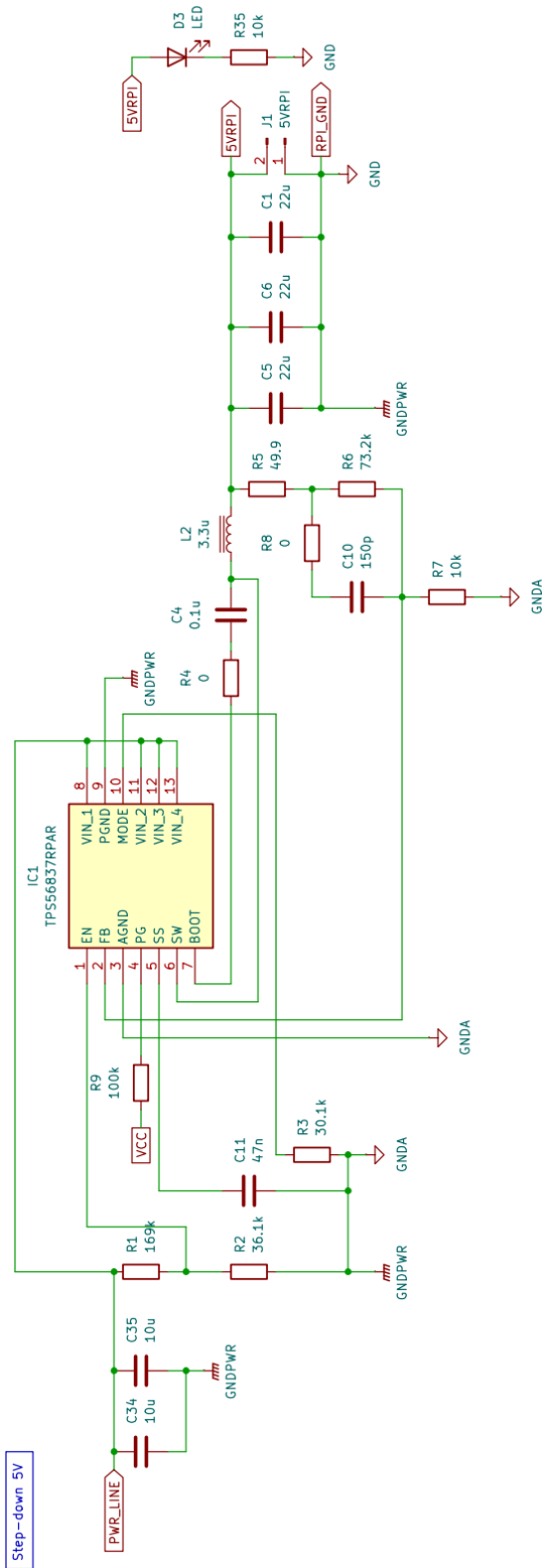
IMU	Inertial Measurement Unit (Inerciální měřicí jednotka)
GPS	Global Positioning System
USB PD	USB Power Delivery
DOF	Degrees of Freedom (Stupně volnosti)
ICM20948	Integrovaný senzor pohybu (9 DOF IMU)
MPU-6050	Senzor pohybu (6 DOF IMU)
TMC2209	Řadič krokových motorů
DRV8825	Řadič krokových motorů

SEZNAM PŘÍLOH

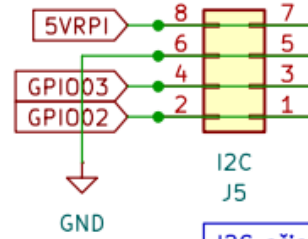
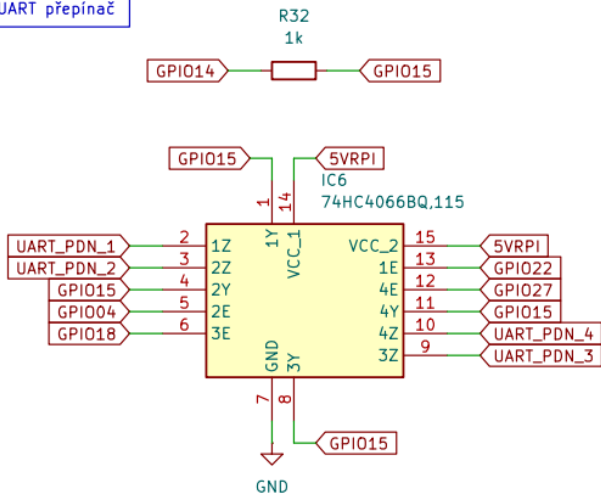
PŘÍLOHA A - SCHÉMATICKÉ ZAPOJENÍ ZAŘÍZENÍ.....	50
PŘÍLOHA B - SOLIDWORKS – PŘILOŽEN V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ	53
PŘÍLOHA C - SOFTWARE – PŘILOŽEN V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ.....	54

Příloha A - Schématické zapojení zařízení



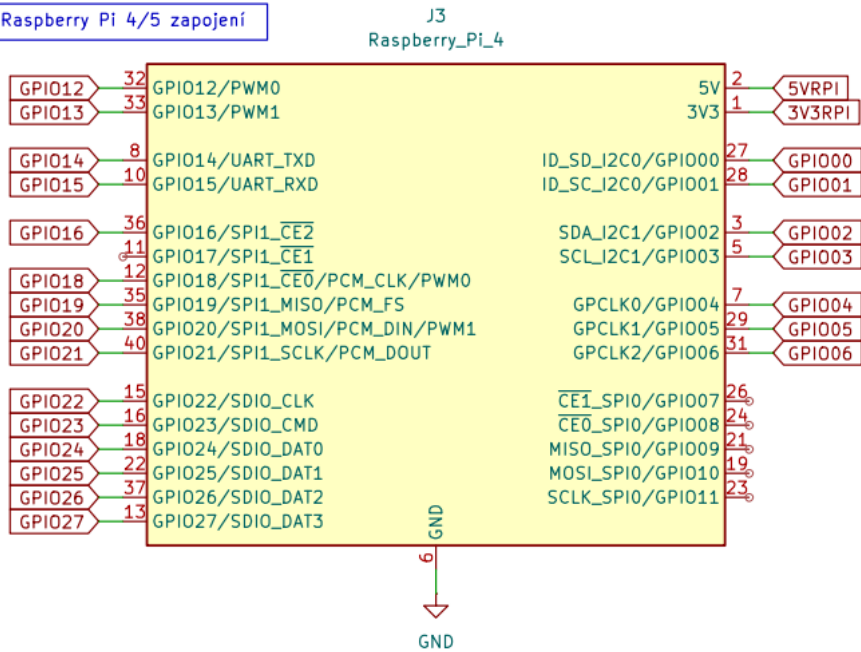


UART přepínač



I2C připojení

Raspberry Pi 4/5 zapojení



Příloha B - SolidWorks – přiložen v elektronické podobě

Příloha C - SOFTWARE – přiložen v elektronické podobě

Veškerý zdrojový kód, včetně souborů main.py, imu_controller.py, motor_control.py, TMC_driver.py, run_server.sh, složek static/, templates/ a dalších pomocných souborů, je přiložen v elektronické podobě.

Zde je souborová struktura projektu.

```
...SOFTWARE/  
├─ run_server.sh  
├─ main.py  
├─ imu_controller.py  
├─ motor_control.py  
├─ TMC_driver.py  
├─ analyze_tracking.py  
├─ static/  
│   ├─ css/  
│   └─ js/  
├─ templates/  
│   └─ index.html  
└─ timelapse/
```