

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh konstrukce astronomického
dalekohledu

Autor: Bc. Petr Panchártek

Praha, 2017

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne _____

podpis

Poděkování

Děkuji především vedoucímu diplomové práce Ing. Luboru Jiráskovi, CSc., za vedení, zájem, připomínky a čas, který mi věnoval. Děkuji p. Procházkovi za pomoc výběru stavebních prvků hvězdářského dalekohledu a za jejich jejich výrobu. Děkuji také prof. RNDr. Petru Kulhánkovi, CSc. za cenné rady v oblasti astronomie a jeho pomoc s katalogem hvězd. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Viktoru Adlerovi za jeho pomoc při tvorbě navigačního programu. Velmi rád bych také poděkoval Ing. Tomášovi Kořínkovi Ph.D. za možnost večerního měření spínaných zdrojů v laboratoři. Děkuji Bc. Janu Tačíkovi za úmorné přepisování údajů o hvězdách pro vytvoření všech souhvězdí a v neposlední řadě děkuji mému otci Pavlu Panchártkovi, který mi velmi pomohl při stavbě celé konstrukce dalekohledu.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a realizovat elektronické ovládací zařízení pro nastavení správné polohy dalekohledu pro sledování pohybu objektu na obloze. Podmínkou je návrh systému, který umožní integrovat další části dnes používaných s dalekohledy, jako CCD kameru, apod.

Klíčová slova

dalekohled Newton, montáž Dobson, krokový motor, snímání polohy, řídicí jednotka

Abstract

Purpose of this master's thesis is to design and implement an electronic control device for setting the correct position of the telescope for tracking an object on the sky. The condition is a design system that it will integrate other parts of the telescopes used today as a CCD camera, and the like.

Key words

Newtonian telescope, Dobsonian, stepper motor, position sensing, control unit

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. PANCHÁRTEK Petr**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Návrh konstrukce astronomického dalekohledu**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se problematiky konstrukce malých astronomických dalekohledů a jejich elektronického ovládní.
2. Na základě 1) navrhnete a realizujete elektronické ovládací zařízení pro nastavení správné polohy dalekohledu pro sledování pohybu objektu na obloze. Systém navrhnete tak, aby do něj bylo možné integrovat další části dnes používaných s dalekohledy, jako CCD kameru, apod.
3. Navrhnete postup vhodný pro ověření funkce přístroje.
4. Provedte ověřovací měření na zařízení.
5. Zhodnotte dosažené výsledky.
6. Zařízení zůstane v majetku zadávajícího.
7. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam odborné literatury:

- [1] Krejčířik, A.: Napájecí zdroje I. - III. BEN, Praha 1996 a pozdější vydání.
- [2] Husák, M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia 2008.
- [3] <http://www.astro.cz/clanky/ostatni/teleskopie-dil-ctvrty-jednoduchy-astronomicky-dalekohled.html>, 2016.

Vedoucí: **Ing. Lubor Jirásek, CSc.**

Platnost zadání: 9. 9. 2017

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2016

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	vi
Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xii
1 Úvod	2
2 Historie dalekohledů	3
2.1 Historie dalekohledů	3
3 Dalekohled	5
3.1 Druhy dalekohledů	5
3.1.1 Rozdělení dalekohledů dle oblasti barevného spektra	5
3.1.2 Rozdělení dalekohledů podle druhu pozorování	6
3.1.3 Rozdělení dalekohledů podle typu optické soustavy	6
4 Montáž dalekohledu	13
4.1 Typy montáže	13
4.1.1 Azimutální montáž	13
4.1.2 Paralaktická (rovníková) montáž	14
4.2 Pozorování hvězdné oblohy v závislosti na použité montáži	18
4.3 Přehled pohonů pro montáže	20
5 Návrh optiky pro dalekohled Newton	22
6 Návrh konstrukčního řešení dalekohledu Dobson	27
6.1 Hlavní části konstrukce	27
6.2 Přehled pohybů montáže	29

7	Návrh jednotlivých prvků montáže	30
7.1	Převodové soustrojí pro osu elevace	30
7.1.1	Návrh hřídele a ložisek osy elevace	31
7.2	Parametry čelního ozubeného soukolí	33
7.3	Převodové soustrojí pro azimutální osu	33
7.3.1	Návrh hřídele a ložisek osy azimutu	34
8	Volba pohonu	35
8.1	Výpočet potřebných otáček motoru	35
8.2	Napájení montáže	38
8.2.1	Návrh spínaného zdroje pro napájení montáže	38
8.2.2	Simulace spínaného zdroje SEPIC	46
8.2.3	Oživení a měření na spínaném zdroji SEPIC	48
8.2.4	Návrh spínaných zdrojů pro napájení řídicí elektroniky	50
9	Snímání polohy	53
9.1	Magnetický lineární snímač	54
9.2	Lineární magnetický kodér AS5311	55
9.3	Návrh kotouče pro lineární magnetický pásek	55
9.4	Návrh obvodu pro snímání polohy	57
10	Volba řízení pohonu	59
10.1	Schéma zapojení	60
10.2	Softwarové varianty řízení navigace montáže	62
11	Závěr	65
	Literatura	71
A	Výpočet převodovky	I
A.1	Parametry šnekového soukolí	I
A.2	Parametry čelního ozubeného soukolí	VII
B	Obsah příloženého CD	XI

Seznam použitých zkratek a symbolů

Označení veličiny	Základní jednotka	Název veličiny
α	$^\circ$	úhel profilu záběru
β	$^\circ$	úhel rotace osy
β_{min}	$^\circ$	nejmenší dosažený úhel převodovky
ΔI_L	A	proudu cívkou špička-špička zvlnění
ΔU_{RPL}	V	napětí špička-špička zvlnění
δ	mm	hloubka vniku
η	$\%$	účinnost
γ	$^\circ$	úhel stoupání šroubovice
μ	—	komplexní permeabilita
μ_{pu}	—	počáteční permeabilita
ω	$\frac{rad}{s}$	úhlová rychlost
ρ	Ωm	měrný elektrický odpor
a	m	roztečná osová vzdálenost
a_0	m	minimální rozměr malé osy sekundárního zrcadla
A_h	m	výška koncovky na připojení fotoaparátu
A_L	$\frac{mH}{1000z^2}$	cívková (indukční) konstanta
a_{sek}	m	rozměr malé osy sekundárního zrcadla
a_w	m	osová vzdálenost
b	m	šířka
C	F	kapacita kondenzátoru
c	—	součinitel hlavové vůle šneku
C_b	m	hloubka těla fotoaparátu po rovinu CCD snímače
C_{OUT}	F	kapacita výstupního kondenzátoru
Cc	F	kompenzační kondenzátor, vazební kondenzátor
D	—	střída spínání
d	m	průměr
d_{100}	m	velikost 100 % osvětlení zorného pole
D_{max}	—	maximální střída spínání
D_{min}	—	minimální střída spínání
D_{OB}	m	průměr objektivu
d_{OK}	m	průměr zornice lidského oka
D_{prim}	m	průměr primárního zrcadla

d_{sek}	m	vnitřní průměr sekundárního zrcadla
D_t	m	vnitřní průměr tubusu
DC/DC		označení převodníku stejnosměrných napětí
DEC	$^\circ$	deklinace
ESR	Ω	efektivní sériový odpor kondenzátoru
f	Hz	pracovní frekvence
F_h	m	výška zasunutého okulárového výtahu
f_{OB}	m	ohnisková vzdálenost objektivu
f_{OK}	m	ohnisková vzdálenost okuláru
f_{prim}	m	ohnisková vzdálenost primárního zrcadla
f_{sek}	m	ohnisková vzdálenost sekundárního zrcadla
f_{SW}	Hz	spínací frekvence
H	$\frac{A}{m}$	intenzita magnetického pole
h	m	výška
I	A	elektrický proud
i	–	převodový poměr
$I_{Cc(RMS)}$	A	efektivní hodnota nesinusového proudu vazebním kondenzátorem
I_{IN}	A	proud tekoucí do vstupu
I'_{IN}	A	vstupní proud uvažovaný pro nejhorší možnou účinnost
$I_{L1a(peak)}$	A	špičková hodnota proudu na primární cívice
$I_{L1b(peak)}$	A	špičková hodnota proudu na sekundární cívice
I_{OUT}	A	proud odebíraný z výstupu
$I_{Q1(peak)}$	A	špičková hodnota proudu spínacím tranzistorem
$I_{Q1(RMS)}$	A	efektivní hodnota nesinusového proudu spínacím tranzistorem
L	H	indukčnost cívky
l	m	délka
L_n	H	indukčnost cívky pro n závitů
$L1_a$	H	indukčnost primární cívky
$L1_b$	H	indukčnost sekundární cívky
$L1_{a_{min}}$	H	minimální indukčnost na sekundární cívice
$L1_{b_{min}}$	H	minimální indukčnost na primární cívice
m	m	modul ozubení
m_{kr}	–	počet kroků motoru

N	–	počet závitů
n	s^{-1}	otáčky
n_o	$^{\circ} \cdot s^{-1}$	otáčky „oblohy“
Oe	–	Oersted, definován jako $\frac{1000}{4 \cdot \pi}$
P	W	odváděný výkon
p	m	rozteč ozubení
p_z	m	stoupání šroubovice
PDA		personal digital assistant (kapesní počítač)
PWM		označení obvodu pulzně šířkové modulace
q	–	součinitel průměru šneku
r_{DS}	Ω	odpor drain-source v sepnutém stavu
RA	$^{\circ}$	rektascenze
$RAMPS$		RepRap Arduino Mega Pololu Shield
s	m	vzdálenost ohniskové roviny od optické osy
s_0	m	vzdálenost průsečíku okraje kužele a optické osy ohniska
$SEPIC$		Single Ended Primary Inductor Converter
sz	–	světelný zisk
t	m	prohloubení paraboloidu
t_{fall}	s	doba trvání sestupné hrany
t_{rise}	s	doba trvání náběžné hrany
T_t	m	tloušťka stěny tubusu
U_c	V	napětí na vazebním kondenzátoru
U_D	V	propustné napětí na diodě
$U_{IN(max)}$	V	maximální vstupní napětí
$U_{IN(min)}$	V	minimální vstupní napětí
U_{IN}	V	napájecí (vstupní) napětí
U_{OUT}	V	výstupní napětí
U_Q	V	úbytek napětí na tranzistoru
w	$^{\circ}$	rozměr malé osy sekundárního zrcadla
x	–	součinitel posunutí profilu
z	–	počet zubů / chodů
zv	–	zvětšení

Seznam obrázků

2.1	Hans Lippershey [1]	3
2.2	Galileo Galilei [2]	3
2.3	Galileův vylepšený dalekohled [5]	4
2.4	Jan Kepler [3]	4
2.5	Sir Isaac Newton [4]	4
2.6	Newtonův dalekohled [7]	4
3.1	spektrum elektromagnetického záření [8]	6
3.2	Refraktor velký 15 palců z poč. 19. stol. [15]	7
3.3	Moderní refraktor, největší ze série SW apochromátů [16]	8
3.4	Princip funkce Keplerova dalekohledu [20]	8
3.5	Princip funkce Galileova dalekohledu [21]	9
3.6	Největší Newtonův dalekohled od roku 1873 [13]	9
3.7	Moderní reflektor [17]	10
3.8	Princip funkce Cassegrainova dalekohledu [26]	10
3.9	Princip funkce Newtonova dalekohledu [23]	11
3.10	Princip funkce Schmidt-Cassegrainova dalekohledu [25]	11
3.11	Princip funkce Maksutov-Cassegrainova dalekohledu [22]	12
4.1	Popis os dalekohledu azimutální montáže [28]	13
4.2	Moderní DOBSON GoTo [18]	14
4.3	Popis os dalekohledu paralaktické montáže [28]	15
4.4	Německá paralaktická montáž [19] a její nákres [30]	15
4.5	Dalekohled v observatoři Mount Wilson [29] a její nákres [30]	16
4.6	Nákres osově montáže [30]	16
4.7	Dalekohled v Palomar Observatory [31] a jeho nákres [30]	17
4.8	Dalekohled D50 v hvězdárně v Ondřejově [32] a jeho nákres [30]	17
4.9	Základní charakteristiky nebeské sféry. [34]	18

4.10	Pozorování tělesa z hlediska zvolené montáže [35]	20
4.11	Ukázka řešení pohonu osy elevace Sky-Watcher	21
5.1	Příklad setu zrcadel Siberia [38]	22
5.2	Schéma pro výpočet ohniska sekundárního zrcadla [37]	23
5.3	Schéma dalekohledu se světelnými kužely [37]	24
5.4	Schéma dalekohledu s vykresleným zorným polem [37]	24
5.5	Schéma dalekohledu pro malou osu sekundárního zrcadla [37]	25
5.6	Návrh optické soustavy v dalekohledu Newton	26
6.1	Popis návrhu dalekohledu Dobson	28
6.2	Popis pohybů dalekohledu Dobson	29
7.1	Převodové soustrojí elevační osy	30
7.2	Návrh a popis elevační osy	32
7.3	Převodové soustrojí azimutální osy	34
7.4	Návrh osy azimutu	34
8.1	Krokový motor SX17-1005LQCEF od firmy Microcon	36
8.2	Schéma zapojení modulu DRV8825	37
8.3	SEPIC je kombinací zdrojů Step-down a Step-up	39
8.4	Typické zapojení obvodu LM3481 s topologií SEPIC [59]	40
8.5	Stejnoseměrná magnetizační charakteristika [60]	42
8.6	Graf závislosti poklesu permeability na intenzitě magnetického pole [60]	43
8.7	Simulovaný obvod v simulátoru TINA	47
8.8	Schéma jednoduché umělé zátěže pro měření SEPIC	48
8.9	Zatěžovací charakteristika spínaného zdroje SEPIC	49
8.10	Účinnost spínaného zdroje SEPIC	49
8.11	Simulovaný obvod v simulátoru TINA	50
8.12	Měření zatěžovací charakteristiky a účinnosti zdroje $V_{OUT} = 3,3 V$	51
8.13	Měření zatěžovací charakteristiky a účinnosti zdroje $V_{OUT} = 5 V$	51
8.14	Napájení montáže dalekohledu	52
9.1	Princip funkce magnetického lineárního senzoru [64]	54
9.2	Interpolace s použitím lineárních Hallových senzorů [64]	55
9.3	Magnetický kodér AS5311 s multipólovou páskou či kroužkem [64]	56
9.4	Návrh kotouče s magnetickým páskem	56

9.5	Schéma zapojení senzoru AS5311	57
9.6	Návrh plošného spoje s magnetickým kódérem	57
9.7	Schéma sériové komunikace	58
10.1	Blokové schéma zapojení	60
10.2	Blokové schéma zapojení	61
10.3	Program HNSKY	62
10.4	Program Skymap	63
10.5	Program Stellarium	63
10.6	Navigační program Planetárium vytvořený v MATLABu	64
A.1	Hlavní parametry šnekového ozubeného kola	I
A.2	Zadané vstupní hodnoty pro návrh šnekového soukolí	VI
A.3	Vypočítané hodnoty šnekového soukolí programem Autodesk Inventor	VI
A.4	Hlavní parametry čelního ozubeného soukolí	VII
A.5	Zadané vstupní hodnoty pro návrh čelního ozubeného soukolí	X
A.6	Vypočítané hodnoty čelního soukolí programem Autodesk Inventor	X

Seznam tabulek

7.1	Hlavní geometrické hodnoty šnekového soukolí pro osu elevace	31
7.2	Hlavní geometrické hodnoty čelního ozubeného soukolí pro osu elevace . .	33

Kapitola 1

Úvod

Pozorování dění kolem sebe patřilo od pradávna k základní lidské činnosti, která uspokojovala přirozenou lidskou zvědavost. Do vynálezu dalekohledu se lidé museli spoléhat pouze na své oko a astronomické výpočty.

Významným bodem byl rok 1609, kdy Galileo Galilei namířil svůj dalekohled na Měsíc, a na jeho povrchu pozoroval krátery. V té době se tímto dalekohledem krom Měsíce nedalo nic jiného pozorovat.

Touha po poznání vesmíru hnala lidstvo k vývoji dokonalejších zařízení. Ve spojení s pokrokem a technologií vznikl systém vyhledávání nebeských objektů k výraznému usnadnění. Vznikl elektronicky naváděný astronomický dalekohled. Automatizace dalekohledu nám pomůže najít objekty, které neznáme, a to bez složitého „bloumání“ po obloze s pomocí atlasu hvězd.

Moderní teleskopy jsou vybaveny CCD kamerami, pro snímání planet sluneční soustavy, detailů Měsíce a Slunce. Drobná nepřesnost dalekohledu, jako je například vůle v převodovém ústrojí či periodická chyba při sledování hvězdy, může znehodnotit snímek během expozice. Pro dosažení odpovídajících vlastností snímků pořízených teleskopem je třeba dodržet převod bez vůle v soukolí a rozlišení pod 1“, které zajistí vhodná montáž.

Cílem této práce je vytvořit elektronické zařízení, které pomůže uživateli porozumět základům lidského vědění o vesmíru.

Kapitola 2

Historie dalekohledů

2.1 Historie dalekohledů

Objev prvního dalekohledu sahá daleko do minulosti, kdy Holanďan Hans Lippershey zjistil, že dvě čočky za sebou přibližují pozorovaný předmět. Lippershey vzal tyto dvě čočky, z nichž jedna byla vypouklá (spojka) a jedna vydutá (rozptylka), a umístil je do duté trubice. Díky tomuto zázraku mohl pozorovat předměty přiblížené a roku 1608 si nechal tento vynález patentovat. [1]



Hans Lippershey
(1570-1619)

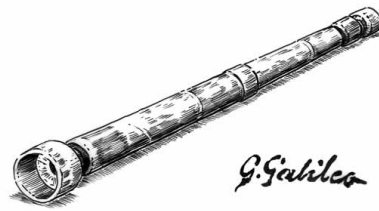
Obrázek 2.1: Hans Lippershey [1]

Rok poté vylepšil tento vynález italský hvězdář Galileo Galilei a dalekohled tak umožnil pozorovat předměty až s dvacetinásobným zvětšení. Bohužel, Galileo zamířil svým novým dalekohledem na Slunce a záhy oslepl. [2]



Galileo Galilei
(1564-1642)

Obrázek 2.2: Galileo Galilei [2]



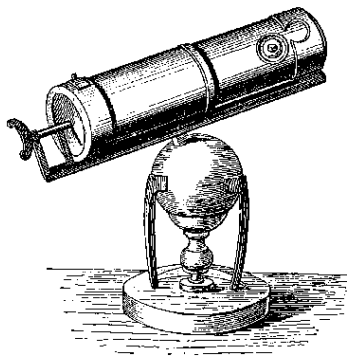
Obrázek 2.3: Galileův vylepšený dalekohled [5]

Johannes Kepler
(1571-1630)

Obrázek 2.4: Jan Kepler [3]

Podobný princip dalekohledu používal i Jan Kepler, avšak byl opatrnější a dalekohled opatřil při pozorování Slunce tmavým sklem. Keplera napadlo využít další spojky místo rozptylky v okuláru. Obraz byl sice převrácený, ale výstupní pupilka se tak stala příznivější pro správnou polohu oka a navíc v ohniskové rovině bylo možno umístit záměrný kříž pro přesná úhlová měření hvězd. [3]

Další, kdo pomohl k vývoji dalekohledu, byl anglický fyzik Isaac Newton. Newton si uvědomil, že optické vady způsobuje sklo rozkládající světlo na barvy spektra. Objektiv (spojku) nahradil kulovým zrcadlem a tohoto principu využívají astronomové dodnes. [4]



Obrázek 2.6: Newtonův dalekohled [7]

Sir Isaac Newton
(1642-1727)

Obrázek 2.5: Sir Isaac Newton [4]

Kapitola 3

Dalekohled

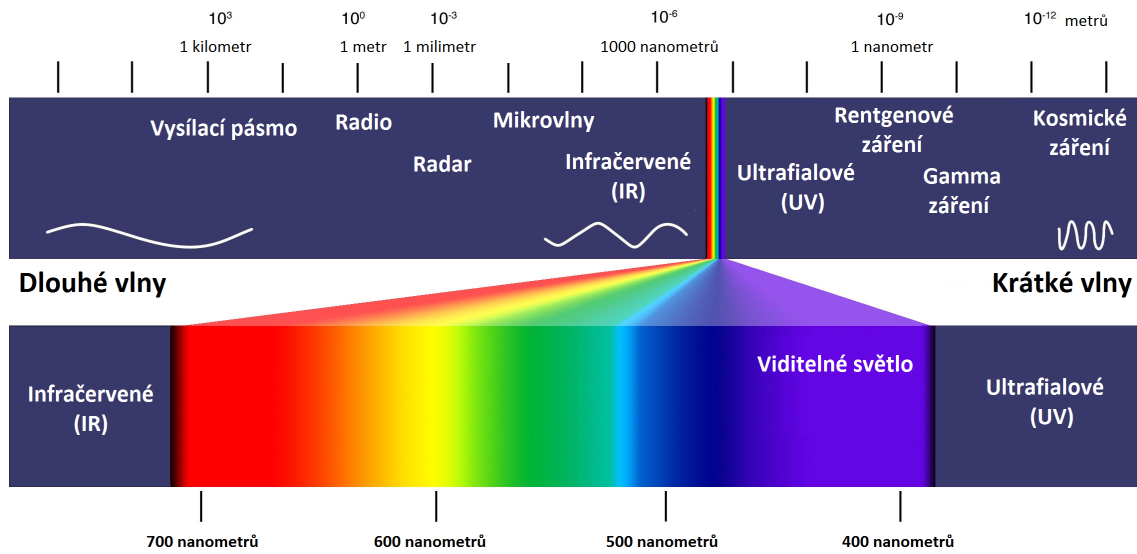
Dalekohled je optický přístroj (optická soustava), která nám umožňuje pozorovat vzdálené objekty. Přes objektiv soustřeďuje více světla, než dokáže lidské oko. Pomocí soustavy zrcadel a čoček vytváří obraz, který pozorujeme přes okulár. Obraz vidíme zvětšený a s vyššími detaily. [49]

3.1 Druhy dalekohledů

U dalekohledů se setkáváme s mnoha odlišnými typy. Záleží na tom podle jakého hlediska je můžeme srovnávat. [49]

3.1.1 Rozdělení dalekohledů dle oblasti barevného spektra

Lidské oko je přizpůsobeno viditelnému oboru elektromagnetického spektra. Mnoho dalekohledů právě proto pracuje s tímto úzkým proužkem v celém elektromagnetickém oboru. Existují však i dalekohledy, které pracují i mimo oblast viditelného spektra. Naše lidské oko citlivé na vlnové délky 400 nm - 800 nm. Tato část spektra se také nazývá jako světelné spektrum. Jednotlivé barvy, vyskytující se ve světelném spektru se nazývají spektrálními barvami a odpovídají jim určité intervaly vlnových délek elektromagnetického záření. [49]



Obrázek 3.1: spektrum elektromagnetického záření [8]

3.1.2 Rozdělení dalekohledů podle druhu pozorování

Rozlišujeme dva druhy dalekohledů: [49]

- Terestické (pozemské) - dalekohledy určené pro pozorování pozemské
- Astronomické (hvězdářské) - dalekohledy určené pro pozorování oblohy

3.1.3 Rozdělení dalekohledů podle typu optické soustavy

Základními parametry dalekohledu s optickou soustavou jsou:

- zvětšení - jednou ze dvou nejdůležitějších funkcí dalekohledu je zvětšení. Objektiv (čočka s velkou ohniskovou vzdáleností) vytvoří v ohniskové rovině obraz předmětu. Obraz vytvořený objektivem není nikterak velký. Pro pozorování těchto obrazů potřebujeme lupu. U dalekohledů využíváme okuláru, což je ve své podstatě lupa, kterou si prohlížíme onen vytvořený obrázek objektivem. Čím silnější je lupa (ohnisková vzdálenost je kratší), tím větší obrázek dostaneme. Obdobně čím je větší obrázek z objektivu (ohnisková vzdálenost je delší), tím je větší zvětšení dalekohledu. Zvětšení je tedy poměr ohniskové vzdálenosti objektivu a ohniskové vzdálenosti okuláru. [9]

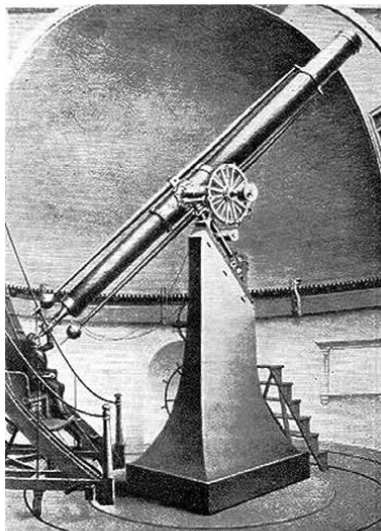
$$zv = \frac{f_{OB}}{f_{OK}} \quad (3.1)$$

- světelný zisk - dalekohled nejen zvětšuje, ale poskytuje zisk světla. U dalekohledu je nejdůležitější parametr průměr objektivu. Obecně platí, že čím větší je průměr dalekohledu, tím slabší objekty uvidíme. Průměr lidského oka je okolo 8 mm, avšak průměr dalekohledu je zpravidla větší. Plocha, na kterou dopadá světlo, je dána druhou mocninou jeho průměru. Světlo dopadající na lidské oko je dána druhou mocninou průměru zorničky. Světelný zisk je tedy poměrné číslo, která udává násobek, kolikrát je zesíleno (zeslabeno) světlo vstupující do objektivu ku světlu, které je zobrazováno na výstupu dalekohledu a pozorujeme ho našim okem. [9]

$$sv = \frac{D_{OB}^2}{d_{OK}^2} \quad (3.2)$$

Na základě těchto vlastností a jejich zlepšování vznikly nové typy dalekohledů. Podle typu zvolené optické soustavy rozlišujeme dalekohledy čočkové, zrcadlové a kombinované (katadioptrické).

ČOČKOVÝ DALEKOHLED (refraktor)



Obrázek 3.2: Refraktor velký 15 palců z poč. 19. stol. [15]

Refraktor je dalekohled skládající se z objektivu a korekční soustavy. Vstupní objektivovou část refraktoru tvoří zpravidla soustava několika čoček, většinou spojných a rozptylných, vybroušených z různého skla. Na výstupní straně dalekohledu je umístěn okulár, který může být pevný i výměnný. Okulár opět tvoří soustava optických čoček. [10] Tento typ dalekohledu trpí řadou vad, jako je například barevná vada. Tuto vadu však lze korigovat kombinací několika čoček z různých druhů skel (flintové sklo, korunové sklo). Dalekohled, který obsahuje tuto korekci se nazývá achromatický (zkráceně achromát). Zvětšení je tak bez rušivého efektu, avšak u větších zvětšení se opět tato vada začne projevovat. Přidáním dalších čoček, pro lepší korekci, vznikne dalekohled apochromátový (apochromát). Apochromát rušivými efekty již netrpí, ale kvůli náročnosti výroby je jeho cena poměrně vyšší. [11]

Dnes jsou čočkové dalekohledy v astronomii kvůli jejich vlastnostem odsunuty stranou. V astronomii mají však specifické použití pro pozorování jasných objektů (Měsíce, planet, dvojhvězd atp.). V astrofotografii se převážně používají refraktory vyšší barevné třídy a využívají se pro pozemské pozorování. [16]

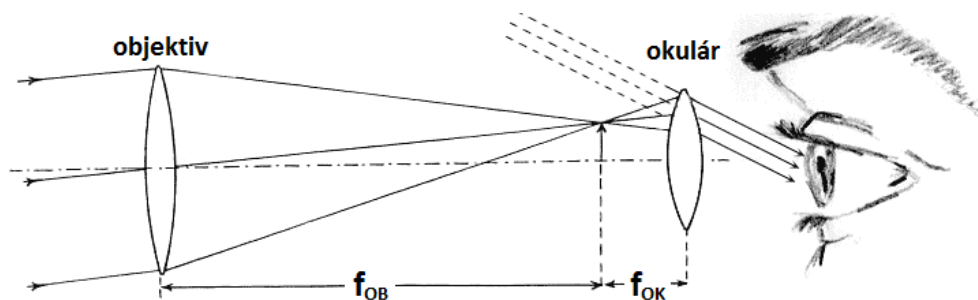


Obrázek 3.3: Moderní refraktor, největší ze série SW apochromátů [16]

Příklady konstrukce čočkových dalekohledů

- Keplerův (hvězdářský) dalekohled

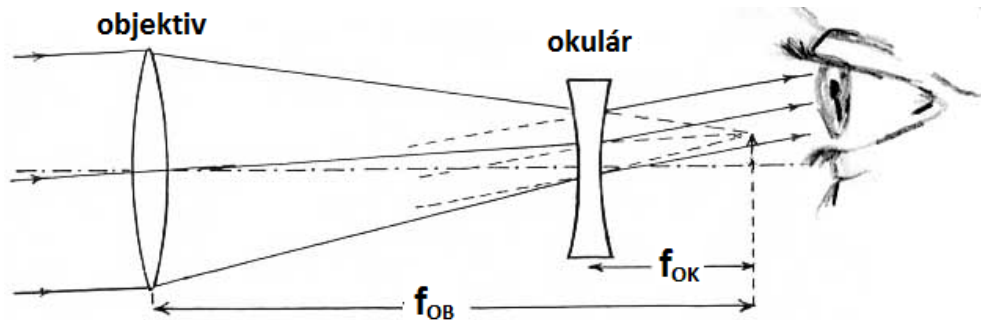
Refraktor obsahuje dvě soustavy spojných čoček, které mají společnou optickou osu. Ohnisková vzdálenost objektivu je velká a okuláru naopak malá. Ohnisko obrazu splývá s ohniskem okuláru. Objektiv vytvoří obraz pozorovaného předmětu v místě předmětového ohniska okuláru. Okulár tento obraz přiblíží jako lupa. Nevýhoda dalekohledu je ta, že pozorovaný obraz zůstává po přiblížení převrácený, ale to je v astronomii nepodstatné. [12]



Obrázek 3.4: Princip funkce Keplerova dalekohledu [20]

- Galileův (holandský) dalekohled

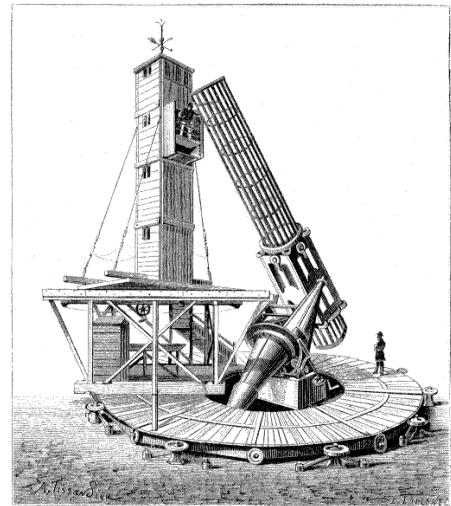
Refraktor se skládá ze spojného objektivu, který má velkou ohniskovou vzdálenost a rozptylového okuláru s malou ohniskovou vzdáleností. Objektiv vytvoří obraz v místě obrazového ohniska okuláru. Tento typ konstrukce dalekohledu nalezneme např. v divadelním kukátku. [12]



Obrázek 3.5: Princip funkce Galileova dalekohledu [21]

ZRCADLOVÉ DALEKOHLEDY (reflektory)

V porovnání s čočkovým dalekohledem se u těchto typů dalekohledu využívá vyduté zrcadlo jako objektiv. Toto zrcadlo je umístěné na dně tubusu, kde soustřeďuje světlo a odráží jej na malé rovinné zrcátko. Např. u Newtonova dalekohledu odráží toto malé zrcátko světlo na bok tubusu do okuláru. [10] Zrcadlový dalekohled na rozdíl od čočkového dalekohledu netrpí barevnou vadou. Výroba zrcadla je levnější a má mnohem lepší uspořádání tubusu. Vzhledem k tomu, že světlo se odráží pomocí zrcadel, dosahuje velikost tubusu podstatně menších rozměrů než tubus u čočkového dalekohledu. Navíc je těžké zrcadlo umístěné na straně pozorovatele a nikoliv na jeho vstupní straně, jako tomu je u objektivu čočkového dalekohledu. [12]



Obrázek 3.6: Největší Newtonův dalekohled od roku 1873 [13]

Nevýhoda těchto dalekohledů je otevřený tubus, kvůli kterému do dalekohledu snadno vniká prach a znečišťuje tak optiku. U světlejších dalekohledů ($f/6$ a více) se objevuje barevné koma, ale to lze u moderních dalekohledů korigovat dodatečným optickým členem (koma korektorem). [17]

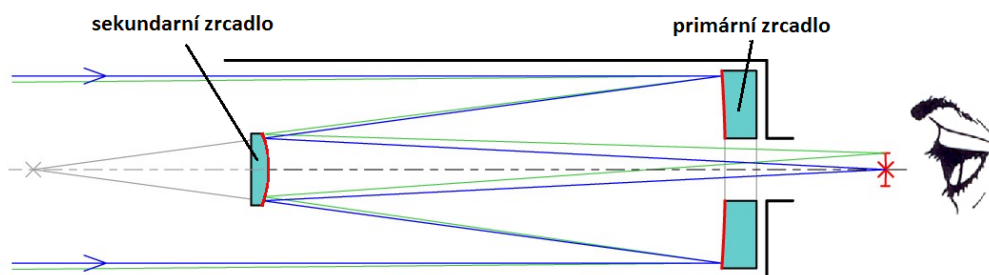


Obrázek 3.7: Moderní reflektor [17]

Příklady konstrukce zrcadlových dalekohledů

- Cassegrainův dalekohled

Tento typ konstrukce má duté primární zrcadlo. Světelný svazek se odráží od sekundárního zrcadla a vrací se pak otvorem v primárním parabolickém zrcadle do okuláru. V ohnisku dalekohledu je zapotřebí korekčního členu. Výhoda této konstrukce je, že má podstatně delší ohniskovou vzdálenost a umožňuje tak větší rozlišení. [12]

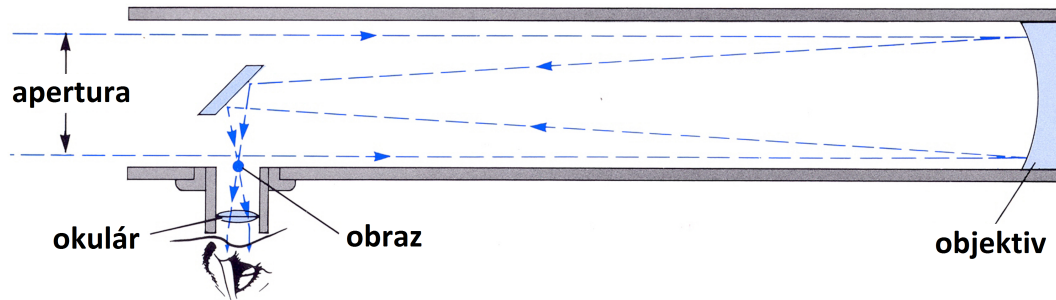


Obrázek 3.8: Princip funkce Cassegrainova dalekohledu [26]

- Newtonův dalekohled

Konstrukce obsahuje tubus, primární a sekundární zrcadlo. Primární zrcadlo má parabolický tvar a je umístěné na dně tubusu. Na rozdíl od konstrukce Cassegrainova typu, zde využíváme rovinné zrcátko. Světlo se zde odráží od parabolického

zrcadla a ještě před průchodem ohniska je odkloněno stranou rovinným zrcátkem do okuláru. Nevýhoda je, že optická soustava dvou zrcadel a okuláru způsobuje otočení vzniklého obrazu, jak stranově tak pólově. [12]



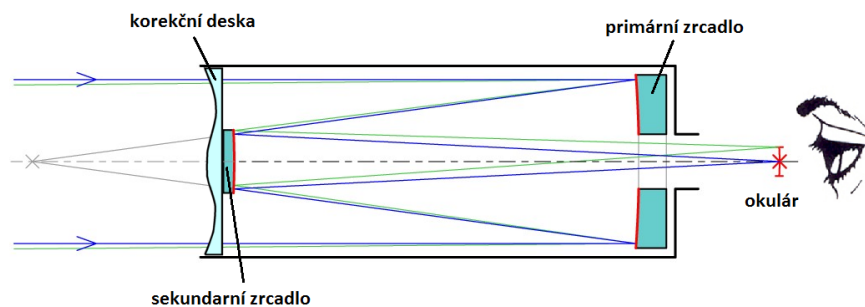
Obrázek 3.9: Princip funkce Newtonova dalekohledu [23]

ZRCADLO-ČOČKOVÉ DALEKOHLEDY (katadioptrické)

Kombinace zrcadel a refrakčních optických členů vzniká tzv. katadioptrický systém. Tvoří jej zrcadlová soustava uzavřena korekční deskou (meniskem), která využívá odrazu i lomu světla. Meniskus, který je umístěn před hlavním zrcadlem, odstraňuje vady ve velmi širokém poli. Tato kombinace umožňuje pozorovat velkou oblast oblohy a dosahuje větší světelnosti. Nejznámější konstrukce jsou např. Schmidt-Cassegrain, popř. Maksutov [24]

Příklady konstrukce zrcadlo-čočkových dalekohledů

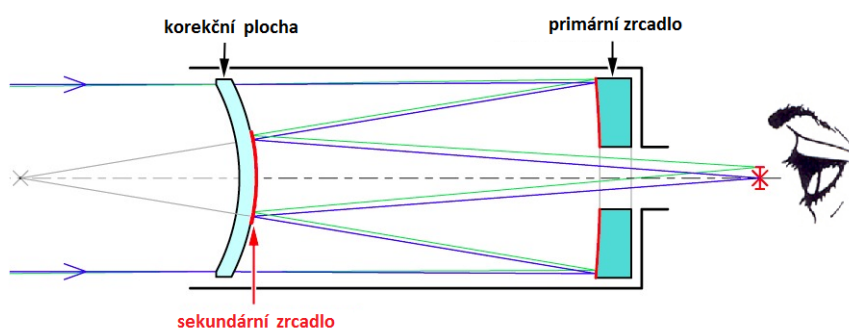
- Schmidt-Cassegrainův dalekohled Sekundární zrcadlo obsahuje korekční desku (meniskus), která je ve tvaru toroidu. Složitý tvar menisku koriguje různé světelné vady. Meniskus je umístěn před hlavním zrcadlem, tedy paprsky světla nejprve prochází skrz desku a až poté dopadají na hlavní zrcadlo. [24]



Obrázek 3.10: Princip funkce Schmidt-Cassegrainova dalekohledu [25]

- Maksutov-Cassegrainův dalekohled

Na rozdíl od Schmidt-Cassegrainově dalekohledu, je tato konstrukce snadnější na výrobu. Dalekohled má totiž zjednodušenou optickou plochu menisku do kulovitého tvaru a primární zrcadlo je rovněž kulovitého tvaru. Nevýhoda je, že korekční člen je masivní. Tato konstrukce dovoluje pozorovat velkou část noční oblohy, a proto je mezi astronomy oblíbená. [24]



Obrázek 3.11: Princip funkce Maksutov-Cassegrainova dalekohledu [22]

Kapitola 4

Montáž dalekohledu

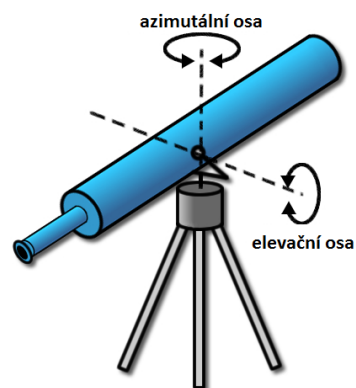
4.1 Typy montáže

Pokud potřebujeme zamířit dalekohled na libovolný bod na obloze, je potřeba dalekohledem pohybovat ve dvou směrech. Podle sklonu os rozdělujeme montáže na:

- Azimutální
- Paralaktická

4.1.1 Azimutální montáž

Montáž umožňuje otáčení dalekohledu ve dvou osách. Jedna osa je rovnoběžná s vodorovnou hladinou a druhá je na ní kolmá. Pohybem (otáčením) kolem první osy nastavujeme polohu vůči horizontu (azimut) a pohybem (otáčením) kolem druhé osy nastavujeme výšku nad obzorem (elevaci). Konstrukce je jednoduchá a tedy i výroba není drahá. Neustálé otáčení naší planety způsobuje změnu polohy pozorovaného objektu. Změny jsou nerovnoměrné, a tedy i pohyb dalekohledu v obou osách je nestejnoměrný. Azimutální montáž je proto vhodné vybavit elektronickým naváděním, díky kterému by zůstal pozorovaný objekt v zorném poli.



Obrázek 4.1: Popis os dalekohledu azimutální montáže [28]

Nevýhoda této montáže je otáčení zorného pole během pozorování. Tento problém se nejvíce projevuje při fotografování. Krom potřebného elektronického navádění musíme montáž doplnit o tzv. derotátor, což je zařízení, které kompenzuje rotaci zorného pole. Tento typ montáže nepotřebuje tolik prostoru a není technicky náročný, proto se nejvíce používá u staveb velkých dalekohledů a observatoří. [27]

Dobsonova montáž



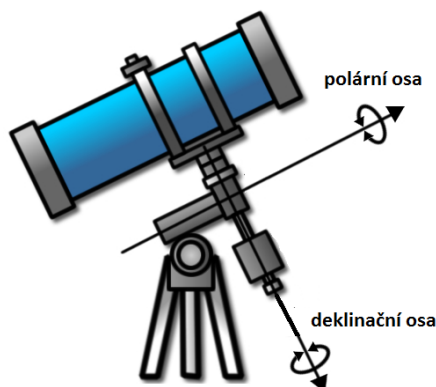
Obrázek 4.2: Moderní DOBSON GoTo [18]

Pokud zkombinujeme azimutální montáž s Newtonovým zrcadlovým dalekohledem, vznikne tzv. Dobsonova montáž. Dobsonova montáž je nejlepší dalekohled s poměrem cena/výkon. Její výroba není nikterak drahá a konstrukci lze sestavit i v domácích podmínkách. Ušetřené peníze pak lze investovat do optického systému a příslušenství dalekohledu. Nevýhoda je prostorová náročnost montáže a hmotnost továrně vyráběných podstav. S pokrokem elektroniky se tyto montáže doplňují o snímače aktuální polohy, elektroniku pro nastavení dalekohledu do základní polohy a udržování pozorovaného objektu v zorném poli. [27] [18]

4.1.2 Paralaktická (rovníková) montáž

Paralaktickou montáž odstraňuje problém s nerovnoměrným pohybem nebeských těles vůči zemskému povrchu. Montáž dostaneme z montáže azimutální tak, že osu elevace (osa kolmá na vodorovnou hladinu) skloníme a zorientujeme jí rovnoběžně se zemskou osou. Sklon odpovídá zeměpisné šířce, kde je montáž umístěna. Přesný pohyb hvězd na obloze zajistíme tak, že rychlost otáčení této osy bude stejná jako je rychlost otáčení zemské osy. Tato osa se pak nazývá polární nebo také hodinová. Druhá osa na ní kolmá se nazývá deklinační. U azimutální montáže měříme úhel a výšku pozorovaného objektu, avšak pro paralaktickou montáž nás zajímá hodinový úhel (označovaný RA) a deklinace

(označovaný DE). S těmito veličinami nejčastěji pracují počítačové programy určené pro astronomická pozorování. [27]

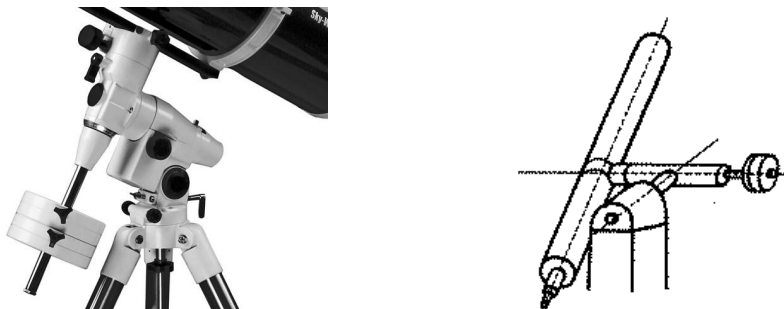


Obrázek 4.3: Popis os dalekohledu paralaktické montáže [28]

Příklady provedení paralaktické montáže

- Německá montáž

Jedná se o druh montáže, která je nejrozšířenější. Polární osa, na které je umístěn dalekohled, se nachází na pilíři nebo na stativu zařízení. Kolmo k této ose je připevněna osa deklinační s protizávažím nebo s dalším dalekohledem. Nevýhoda je, že s protizávažím narostla hmotnost celého zařízení. Německá montáž je vhodná pro všechny druhy dalekohledů, avšak v některých polohách dochází k nárazu dalekohledu o stativ a dalekohled je potřeba otočit o 180° . Toto je zvláště nevýhodné při pořizování fotografií. Moderní německé montáže jsou vybavené motory a elektronikou pro nastavení dalekohledu do různých poloh dle souřadnic objektu. [27]

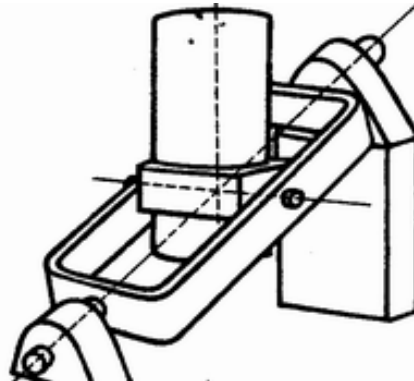
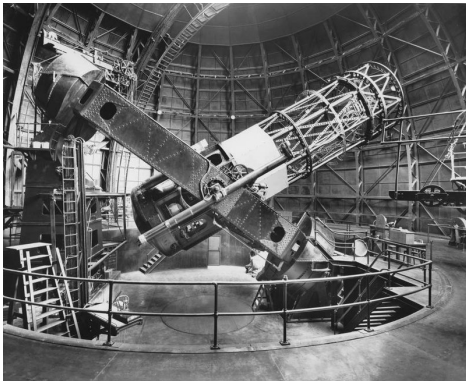


Obrázek 4.4: Německá paralaktická montáž [19] a její nákres [30]

- Anglická montáž

- Rámová montáž

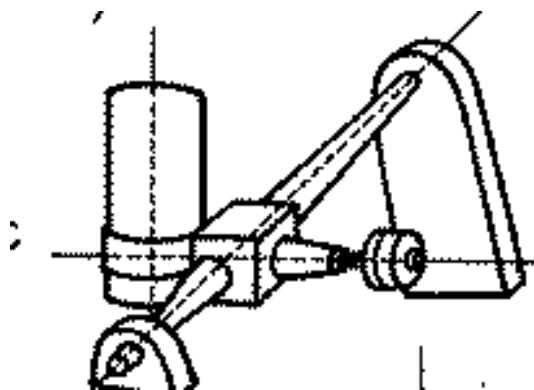
Montáž neobsahuje žádné protizávaží, má totiž polární osu upevněnou ve dvou bodech. Dalekohled je ve stabilní poloze a netrpí na velké chvění. Často se tento druh montáže používá pro velké zrcadlové dalekohledy a observatoře. Nevýhoda je, že s ní nelze pozorovat objekty blízko severního pólu. [27]



Obrázek 4.5: Dalekohled v observatoři Mount Wilson [29] a její nákres [30]

- Osová montáž

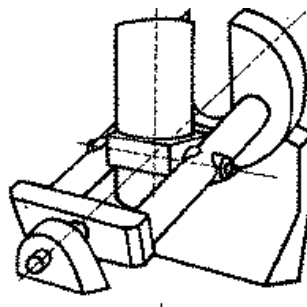
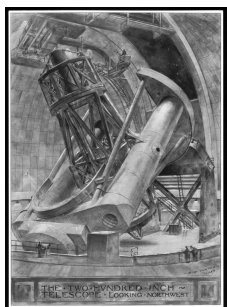
Podobná předchozí montáži, ale využívá protizávaží a dalekohled je umístěn na jedné straně polární osy. Tato úprava již umožňuje pozorovat objekty blízko severního pólu. Často se tento druh montáže používá pro velké zrcadlové dalekohledy a observatoře. Místo protizávaží lze použít další dalekohled či fotoaparát. [27]



Obrázek 4.6: Nákres osové montáže [30]

– Podkovovitá montáž

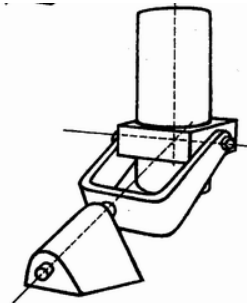
Odstraňuje nedostatky obou předchozích typů anglických montáží. Používá podkovovitou součást umístěnou na polární ose, která se pohybuje na speciálních ložiskách. Nepotřebuje tedy žádné protizávaží a umožňuje pozorovat objekty blízké severnímu pólu. [27]



Obrázek 4.7: Dalekohled v Palomar Observatoři [31] a jeho nákres [30]

• Vidlicová montáž

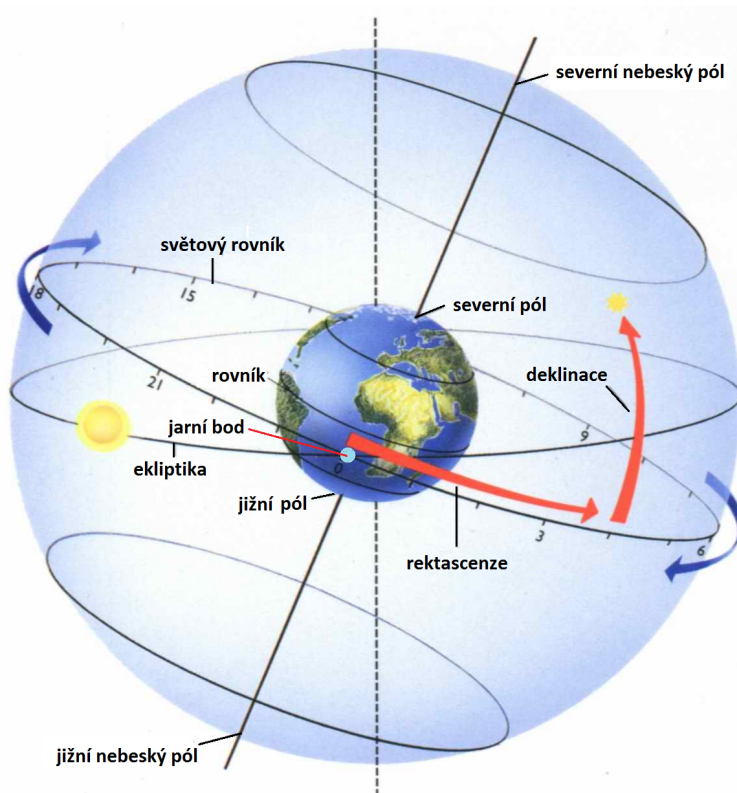
Vidlicová montáž vznikla modifikací anglické rámové montáže, kde se odstranila horní část polární osy. Výsledný tvar připomíná vidlici, proto se této montáži začalo říkat vidlicová. Polární osa musí být ve spodní části dostatečně upevněná, protože drží celou hmotnost dalekohledu. Velikost vidlice se navrhuje přesně na daný typ dalekohledu, aby nebyl omezen pohyb v deklinační ose. Díky absenci horní části polární osy nic neomezuje pozorování objektů v blízkosti severního pólu. Nedoporučuje se pro použití dlouhých dalekohledů, jinak by vidlice vycházely příliš dlouhé. [27]



Obrázek 4.8: Dalekohled D50 v hvězdárně v Ondřejově [32] a jeho nákres [30]

4.2 Pozorování hvězdné oblohy v závislosti na použité montáži

Na chvíli se v noci zastavte a podívejte se na noční oblohu, třeba na některé ze souhvězdí. Po chvíli pozorování zjistíte, že souhvězdí se pomalu pohybuje a možná i rotuje. Tím, že jako pozorovatel se nacházíme na povrchu Země, která se s námi otáčí, vnímáme pohyb nebeské sféry, a tedy i zdánlivý pohyb hvězd. Nebeská sféra je vlastně myšlená koule, u které neuvažujeme její poloměr (teoreticky nekonečný) a v jejím středu se nachází Země. Na tuto myšlenkovou kouli promítáme nebeská tělesa, tak jako by byla ve stejné vzdálenosti od Země. Nebeská sféra se každý den otáčí od východu k západu z důvodu otáčení Zeměkoule podle vlastní osy. *„Zdá se, že se nebeská sféra otáčí okolo světových pólů, jakoby okolo prodloužené vlastní osy Země. Zemská osa směřuje k oběma světovým pólům. I když se zdá, že poloha světových pólů je neměnná, ve skutečnosti se mírně posouvají v důsledku precese.”* [33]



Obrázek 4.9: Základní charakteristiky nebeské sféry. [34]

4.2. POZOROVÁNÍ HVĚZDNÉ OBLOHY V ZÁVISLOSTI NA POUŽITÉ MONTÁŽI 19

Pokud prodloužíme světový rovník a promítneme jej na nebeskou sféru, dostaneme pomyslný nebeský rovník, který rozděluje nebeskou sféru na dvě polokoule. Zeměpisné délce na nebeské sféře odpovídá tzv. rektascenze „*Rektascenze (zkratka RA, symbol α) je úhel, který svírá rovina procházející světovými póly a nebeským tělesem s rovinou procházející světovými póly a jarním bodem. Rektascenze se obvykle vyjadřuje v hodinách, minutách a sekundách, i když je možno ji vyjádřit také jako úhel. Jedna hodina odpovídá úhlu 15° .*” [33] Nulová hodnota rektascenze je v místě zdánlivého pohybu Slunce na nebeské sféře. Pohyb Slunce na nebeské sféře je opět důsledek rotace Země kolem vlastní osy, tato dráha se nazývá ekliptika.

„*Ekliptika je zdánlivá roční dráha Slunce pohybujícího se na pozadí hvězd. Protíná světový rovník v jarním a podzimním bodě. Ve skutečnosti se jedná o průmět oběžné dráhy Země na nebeskou sféru. Protože zemská osa je skloněná, svírá ekliptika se světovým rovníkem asi $23,5^\circ$. Toto číslo je známé pod názvem sklon ekliptiky. Póly ekliptiky jsou 90° od ekliptiky a leží v souhvězdí Draka a Mečouna.*” [33] Dvakrát v roce protíná dráha Slunce světový rovník, okamžiku kdy k tomu dochází odpovídá rovnodennost. V místě, kde se protíná ekliptika se zemským rovníkem směrem k severní části mluvíme o jarní rovnodennosti a zde je nulový bod rektascenze. Hodnotu rektascenze měříme od tohoto bodu směrem proti otáčení nebeské sféry, ale ne v úhlových jednotkách nýbrž v jednotkách času.

Obdobně zeměpisné délce odpovídá na nebeské sféře tzv. deklinace. „*Deklinace (zkratka dec., symbol δ) je úhlová vzdálenost tělesa severně nebo jižně od světového rovníku. Je kladná směrem k severnímu světovému pólu a záporná k jižnímu světovému pólu.*” [33]

Pozorování oblohy z hlediska zvolené montáže

- Azimutální montáž

Otáčením Země okolo vlastní osy, způsobuje změnu azimutu a elevace pozorovaného nebeského objektu. Pozorovaný objekt uniká ze zorného pole a dalekohled je potřeba průběžně nastavovat v obou osách, jak v azimutální tak v elevační. Navíc dochází k rotaci pozorovaného objektu. [27]

- Paralaktická montáž

Neustálé unikání pozorovaného objektu ze zorného pole řeší montáž paralaktická. Díky tomu, že jedna z os je orientována rovnoběžně se zemskou osou a druhá se otáčí stejnou rychlostí jako naše planeta Země, nedochází k problémům s nerovnoměrným pohybem nebeských těles. [27]



Obrázek 4.10: Pozorování tělesa z hlediska zvolené montáže [35]

4.3 Přehled pohonů pro montáže

Pohony pro pohánění montáže jsou různé. Od pohonu manuálního, přes nejstarší hodinové stroje, až po elektromotory řízené počítačem.

Manuální pohon je poháněn pomocí vlastních rukou pozorovatele, kdy otáčí nejčastěji šnekovým soukolím přes prvek např. přes bowden, který snižuje chvění a roztřesení obrazu. Tato metoda se většinou používá pro vizuální pozorování a pro nenáročnou astrofotografii.

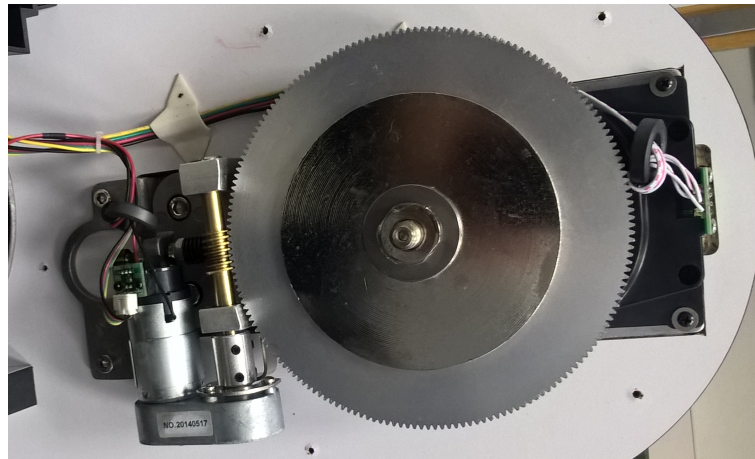
Hodinové stroje jsou nejstarší pohony os dalekohledů. Pohon byl poháněn závažím s odstředivým regulátorem otáček podobný jako měli stroje z období páry.

V moderní době je dobré sáhnout po pohonech s elektromotory, pro dosažení lepších výsledků náročné astrofotografie. Pro polární osu se hodí motor synchronní, protože jeho otáčky jsou závislé na frekvenci střídavého proudu a nezávislé na zatěžovacím momentu. U synchronního motoru se jeho rotor pohybuje plynule, a to zajišťuje jemný pohyb polární osy montáže. Tento typ motoru má však malý rozsah regulace otáček, a proto vhodnější varianta je použít krokové motory.

Otáčky krokového motoru lze regulovat za pomoci počítače nebo pomoci mikroprocesoru. Problém krokových motorů je však jejich trhavý pohyb, proto se využívá vhodně převodovky, převodů a pružných spojek mezi šnekovým soukolím a motorem, pro jejich

plynulejší chod.

Hlavní převod os je řešen pomocí šnekového ozubeného kola a šneku. Kvalita opracování tohoto soukolí pak ovlivňuje přesnost a plynulost pohybu montáže. Pokud je soukolí vyrobeno nekvalitně, dochází k nepravidelnému chodu montáže, a způsobuje značný problém při pořizování fotografií. „Významný parametr je tzv. periodická chyba šnekového soukolí, která způsobuje zpomalování a zrychlování pohybu při jeho každé otočce a je hlavně způsobena jeho „háživostí“. Periodická chyba se dá zčásti eliminovat pomocí elektronického regulátoru s funkcí PEC (periodic error correction), který mají některé z modernějších továrně vyráběných montáží (podmínkou dobré funkčnosti PEC je to, že periodická chyba šnekového soukolí musí být opravdu periodická, pokud není periodická, tak může být funkce PEC více na škodu než k užitku).“ [36]



Obrázek 4.11: Ukázka řešení pohonu osy elevace Sky-Watcher

Kapitola 5

Návrh optiky pro dalekohled

Newton

K dispozici pro stavbu dalekohledu bylo parabolické zrcadlo o průměru 150 mm s ohniskovou vzdáleností 965 mm, objímka na toto zrcadlo a tubus o délce 1220 mm a o průměru 170 mm. Newtonův dalekohled patří mezi jednoduché optické přístroje a pro jeho správnou funkci závisí několik parametrů a jeden hlavní je správné navržení sekundárního zrcadla. Pokud je sekundární zrcadlo příliš malé, nedokáže vykreslit dostatečné osvětlení zorného pole. Pokud je sekundární zrcadlo příliš velké, pak jeho velká plocha ubírá využitelnou plochu primárního zrcadla a degraduje funkci dalekohledu.



Obrázek 5.1: Příklad setu zrcadel Siberia [38]

Nejprve je potřeba určit délku světelného kužele mezi sekundárním zrcadlem a ohniskovou rovinou. Vzdálenost je dána použitým okulárovým výtahem a zdali chceme dalekohled využít pro vizuální pozorování nebo pro fotografování. Pokud chceme dalekohled jen na vizuální pozorování, stačí k výšce zasunutého okuláru připočítat asi 10 - 15 mm. Pokud však budeme chtít fotografovat, je potřeba připočítat i vzdálenost od přední stěny fotoaparátu po rovinu CCD snímače. [37]

Potom:

$$s = \frac{D_t}{2} + T_t + F_h + A_h + C_b = \frac{170}{2} + 1 + 64 + 25 + 22 = 197 \text{ mm} \quad (5.1)$$

Kde:

D_t ...vnitřní průměr tubusu (mm)

T_t ...tloušťka stěny tubusu (mm)

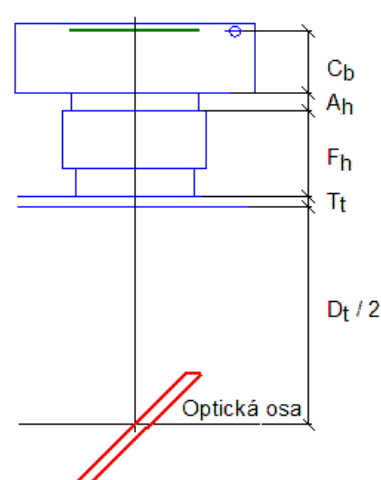
F_h ...výška zasunutého okulárového výtahu (mm)

A_h ...tloušťka koncovky pro připojení fotoaparátu (mm)

C_b ...hloubka těla fotoaparátu po rovinu CCD

snímače (mm) s ...vzdálenost ohniska od optické osy

(mm)



Obrázek 5.2: Schéma pro výpočet ohniska sekundárního zrcadla [37]

Výpočet velikosti zrcadla získáme z podobnosti trojúhelníku:

$$\frac{a_0}{D} = \frac{s}{F} \quad (5.2)$$

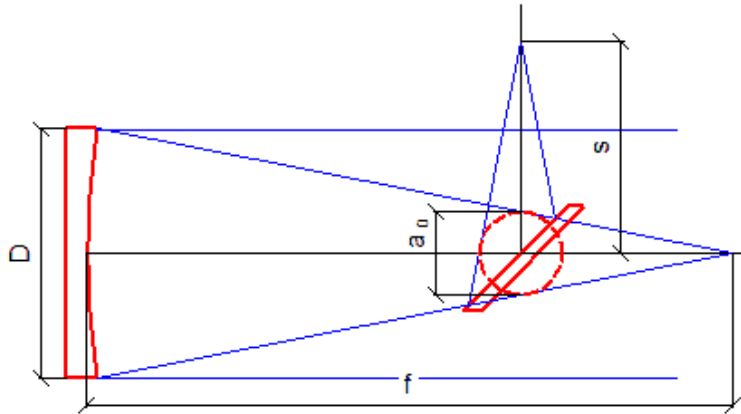
$$a_0 = \frac{s}{F} \cdot D = \frac{197}{965} \cdot 150 = 30,62 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Kde:

f ...ohnisková vzdálenost primárního zrcadla (mm)

a_0 ...minimální rozměr malé osy sekundárního zrcadla (mm)

Takto velké sekundární zrcadlo bude však zobrazovat obraz, jehož světelnost bude prudce klesat k okraji. Ve skutečnosti potřebujeme 100 % osvětlení zorného pole určité

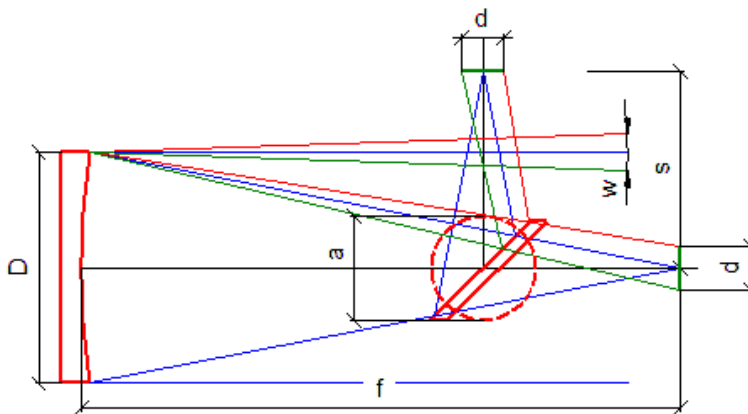


Obrázek 5.3: Schéma dalekohledu se světelnými kužely [37]

(nenulové) velikosti. Potřebujeme sekundární zrcadlo větší jak vypočítaná minimální velikost. 100 % zorné pole získáme tak že: [37]

1. Pokud chceme dalekohled na vizuální pozorování, potřebujeme zorné pole alespoň $0,5^\circ - 1^\circ$
2. Pokud chceme pozorovat planety postačí vzhledem na úhlové rozměry planet menší zorné pole $0,25^\circ$

Tato práce se věnuje hvězdářskému dalekohledu, výpočet tedy bude pro menší zorné pole $0,25^\circ$. Schéma tedy musíme upravit s ohledem na toto zorné pole:



Obrázek 5.4: Schéma dalekohledu s vykresleným zorným polem [37]

Nejprve zjistíme velikost zorného pole, abychom mohli vypočítat malou osu sekundárního zrcadla:

$$\frac{(\frac{1}{2} \cdot d)}{f} = \sin\left(\frac{w}{2}\right) \quad (5.4)$$

$$d = 2 \cdot f \cdot \sin\left(\frac{w}{2}\right) = 2 \cdot 965 \cdot \sin\left(\frac{0,25}{2}\right) = 4,21 \text{ mm} \quad (5.5)$$

Kde:

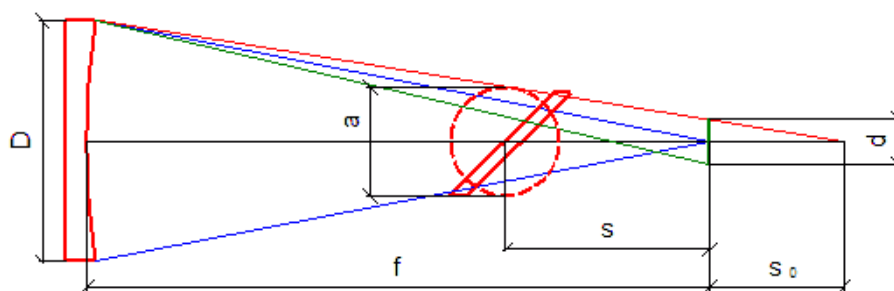
a ...rozměr malé osy sekundárního zrcadla (mm)

w ...úhlová velikost zorného pole ($^{\circ}$)

d ...velikost 100 % osvětlení zorného pole (mm)

Pokud budeme brát v úvahu fotografování, pak velikost zorného pole určíme z rozměrů obrazového snímáče. V případě CCD snímáčů je možné nerovnoměrné osvětlení zorného pole vykompenzovat digitálním zpracováním. [37]

Vztah pro výpočet malé osy sekundárního zrcadla se dá získat z následujícího schématu:



Obrázek 5.5: Schéma dalekohledu pro malou osu sekundárního zrcadla [37]

Z podrobnosti trojúhelníků vyplývá:

$$\frac{s_0}{(f + s_0)} = \frac{d}{D} \quad (5.6)$$

a také:

$$\frac{s_0}{d} = \frac{(s_0 + s)}{a \cdot s_0} \cdot a = (s_0 + s) \cdot d \quad (5.7)$$

Obě tyto rovnice upravíme na:

$$s_0 = \frac{(d \cdot f)}{D - d} \quad (5.8)$$

$$s_0 = \frac{(s \cdot d)}{a - d} \quad (5.9)$$

Po spojení obou vztahů:

$$\frac{(d \cdot f)}{D - d} = \frac{(s \cdot d)}{a - d} \quad (5.10)$$

dostáváme vztah pro výpočet velikosti malé osy sekundárního zrcadla:

$$a = \frac{(s \cdot (D - d))}{f} + d = \frac{(197 \cdot (150 - 4,21))}{965} + 4,21 = 33,97 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Kde:

s_0 ...vzdálenost průsečíku okraje kužele a optické osy ohniska (mm)



Obrázek 5.6: Návrh optické soustavy v dalekohledu Newton

Kapitola 6

Návrh konstrukčního řešení dalekohledu Dobson

Výběr správného typu montáže ovlivňuje mnoho. Ovlivňuje výběr typu dalekohledu (zrcadlový, čočkový nebo kombinovaný), způsob upnutí (objímky, různé úchyty, drážky z rybinou), rychlost sestavení, možnost navádění, sledování nebeských těles, jejich pozorování a fotografování.

Montáž navrhujeme pro typ dalekohledu Newton (kap. 5). Pro konstrukční řešení proto byla vybrána modifikace montáží na trhu a byla zvolena montáž typu Dobson (z hlediska poměru cena/výkon).

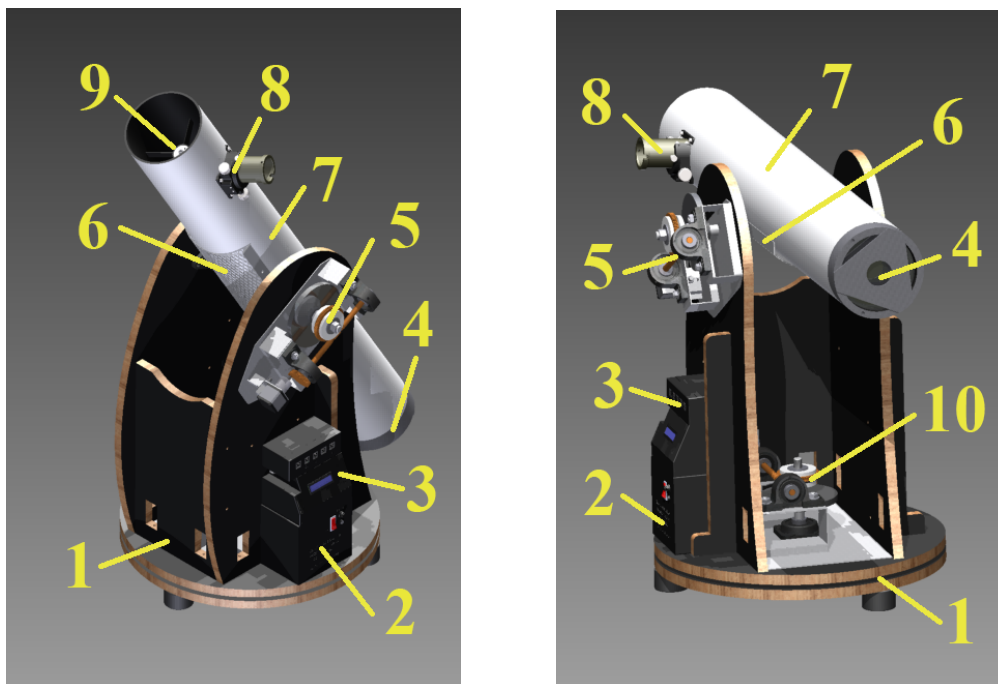
6.1 Hlavní části konstrukce

Montáž Dobson je jedna z druhů azimutální montáže. Celá konstrukce musí plnit svou funkci a lze ji rozdělit na jednotlivé součásti dle následujícího schématu:

1. Základna – nese celou montáž dalekohledu a obsahuje kuličkové ložisko pro pohon azimutální osy.
2. Napájení montáže – dostatečně dimenzovaný zdroj pro napájení všech prvků montáže.
3. Řídicí jednotka – přijímá signál od senzoru polohy, ale také umožňuje nastavovat dalekohled do požadované polohy a udržovat požadovaný objekt v zorném poli.
4. Primární zrcadlo – velké parabolické zrcadlo, jehož plocha určuje světelnost dalekohledu.

28 KAPITOLA 6. NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ DALEKOHLEDU DOBSON






5. Pohon elevace – obsahuje ozubené soukolí pro nastavení úhlu elevace pozorovaného objektu.
6. Uchycení tubusu dalekohledu – umožňuje uchycení dalekohledu do průměru 170 mm.
7. Tubus dalekohledu – jsou v něm umístěná zrcadla pro odrazení světla, délka tubusu odpovídá potřebné ohniskové vzdálenosti objektivu.
8. Okulárový výtah s pohonem – lze s ním elektronicky posouvat okulár, a tím zaostřovat obraz v ohnisku objektivu.
9. Sekundární zrcadlo – malé rovinné eliptické zrcátko, slouží pro odraz obrazu předmětu do okuláru.
10. Azimutální pohon – obsahuje ozubené soukolí pro nastavení úhlu azimutu pozorovaného objektu.

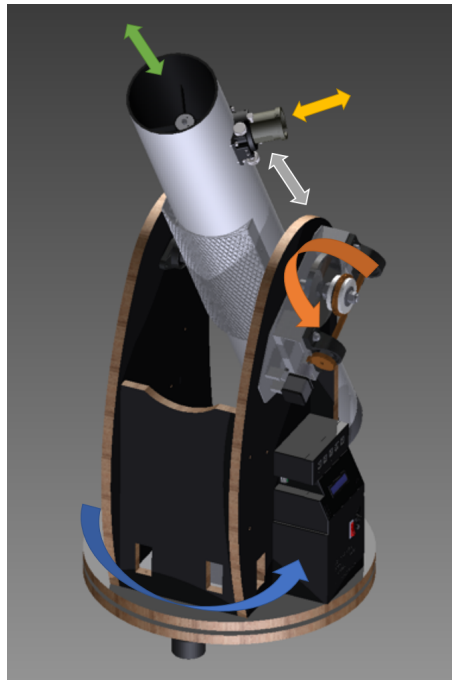


Obrázek 6.1: Popis návrhu dalekohledu Dobson

6.2 Přehled pohybů montáže

Montáž typu Dobson musí zajišťovat pohyb hlavně ve dvou osách. Ve správném nastavení dalekohledu v azimutu (poloha vůči horizontu) a pro nastavení elevace (poloha výšky nad horizontem). Krom těchto hlavních os je dále zapotřebí umožnit pohyb pro sestavení, uchycení tubusu a v neposlední řadě pohyb pro nastavení zaostření okuláru.

-  rotační pohyb, nastavení elevace,
-  rotační pohyb, nastavení azimutu,
-  translační pohyb, nastavení pozice výtahové šachty na správnou polohu ohniska objektivu,
-  translační pohyb, nastavení výšky okulárového výtahu pro zaostření obrazu v ohnisku objektivu,
-  translační pohyb, nastavení polohy upnutí tubusu.



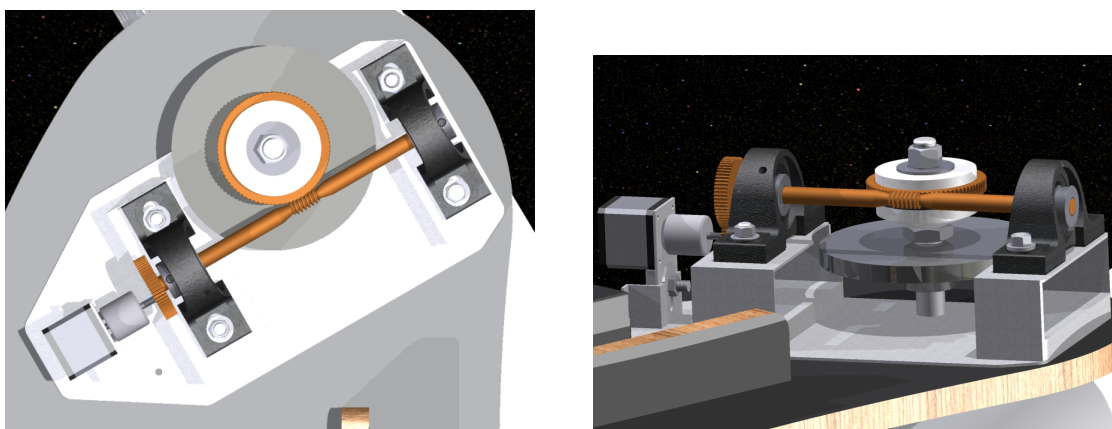
Obrázek 6.2: Popis pohybů dalekohledu Dobson

Kapitola 7

Návrh jednotlivých prvků montáže

Musíme brát v úvahu, že návrh této konstrukce je pro montáž Dobson, a jedná se tedy o druh azimutální montáže. Problém nastává při navádění na pozorovaný objekt, kdy nám ujíždí objekt ze zorného pole dalekohledu. Musíme tedy zajistit současný pohyb rotačních os montáže a navíc se musí hýbat různou rychlostí. Dále je potřeba zajistit jemnost pohybu těchto os a zjišťovat informace o aktuální poloze obou os. Návrh montáže tedy není řešen pouze na manuální pohon, ale hlavně na pohon elektrický, který je řízen přes navigační program z osobního počítače.

7.1 Převodové soustrojí pro osu elevace



Obrázek 7.1: Převodové soustrojí elevační osy

Název veličiny	značka	šnek	šnekové kolo
převodový poměr	i	80	80
počet chodů/zubů	z	1	80
modul	m	1 mm	1 mm
osový úhel profilu	α	20°	20°
rozteč ozubení	p	3,1416 mm	3,1416 mm
úhel sklonu	γ	3,5763°	3,5763°
průměr roztečné kružnice	d	16 mm	80 mm
průměr patní kružnice	d_f	13,6 mm	77,6 mm
průměr hlavové kružnice	d_a	18 mm	82 mm
valivý průměr kružnice	d_w	16 mm	80 mm
průměr základní kružnice	d_b	15,0351 mm	75,1754 mm
tloušťka zubů a šířka mezer	s_x	1,571 mm	1,571 mm
délka šneku/šířka věnce kola	b	20 mm	9 mm
stoupání šroubovice	p_z	3,1416 mm	–
největší průměr kola	d_{ae}	–	83,5 mm

Tabulka 7.1: Hlavní geometrické hodnoty šnekového soukolí pro osu elevace

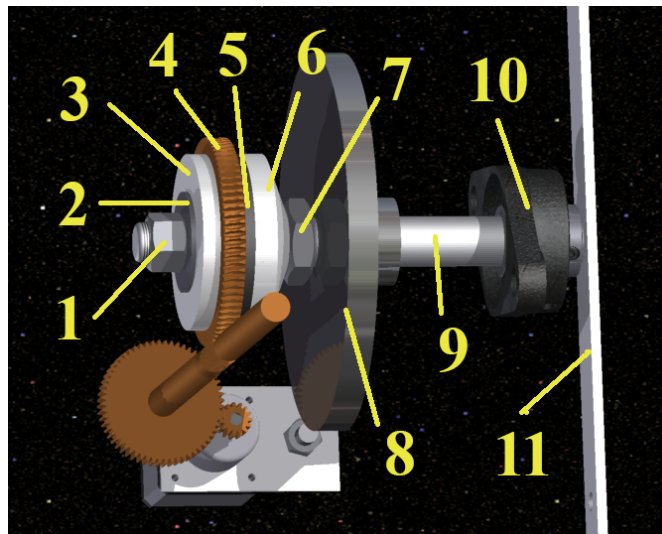
Pro jemný pohyb osy elevace je navrženo šnekové soukolí s převodovým poměrem 80:1, které je poháněno krokovým motorem spojený přes čelní ozubená kola typu N s převodovým poměrem 4:1. Celkový převodový poměr vychází 320:1. Pro šnekové soukolí se použilo nejčastější řešení šnekového mechanismu, a to soukolí s válcovým šnekem a ozubeným kolem vyrobený z bronzu. Výhodou jsou malé rozměry a nízká hmotnost.

V tabulce 7.1 jsou vypočítané hlavní geometrické hodnoty šnekového soukolí pro osu elevace. Celý výpočet šnekového soukolí je uveden v příloze A. Pro kontrolu výpočtů jsme výsledné hodnoty nechali přepočítat pomocí programu Autodesk Inventor Professional.

7.1.1 Návrh hřídele a ložisek osy elevace

Při návrhu hřídele jsme brali v úvahu požadavek na dobrou tuhost celé konstrukce.

1. vrchní matka – slouží pro sevření/povolení šnekového kola ke svěracím kotoučům, pokud je matka utažená využíváme elektrický pohon, pokud je matka povolená využíváme pohon manuální



Obrázek 7.2: Návrh a popis elevační osy

2. bezpečnostní podložka – slouží pouze k ochraně svěracího kotouče před poškozením vrchní matkou
3. svěrací kotouč – funguje společně s kónickým svěracím kotoučem jako svěrka šnekového kola
4. šnekové kolo – převodovka pro elektrický pohon
5. těsnící kroužek – kroužek z linolea pro zajištění sevření šnekového kola a jeho menšímu opotřebení
6. kónický svěrací kotouč – funguje společně se svěracím kotoučem jako svěrka šnekového kola
7. zajišťující kontra matka – slouží k zamezení pohybu kónického svěracího kotouče
8. plastový kotouč – obsahuje v sobě magnetický segmentový pásek a společně se senzorem AS5311 slouží ke aktuální snímání polohy dalekohledu
9. hřídel – kovová hřídel o průměru 20 mm, zvoleno s ohledem na tuhost celé soustavy
10. kuličkové ložisko – osa elevace je opatřena dvěma jednořadými kuličkovými ložisky typu UCFL204 s ložiskovým domkem, druhé z ložisek je umístěné na boku druhého držáku tubusu.
11. bok držáku tubusu – slouží pro připevnění držáku tubusu

Název veličiny	značka	ozubené kolo 1	ozubené kolo 2
převodový poměr	i	4	4
počet zubů	z	15	60
modul	m	0,8 mm	0,8 mm
rozteč ozubení	p	2,51 mm	2,51 mm
vzdálenost os převodu	a_w	30 mm	30 mm
osový úhel profilu	α	20°	20°
průměr roztečné kružnice	d	12 mm	48 mm
průměr základní kružnice	d_b	4,8 mm	19,59 mm
průměr patní kružnice	d_f	10 mm	46 mm
průměr hlavové kružnice	d_a	13,6 mm	49,6 mm
valivý průměr kružnice	d_w	12 mm	48 mm
tloušťka zubů a šířka mezer	s	1,256 mm	1,256 mm
šířka zubu	b	9,6 mm	9,6 mm

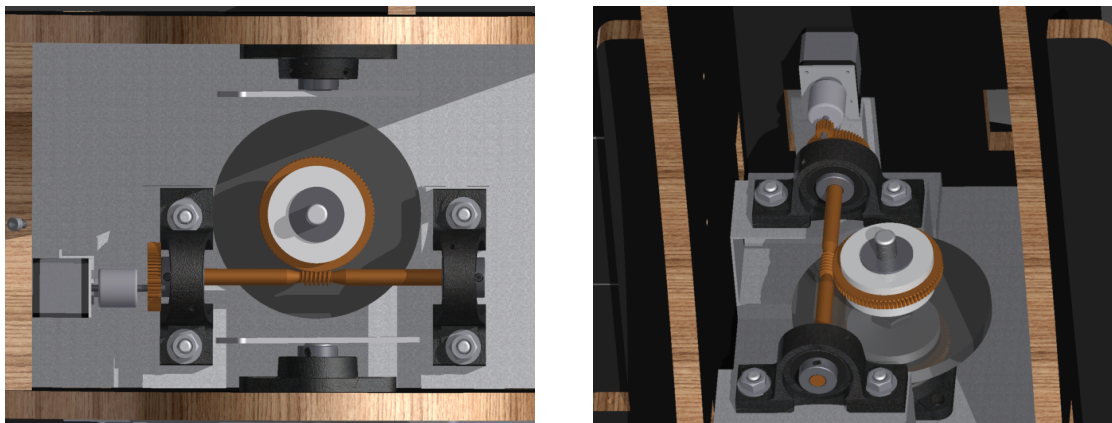
Tabulka 7.2: Hlavní geometrické hodnoty čelního ozubeného soukolí pro osu elevace

7.2 Parametry čelního ozubeného soukolí

V tabulce 7.2 jsou vypočítané hlavní geometrické hodnoty čelního ozubeného soukolí pro osu elevace. Celý výpočet šnekového soukolí je uveden v příloze A. Pro kontrolu výpočtů jsme výsledné hodnoty nechali přepočítat pomocí programu Autodesk Inventor Professional.

7.3 Převodové soustrojí pro azimutální osu

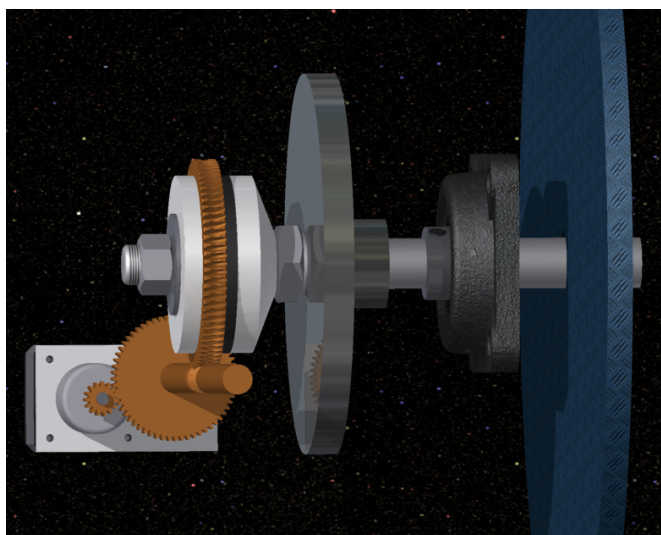
Jemný pohyb osy azimutu je navrženo stejně jako pro osu elevace. Šnekové soukolí s převodovým poměrem 80:1, které je poháněno krokovým motorem spojený přes čelní ozubená kola typu N s převodovým poměrem 4:1. Celkový převodový poměr vychází 320:1. Pro šnekové soukolí se použilo nejčastější řešení šnekového mechanismu a to soukolí s válcovým šnekem a ozubeným kolem vyrobený z bronzu. Výhodou jsou malé rozměry a nízká hmotnost.



Obrázek 7.3: Převodové soustrojí azimutální osy

7.3.1 Návrh hřídele a ložisek osy azimutu

Při návrhu hřídele jsme opět brali v úvahu požadavek na dobrou tuhost celé konstrukce jako u osy elevace. Proto průměr hřídele je pro zvýšení tuhosti volen vyšší a to 25 mm. Osa azimutu je opatřena kuličkovým ložiskem typu UCF204 s ložiskovým domkem a kuličkovým rotačním diskem o průměru 330 mm.



Obrázek 7.4: Návrh osy azimutu

Kapitola 8

Volba pohonu

Pro jemnost pohybu polární osy se hodí motor synchronní. Synchronní motor má ale malý rozsah regulace otáček, a proto vhodnější varianta je použít krokový motor.

Volba jeho vlastností byla vypočítána dle požadavků otáček obou hřídelí (viz kap. 7). Doba potřebná k namíření dalekohledu na pozorovaný objekt je na rozdíl od synchronního motoru větší. Hlavní výhoda krokového motoru je přesné nastavení polohy pozorovaného objektu. Tuto polohu krokový motor drží i přes působení okolních sil. Krokové motory nepotřebují ke své činnosti žádnou zpětnou vazbu, protože z počtu jejich kroků lze zjistit aktuální polohu objektu. Velká nevýhoda je jejich stálý odběr proudu i když se motor netočí, proto je potřeba mít k dispozici stálý přísun energie stabilního zdroje napětí.

8.1 Výpočet potřebných otáček motoru

Pro pozorování nebeského objektu se musí dalekohled pohybovat určitou rychlostí. Uvažujme jeden hvězdný (siderický) den a na základě jeho délky můžeme zjistit rychlost „otáčení oblohy“.

$$n_o = \frac{1 \text{ otočení oblohy}}{1 \text{ siderický den}} = \frac{1296000''}{86164,09 \text{ s}} = 15,04''s^{-1} \quad (8.1)$$

Kde:

1 siderický den = 23 hod 56 min a 4,09 s = 86164,09 s

1 otočení oblohy = $360^\circ = 129600''$

$$i_p = i_{s,k} \cdot i_{k1,k2} = 80 \cdot 4 = 320 \quad (8.2)$$

$$\beta_{min} = \frac{360}{i_p} = \frac{360}{320} = 1,125^\circ = 4050'' \quad (8.3)$$

Kde:

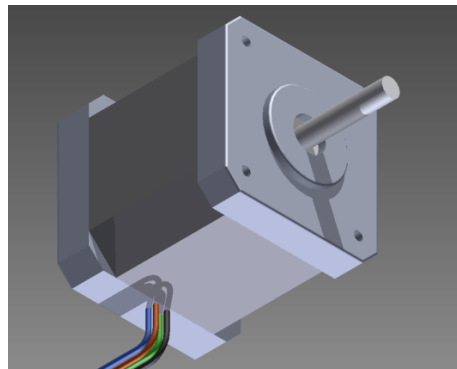
$i_{s,k}$...je převodový poměr šnekového soukolí (-)

$i_{k1,k2}$...je převodový poměr čelního soukolí (-)

i_p ...je celkový převodový poměr převodu (-)

β_{min} ...je dosažený nejmenší úhel osy (")

Z výpočtu je patrné, že pro samotný pohyb montáže nám nestačí pouze převod navrženého soukolí. Potřebujeme tedy krokový motor, který jednu svou otáčku umožňuje dělit určitým počtem kroků. Pro pohon os byl zvolen typ SX17-1005LQCEF od firmy Microcon s minimálním napájecím napětím 12 V. S využitím moderní technologie se tyto motory vyznačují vysokými momenty při zachování malých rozměrů. Standardní délka kroku je $1,8^\circ$. Možnost dělení kroku způsobem ovládání pomocí řídicí elektroniky.



Obrázek 8.1: Krokový motor SX17-1005LQCEF od firmy Microcon

Počet kroků na jednu otáčku motoru je:

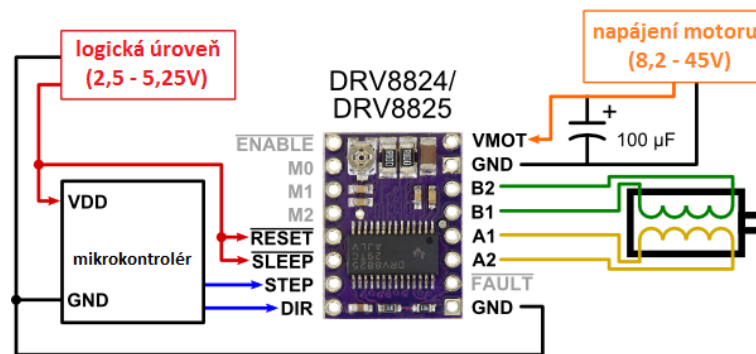
$$m_{kr} = \frac{360}{m_{kr1}} = \frac{360}{1,8} = 200 \quad (8.4)$$

Kde:

m_{kr} ...je počet kroků motoru na 1 otáčku (-)

m_{kr1} ...je 1 krok motoru ($^\circ$), tj. $1,8^\circ$

Společně s těmito krokovými motory je v nabídce od firmy Microcon modul pro řízení krokových motorů označený jako typ DRV8825. Napájecí napětí tohoto modulu je 8,2 V - 36 V. Umožňuje ovládat krokové motory a lze s nimi nastavit omezení proudu, tepelnou a proudovou ochranu. Krokový motor díky němu může pracovat v 6 režimech: plný krok (full-step), poloviční krok (half-step), čtvrtina kroku (1/4-step), osmina kroku (1/8-step), šestnáctina kroku (1/16-step) a dvaatřicetina kroku (1/32-step).



Obrázek 8.2: Schéma zapojení modulu DRV8825

Pokud budeme uvažovat poslední režim, bude nejmenší úhel celé montáže vycházet:

$$i_m = m_{kr} \cdot m_d = 200 \cdot 16 = 6400 \quad (8.5)$$

$$\beta_{min2} = \frac{\beta_{min}}{i_m} = \frac{4050}{6400} = 0,6328125'' \quad (8.6)$$

Kde:

m_d ...je dělicí poměr motoru (-)

i_m ...je převodový poměr motoru (-)

β_{min2} ...je nejmenší dosažený úhel s převodovým poměrem krokového motoru (")

Z výpočtu je patrné, že námi zvolený motor společně s modulem pro řízení motoru nám poskytne dostatečný převodový poměr pro sledování nebeského tělesa na hvězdné obloze.

8.2 Napájení montáže

Krokové motory, pohánějící celou montáž, potřebují dostatečný přísun elektrické energie. Dalekohled bude umístěn i v oblastech, kde jej není možné připojit k elektrické síti 230 V. Proto jsem zvolil spínaný zdroj, který umožní přístroj napájet jak ze sítě 230 V, tak z oloveného akumulátoru 12 V (autobaterie).

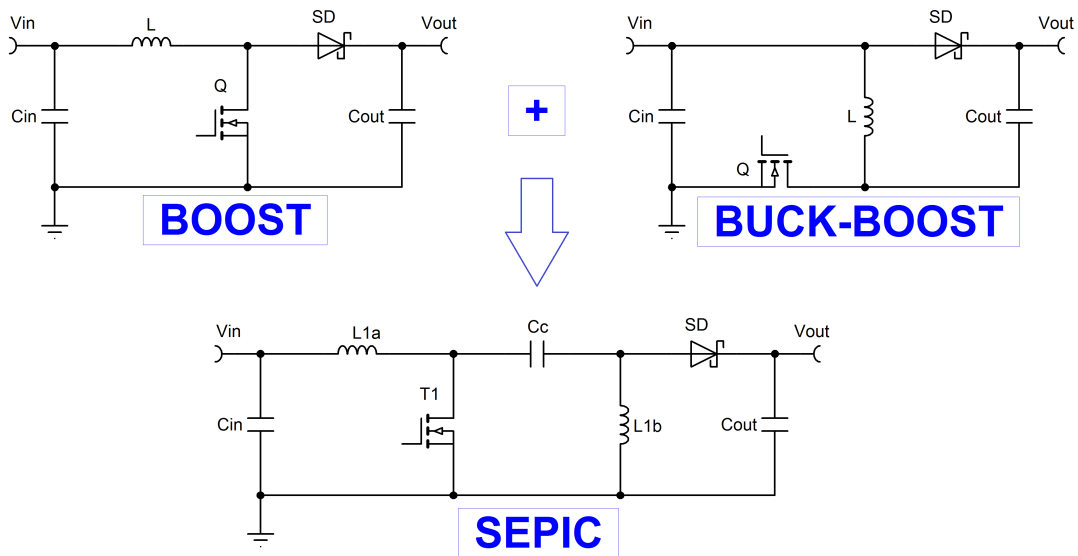
8.2.1 Návrh spínaného zdroje pro napájení montáže

Před návrhem spínaného zdroje je nutné ujasnit si požadavky:

1. Velikost napájecího napětí je $U_{IN} = 11,5 V$ a $12,5 V$ (autobaterie a AC/DC měnič)
2. Velikost výstupních napětí je $U_{OUT} = 3,3 V$, $5 V$ a $12 V$ (vychází z požadavků na elektrické komponenty)
3. Pracovní kmitočet $f = 500 kHz$
4. Střída $D_{max} = ?$ a $D_{min} = ?$
5. Maximální výstupní proud $I_{OUT} = 4 A$
6. Maximální špičkový proud $I_{L1a(peak)}$

Pro tyto účely byl vybrán zdroj topologie SEPIC, který se právě hodí na napájení této montáže. Spínaný zdroj SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter), v některé literatuře se také nazývá jako buck-boost regulátor napětí. Jedná se o kombinaci Step-down a Step-up spínaného regulovaného zdroje zapojeného podle obrázku 8.3. Pracuje buď v režimu snižujícím nebo zvyšujícím. Více o zdroji SEPIC pojednává moje bakalářská práce [39], a proto se principem jeho funkce nebudeme v této práci dále zabývat.

Tento spínaný zdroj má z principu nepatrně menší účinnost, než pouze zvyšující zdroj, neboť tento zdroj napětí nejprve zvýší a pak jej sníží na požadovanou úroveň. Zdroj nemá galvanické oddělení výstupu od vstupu, proto se nehodí pro úpravu síťového napětí, a tedy na vstupu potřebuje konvertor 230V/12V.



Obrázek 8.3: SEPIC je kombinací zdrojů Step-down a Step-up

Výhody zdroje SEPIC

- Vstupní napětí může být menší nebo větší, než je výstupní napětí
- Vazební kondenzátor zamezuje průchodu stejnosměrného proudu ze vstupu zdroje na jeho výstup.
- Na rozdíl od snižujícího jednočinného zdroje má usměrňovací dioda zároveň funkci i blokovací
- Na rozdíl od kombinace snižujícího a zvyšujícího zdroje využívá pouze jeden spínač

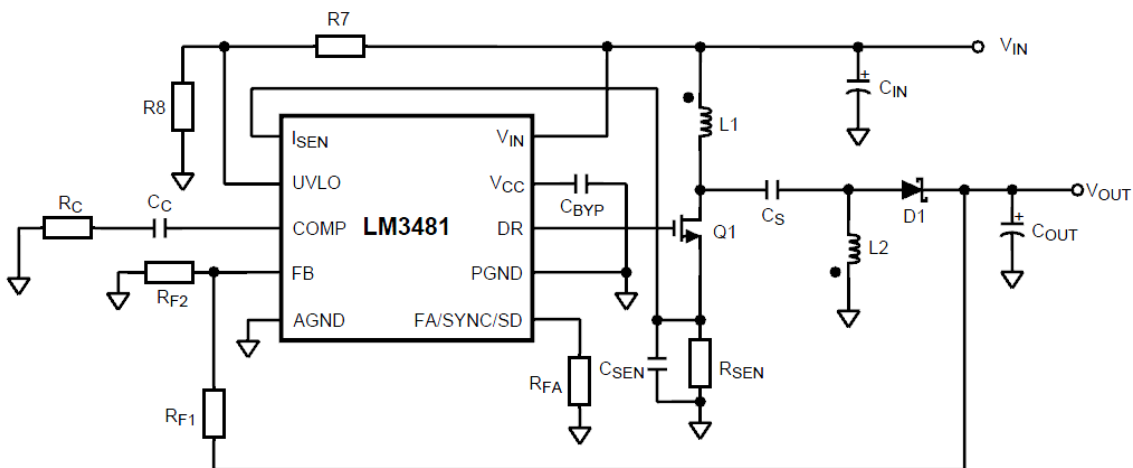
Nevýhody zdroje SEPIC

- Spínač/dioda musí vydržet větší napětí a proud, na rozdíl od ostatních topologií.
- Jsou potřebné dvě komponenty. Cívku se dvěma vinutími a vazební kondenzátor.

1. Volba pracovní frekvence a integrovaného obvodu

Pracovní frekvence spínaných zdrojů se pohybuje od 20 kHz výše. Pro náš účel tedy byla vybrána frekvence 500 kHz . Tato frekvence je dost vysoká na to, aby byl splněn požadavek pro výběr vhodného jádra cívky, ale zároveň je dost nízká na to, aby se při této frekvenci příliš nezahřívaly výkonové spínače. Navíc na této frekvenci pracuje dost integrovaných obvodů, určených pro spínané zdroje, které generují PWM signál pro spínání výkonového spínače. Použití takového integrovaného obvodu ulehčí především práci s výsledným algoritmem při programování.

Integrovaný obvod pro danou problematiku byl vybrán LM3481 od firmy Texas Instruments, který se velmi často používá nejen u topologie SEPIC, ale i v ostatních typech spínaných zdrojů s cívkami. Schéma tohoto typického zapojení je na obrázku 8.4.



Obrázek 8.4: Typické zapojení obvodu LM3481 s topologií SEPIC [59]

Obvod umožňuje široký rozsah napájecího napětí od $2,97\text{ V}$ do 48 V . Požadovanou frekvenci lze nastavit na libovolnou hodnotu od 100 kHz až 1 MHz pouhou změnou odporu RFA. LM3481 má vestavěnou ochrannou funkci, kdy při překročení maximální teploty, zkratu či přepětí dojde k jeho následnému vypnutí.

2. Cívka

Za předpokladu, že bude účinnost 100 % a spínání je realizované pomocí PWM, bude pro střidu platit vztah:

$$D = \frac{U_{OUT} + U_D}{U_{IN} + U_{OUT} + U_D} \quad (8.7)$$

kde U_D je propustné napětí na Schottkyho diodě. Tato rovnice může být dále přepsána jako:

$$\frac{D}{1-D} = \frac{U_{OUT} + U_D}{U_{IN}} = \frac{I_{IN}}{I_{OUT}} \quad (8.8)$$

Pro zjištění hodnoty D_{max} dosadíme do rovnice $U_{IN(min)}$ a pro zjištění hodnoty D_{min} naopak dosadíme do rovnice $U_{IN(max)}$.

Po dosazení obdržíme hodnoty $D_{min} = 0,505$ a $D_{max} = 0,526$

Zvlnění proudu cívkou (z pravidla se uvažuje 20 % až 40 % vstupního proudu):

$$\Delta I_L = 30 \% \times \frac{I_{IN}}{\eta} = 30 \% \times I'_{IN} \quad (8.9)$$

V této rovnici I_{IN} se dělí nejhorší možnou odhadovanou hodnotou účinností η . Topologie SEPIC má většinou účinnost kolem 80 %. Tím dostáváme hodnotu $\Delta I_L = 1,663 \text{ A}$.

V topologii SEPIC se nacházejí dvě cívky (pokud napětí jsou stejně velká, je i zvlnění proudu obou dvou cívek stejné) :

$$L1a_{min} = L1b_{min} = \frac{1}{2} \times \frac{U_{IN(min)} \times D_{max}}{\Delta I_L \times f_{SW}} \quad (8.10)$$

Po dosazení vychází hodnota $L1a_{min} = L1b_{min} = 3,3 \mu\text{H}$

Špičkový proud $I_{L1a(peak)}$, který by tlumivka měla přenést, aniž by došlo k saturování jádra:

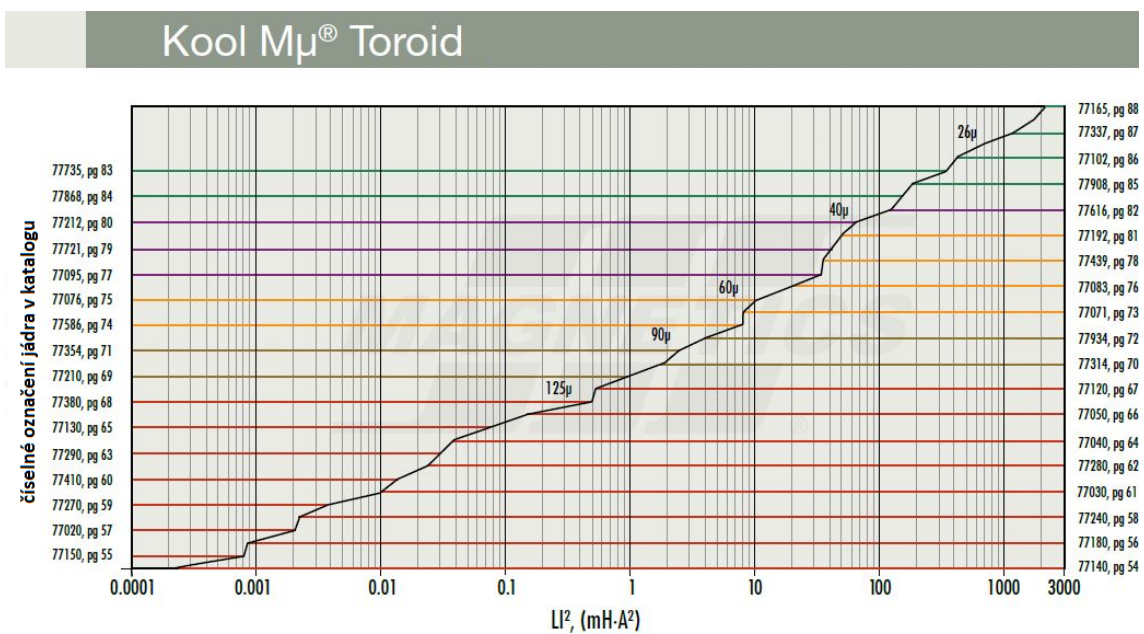
$$I_{L1a(peak)} = I'_{IN} + \frac{\Delta I_L}{2} = I'_{IN} \left(1 + \frac{30 \%}{2}\right) \quad (8.11)$$

$$I_{L1b(peak)} = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (8.12)$$

3. Výběr vhodného jádra a návrh tlumivky

Pro dosažení vysoké účinnosti a malého rozměru spínaného zdroje bylo zvoleno feromagnetické jádro KOOL M μ od společnosti Magnetics. Jádra z tohoto materiálu jsou charakteristická nasycenou indukcí asi 0,9 T, tedy o něco menší, než mají běžná jádra železoprachová. Ve srovnání s nimi však vykazují značně menší ztráty při vysokofrekvenčních aplikacích.

Popis těchto jader zahrnuje graf na obrázku 8.5 dostupný na stránkách Magnetics [60], který zjednodušuje výběr těchto jader.



Obrázek 8.5: Stejnosečná magnetizační charakteristika [60]

Postup pro návrh tlumivky je následující:

- 1) Spočítat hodnotu LI^2 kde:

L je žádaná indukčnost při ss složce z rovnice 8.10 (v mH)

I je špičkový proud z rovnice 8.11 (v A)

Tato hodnota pro vybrané jádro vychází $LI^2 = 0,477$.

- 2) Na vodorovné ose nomogramu 8.5 z katalogu výrobce Lit [60] najdeme číslo LI^2 . Následně vyneseme svislou přímkou, nalezneme průsečík s grafem a najít první velikost jádra, ležící za tímto průsečíkem. To je nejmenší použitelná velikost. V nomogramu jsou menší velikosti jader dole, větší nahoře. Následně vynést svislou přímkou, najít průsečík s grafem a najít první velikost jádra, ležící za tímto průsečíkem. Vybereme tedy jádro 77120-A7.

3) Výpočet počtu závitů je možný následujícího postupu:

a) Ze jmenovité indukčnosti L a katalogové hodnoty A_L příslušného jádra určit počet závitů (A_L je v jednotkách $\frac{mH}{z^2}$)

Indukčnost pro daný počet závitů platí následující vztah:

$$L_n = \frac{A_L N^2}{10^6} \quad (8.13)$$

Katalogový list [60] k jádru udává $A_L = 168 \frac{mH}{1000 z^2} \pm 8 \%$. Jednoduchou úpravou rovnice 8.13 získáme $N = 15$ závitů.

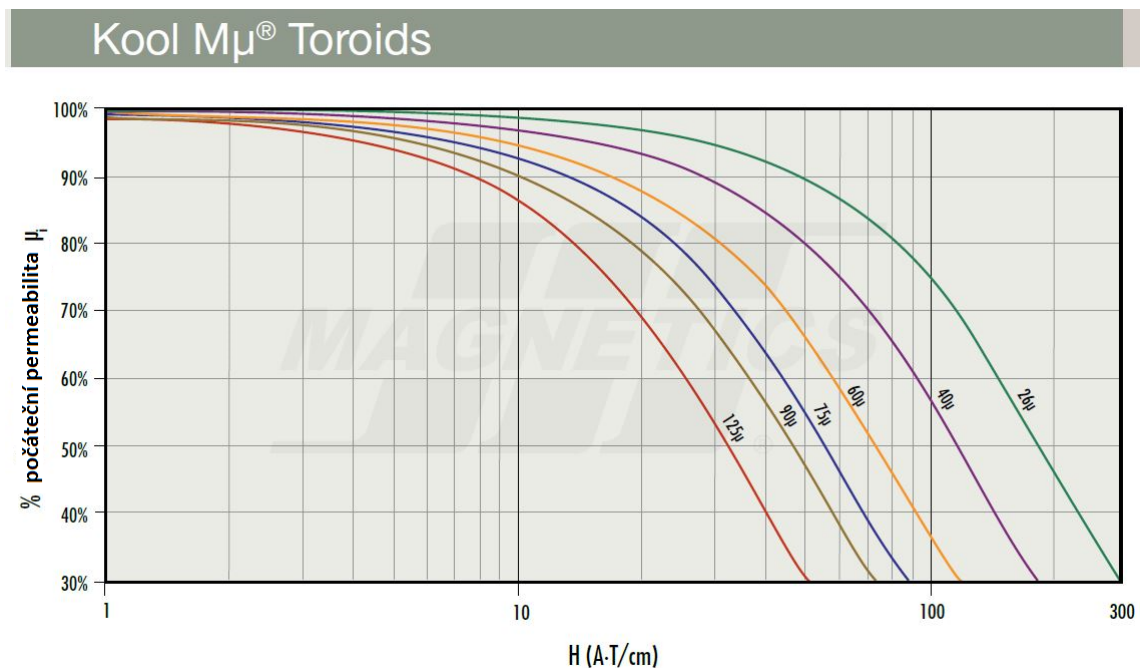
b) Vypočítat ss intenzitu magnetického pole H . Pro použití amerických grafů se počítá v oerstedech:

$$H = 0,4\pi \frac{NI}{le} \quad (8.14)$$

kde le je efektivní (střední) délka siločáry jádra (v centimetrech) z katalogu výrobce

Magnetizační ss složka pro 15 závitů je $H = 25,114 \frac{A \cdot T}{cm}$.

c) Z grafu 8.6 závislosti poklesu permeability na intenzitě magnetického pole z katalogu [60] lze určit pokles počáteční permeability μ_{pu} pro spočítanou magnetizaci z rovnice 8.14



Obrázek 8.6: Graf závislosti poklesu permeability na intenzitě magnetického pole [60]

Pro magnetizační ss složku $H = 25,114 \frac{A \cdot T}{cm}$ udává graf 8.6 pokles na 65 % počáteční permeability.

d) Příslušně je potřeba zvětšit počet tak, že se vydělí původní počet závitů (získaný z rovnice 8.13) číslem blízkým poklesu počáteční permeability z grafu 8.6. Tak by se měla zvýšit indukčnost na hodnotu blízkou, žádané indukčnosti. Počet závitů se zvýší na $N = 20$ závitů pro dosažení požadované indukčnosti.

5) Vybrat správný vodič podle žádaného proudu.

Frekvence $f = 500 \text{ kHz}$, kde se již projevuje skin efekt. Je nutno vypočítat hloubku vniku pro kterou platí:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (8.15)$$

Vychází tedy $\delta = 0,092$ a tedy vodič by neměl přesáhnout průměr $d < 2\delta$, což je $2\delta = 0,184 \text{ mm}$.

4. Vazební kondenzátor

Výběr vazebního kondenzátoru C_c , závisí na střední hodnotě proudu.

$$I_{C_c(RMS)} = I'_{IN} \times \sqrt{\frac{1 - D_{max}}{D_{max}}} \quad (8.16)$$

Kondenzátor se vybírá s nízkou hodnotou ESR (efektivního sériového odporu). Energie uložena v kondenzátoru za dobu periody musí být minimálně rovna energii za stejnou dobu do cívky. Rovnováha těchto energií lze použít k vypočítání hodnoty tohoto kondenzátoru:

$$\frac{1}{2} C_c U_c^2 = \frac{1}{2} L_{1a} I_{OUT}^2 \quad (8.17)$$

Po vyřešení této rovnice rovnováhy dostáváme rovnici pro výpočet minimální hodnoty vazebního kondenzátoru:

$$C_c = L_{1a} \frac{I_{OUT}^2}{U_c^2} = L_{1a} \frac{I_{OUT}^2}{(U_{in} - U_Q)^2} \quad (8.18)$$

Zvolená hodnota kapacity je $30 \mu F$, kterou tvoří 3 kondenzátory LOW ESR o hodnotě $10 \mu F$. Ty jsou zapojeny paralelně z důvodu snížení hodnoty ESR.

5. Usměrňovací dioda

Úbytek napětí na diodě D1 a její vypínací doba jsou velmi důležité pro návrh spínaného zdroje. Spínací a vypínací doby diody musí být velmi krátké, aby se nemohly vytvářet překmity vysokého napětí, které by mohly způsobit poškození součástek. Obvykle se užívají Schottkyho diody, které mají dobu zotavení $t_{rr} \leq 5 \text{ ns}$, ale nízké závěrné napětí $U_R \leq 40 \text{ V}$. Na základě požadavků na výběr diody, byla vybrána Schottkyho dvojdioda MBR2545CT. Dioda má sice úbytek 0,73 V, ale je dimenzována na propustný proud I_f až 30 A a na 150 A proudu špičkového I_{FSM} .

6. Výstupní kondenzátor

Kondenzátor musí mít dostatečnou kapacitu na to, aby pokryla špičkové hodnoty odběru proudu zátěže. Záleží tedy převážně na odebíraném proudu a rovněž jako vazební kondenzátor nesmí mít příliš velkou hodnotu ESR, aby byly splněny požadavky na zvlnění výstupního napětí ΔU_{RPL} .

$$\Delta U_{RPL} \leq \frac{I_{OUT} \times D_{max}}{C_{OUT} \times f_{SW}} + ESR \times (L1a(peak) + L1b(peak)) \quad (8.19)$$

Pokud by byl použit kondenzátor s velmi nízkou hodnotou ESR (např. keramický) pak při výpočtu kapacity v rovnici 8.18 můžeme zanedbat pravý člen.

$$C_{OUT} \geq \frac{I_{OUT} \times D_{max}}{\Delta U_{RPL} \times f_{SW}} \quad (8.20)$$

7. Spínací prvek

Výkonový tranzistor je nutné volit tak, aby mohl pracovat s maximální hodnotou napětí a proudu. Pro správnou funkci zdroje je zapotřebí dodržet parametr tranzistoru - maximální přípustné napětí, které musí být větší než součet maximální hodnoty napájecího a výstupního napětí: Lit [58].

$$U_{Q1} = U_{IN(MAX)} + U_{OUT(MAX)} \quad (8.21)$$

Tranzistor dále musí být dimenzovaný na maximální proudové špičky zdroje:

$$I_{Q1(peak)} = I_{L1a(peak)} + I_{L1b(peak)} = I'_{IN} + I_{OUT} + \Delta I_L \quad (8.22)$$

Důležitým požadavkem je malý úbytek napětí v sepnutém stavu a nízký svodový proud v nevodivém stavu. Zaměřil jsem se na tranzistory typu MOSFET, protože u nich nenastává jev „doznívání proudu“, lze je velmi rychle vypínat. Projeví se to snížením spínacích/ vypínacích výkonových ztrát. Maximální výkonové ztráty tranzistoru se určí podle vztahu:

$$P_{DQ1} = I_{Q1(RMS)}^2 \times r_{DS} \times D_{MAX} + I_{Q1(peak)} \times (U_{IN(MIN)} + U_{OUT} + U_D) \times \frac{t_{rise} + t_{fall}}{2} \times f_{SW} \quad (8.23)$$

Střední hodnota proudu tranzistorem se vypočítá:

$$I_{Q1(RMS)} = \frac{I'_{IN}}{\sqrt{D(max)}} \quad (8.24)$$

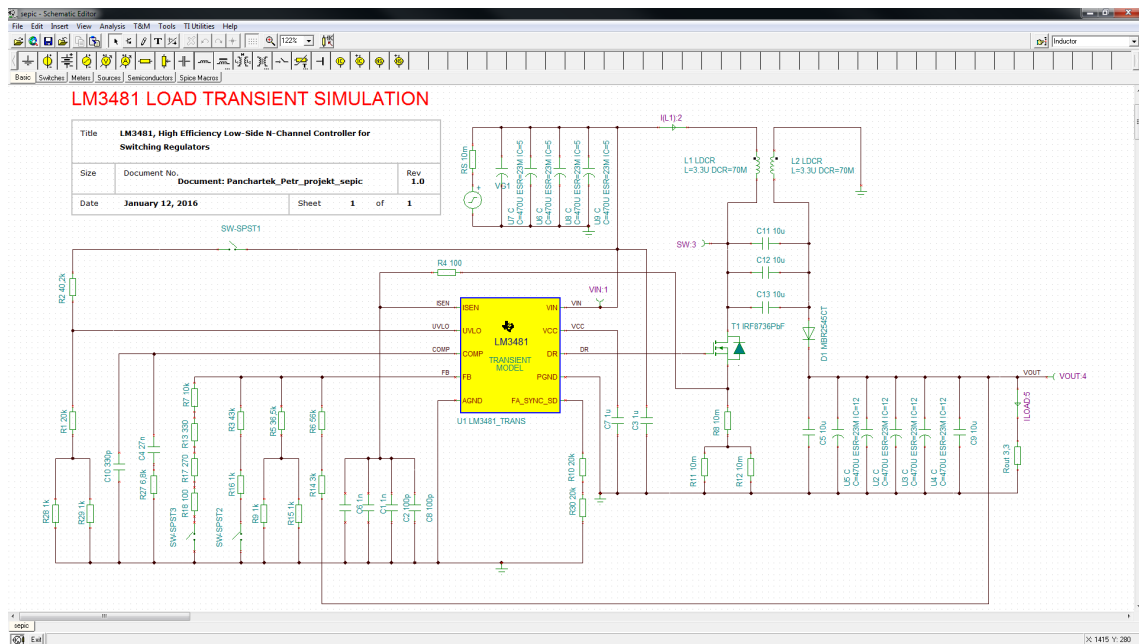
Jako spínací prvek byl vybrán tranzistor IRF8736PbF, který má velmi malý vnitřní odpor $R_{DS(ON)} = 4,8 \text{ m}\Omega$ a propustný proud $I_D = 18 \text{ A}$ při provozní teplotě 25°C .

8.2.2 Simulace spínaného zdroje SEPIC

Celý návrh spínaného zdroje jsme ověřili pomocí simulátoru TINA od společnosti Texas Instruments. Do tohoto simulátoru na rozdíl od ostatních, lze stáhnout knihovnu s obvodem LM3481 a tak vyzkoušet jeho funkci spínaného zdroje v topologii SEPIC.

Simulaci spínaného zdroje topologie SEPIC byla provedena pro měření těchto charakteristik:

1. Charakteristika ustálení výstupního napětí po zapnutí (startup) - simulace se provedla pro různé hodnoty vstupního napětí $V_{IN} = 5 \text{ V} - 20 \text{ V}$, výstupního napětí $V_{OUT} = 3,3 \text{ V} - 12 \text{ V}$ a proudovém odběru $I_{LOAD} = 1 \text{ A} - 4 \text{ A}$. Výsledné charakteristiky se nacházejí v příloze.
2. Charakteristika ustálení výstupního napětí po jeho skokové změně proudového zatížení (Load Transient) - simulace se provedla pro hodnotu vstupního napětí $V_{IN} = 12 \text{ V}$, výstupního napětí $V_{OUT} = 3,3 \text{ V} - 12 \text{ V}$ a proudového zatížení $I_{LOAD} = 1 \text{ A}$ a jeho skokové změně na $I_{LOAD} = 4 \text{ A}$. Výsledné charakteristiky se nacházejí v příloze.



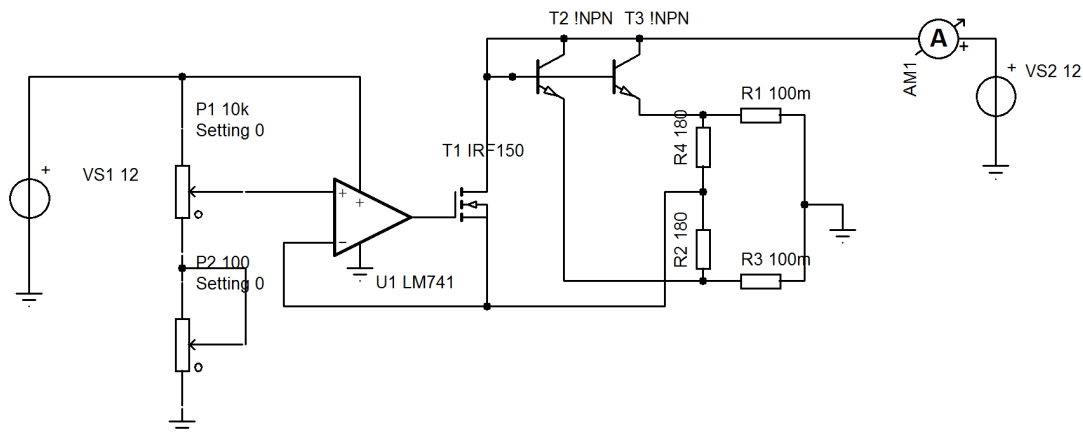
Obrázek 8.7: Simulovaný obvod v simulátoru TINA

3. Charakteristika ustálení výstupního napětí při skokové změně vstupního napětí (Input Transient) - simulace se provedla pro hodnotu vstupního napětí $V_{IN} = 12 V$ a jeho skokové změně na $V_{IN} = 12 V$, výstupního napětí $V_{OUT} = 3,3 V - 12 V$ a proudovém zatížení $I_{LOAD} = 4 A$. Výsledné charakteristiky se nacházejí v příloze.
4. Zvlnění výstupního napětí - simulace se provedla pro různé hodnoty vstupního napětí $V_{IN} = 5 V - 20 V$, výstupního napětí $V_{OUT} = 3,3 V - 12 V$ a proudovém odběru $I_{LOAD} = 1 A - 4 A$. Výsledné charakteristiky se nacházejí v příloze B.

Ze simulací vyplývá, že spínaný zdroj SEPIC má stabilní výstupní napětí $V_{OUT} = 12 V$ a je tedy vhodný pro napájení krokových motorů pro pohánění celé montáže. Navíc simulace prozradila, že spínaný zdroj SEPIC má stabilní výstupní napětí i pro hodnoty $V_{OUT} = 3,3 V$ a $V_{OUT} = 5 V$. Proto jsme se rozhodli využít těchto napětí pro napájení řídicí elektroniky. Uživatel si může navolit hodnotu pevného výstupního napětí $V_{OUT} = 3,3 V$, $V_{OUT} = 5 V$ a $V_{OUT} = 12 V$ a nebo si může tuto hodnotu nastavit pomocí trimru pro rozsah výstupního napětí $V_{OUT} = 3,3 V - 12 V$.

8.2.3 Oživení a měření na spínaném zdroji SEPIC

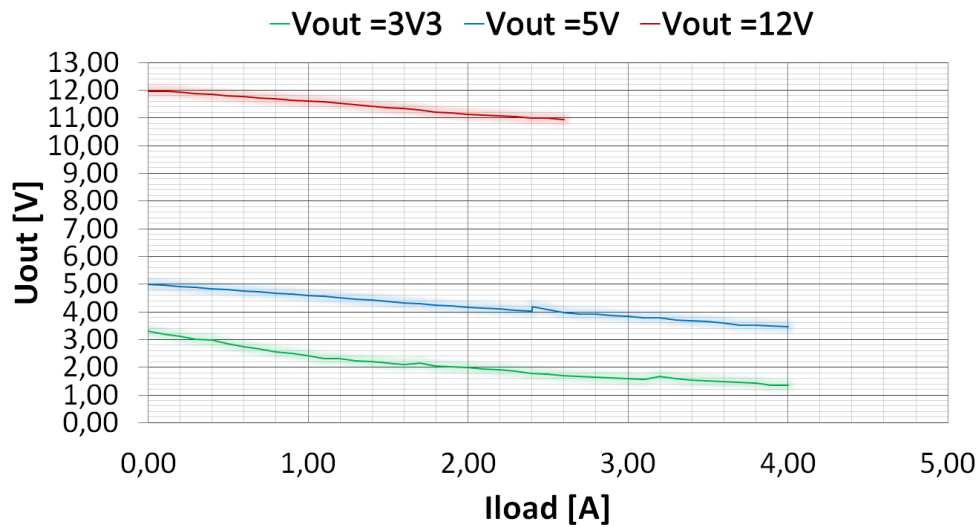
Pro měření spínaných zdrojů je potřeba vhodná elektronická zátěž. K dispozici nebyla žádná vhodná zátěž, která by zvládla minimální hodnotu vstupního napětí $V_{IN} = 3,3\text{ V}$ o maximální proudové hodnotě $I_{LOAD} = 4\text{ A}$. Pro účely změřit spínaný zdroj byla navržena a sestavena jednoduchá umělá zátěž:



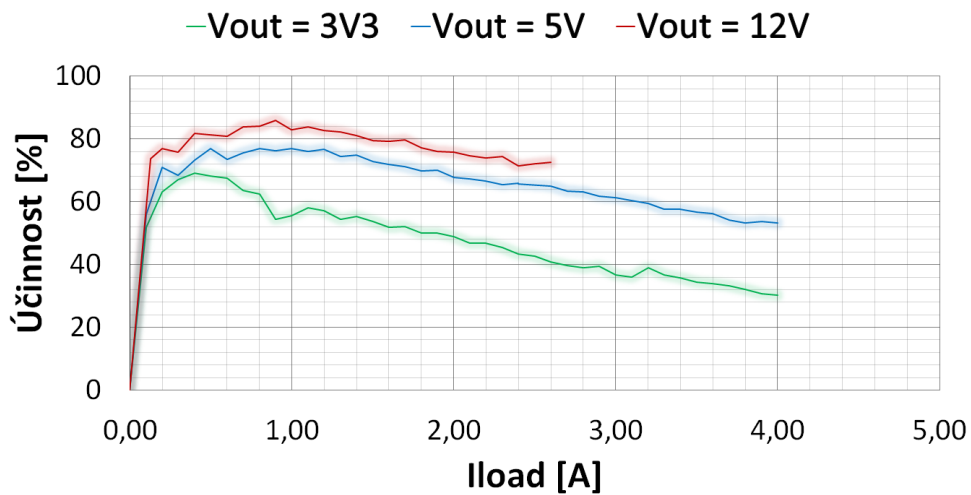
Obrázek 8.8: Schéma jednoduché umělé zátěže pro měření SEPIC

Základ této zátěže je operační zesilovač LM741 zapojený jako převodník napětí - proud s výstupem posíleným unipolárním tranzistorem. Protékající proud se nastavuje dvojicí potenciometrů P1 a P2. Odpor R2 volíme co nejmenší protože je z něj snímáno napětí pro zpětnou vazbu. Celé zapojení je napájeno z vlastního zdroje a se zatěžovaným zdrojem má společnou zem. Maximální napětí zatěžovaného zdroje je limitováno jen použitým výkonovým tranzistorem T1, pro posílení výstupu byly přidány dva externí výkonové tranzistory T2 a T3 umístěné na dostatečně dimenzovaném chladiči. Každý z nich má jeden výkonový rezistor pro tepelnou stabilizaci (R1 a R3) a zpětná vazba je s nimi navázána pomocí dvou rezistorů (R2 a R4). Bez nich by došlo k zahřátí tranzistorů a k dalšímu nárůstu procházejícího proudu, nebo naopak k poklesu proudu v závislosti na tom, na který odpor je připojena zpětná vazba. To je dáno omezenou teplotní stabilizací takto malých hodnot odporů rezistorů. Když snímáme napětí z obou rezistorů, celkový proud se nemění a jak se stabilizuje teplota, ustálí se i proudy tranzistorů.

Díky vytvořené jednoduché umělé zátěži jsme již schopni naměřit zatěžovací charakteristiku a vypočítat tak účinnost spínaného zdroje:



Obrázek 8.9: Zatěžovací charakteristika spínaného zdroje SEPIC



Obrázek 8.10: Účinnost spínaného zdroje SEPIC

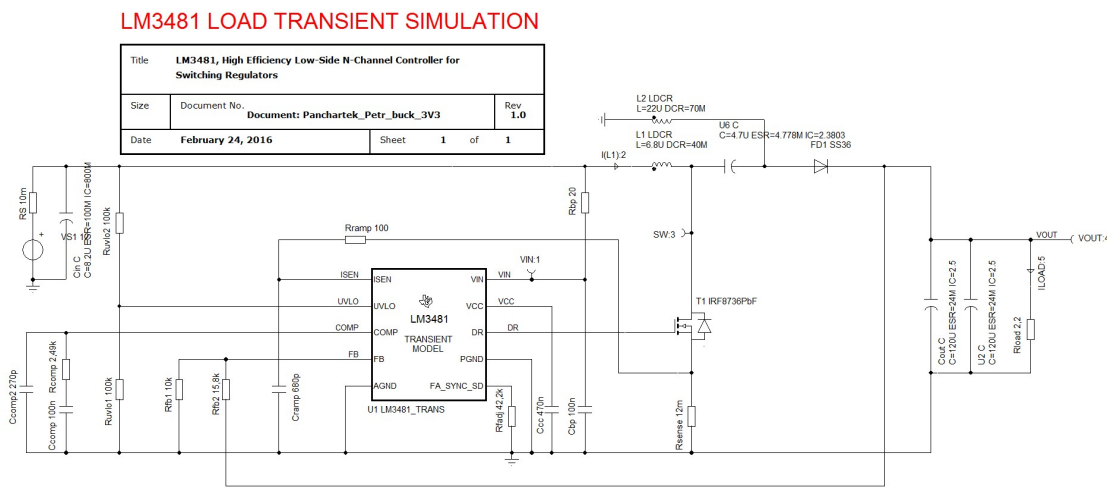
Z naměřeným hodnot vynesných do grafů vyplývá, že spínaný zdroj SEPIC pracuje s účinností nad 80 % pro napětí $V_{OUT} = 12\text{ V}$ při proudovém odběru I_{LOAD} do 1,5 A. Navržený spínaný zdroj SEPIC nedosahuje této účinnosti pro napětí menší než $V_{OUT} = 12\text{ V}$, a proto je nevhodný pro napájení řídicí elektroniky. Chyba mohla nastat v simulaci, protože byly navrženy cívky, které jsou navinuté na společném jádře, a to nelze

v simulátoru TINA zadat. Nevylučuje se rovněž chyba návrhu plošného spoje, protože po vyhotovení plošného zdroje vykazovaly dlouhé úzké cesty pro zpětnou vazbu značný nárůst elektrického odporu. Rovněž se nevylučuje chyba i samotného obvodu LM3481. Rozhodli jsme se tedy ponechat tento zdroj jen pro napájení krokových motorů a pro řídicí elektroniku byly navrženy spínané zdroje nové.

8.2.4 Návrh spínaných zdrojů pro napájení řídicí elektroniky

Z důvodu, že navržený spínaný zdroj SEPIC s cívkami navinutými na společném jádře není vhodný pro napájení řídicí elektroniky, navrhli jsme další dva spínané zdroje stejné topologie pro hodnoty výstupního napětí $V_{OUT} = 3,3 V$, $V_{OUT} = 5 V$ a při proudovém odběru $I_{LOAD} = 1,5 A$. Tentokrát jsme navrhli zdroj s cívkami na oddělených jádrech, abychom vyloučili chybu simulátoru. Rovnice pro výpočet jsou stejné, jako tomu bylo při návrhu spínaného zdroje pro krokové motory.

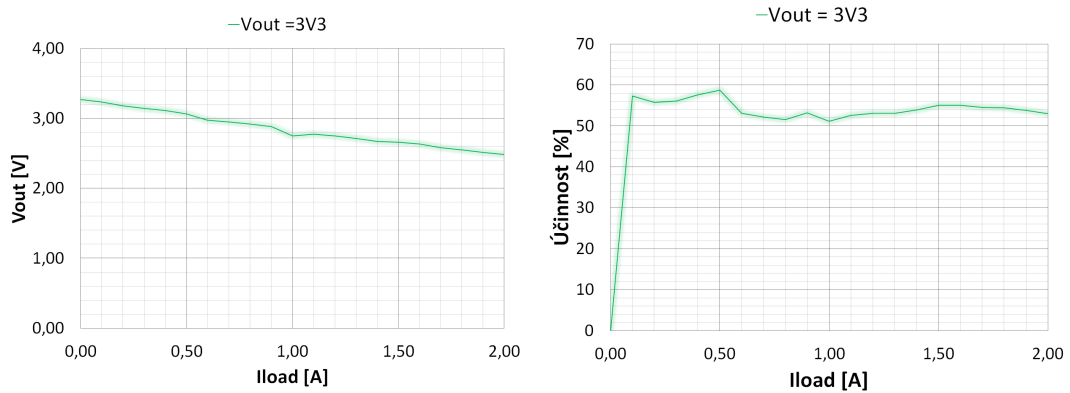
1. Spínaný zdroj SEPIC $V_{OUT} = 3,3 V$



Obrázek 8.11: Simulovaný obvod v simulátoru TINA

Výsledné charakteristiky simulace se nacházejí v příloze B..

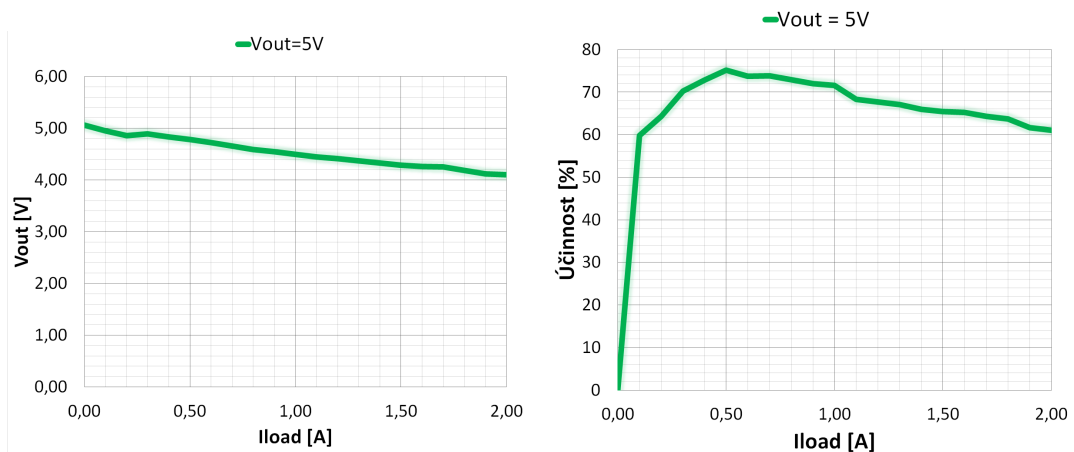
Opět byl zopakován postup při měření zatěžovací charakteristiky a výsledné účinnosti.



Obrázek 8.12: Měření zatěžovací charakteristiky a účinnosti zdroje $V_{OUT} = 3,3 V$

- Z naměřené zatěžovací charakteristiky plyne, že hodnota výstupního napětí V_{OUT} opět značně klesá se zvyšujícím se odběrem proudu, ale už ne tak strmě jak tomu bylo u spínaného zdroje pro krokové motory. Rozhodlo se tento spínaný zdroj ponechat pro napájení řídicí elektroniky, která by neměla přesáhnout odběr $I_{LOAD} = 1 A$.
2. Spínaný zdroj SEPIC $V_{OUT} = 5 V$ Schéma zapojení je zcela identické jako u spínaného zdroje pro $V_{OUT} = 3,3 V$, jen je zde použito jiných hodnot cívek a kondenzátorů pro jeho funkci.

Výsledné charakteristiky simulace se nacházejí v příloze B..



Obrázek 8.13: Měření zatěžovací charakteristiky a účinnosti zdroje $V_{OUT} = 5 V$

I u tohoto realizovaného spínaného zdroje naměřená hodnota výstupního napětí V_{OUT} značně klesá se zvyšujícím se odběrem proudu, ale už ne tak strmě, jak tomu bylo u spínaného zdroje pro krokové motory. Rozhodlo se i tento spínaný zdroj ponechat pro napájení řídicí elektroniky, která by neměla přesáhnout odběr $I_{LOAD} = 1 A$.

Všechny tři spínané zdroje topologie SEPIC byly umístěny do malé plastové krabičky vytisknuté na 3D tiskárně, která je umístěná na boku montáže dalekohledu.



Obrázek 8.14: Napájení montáže dalekohledu

Kapitola 9

Snímání polohy

Aktuální polohu dalekohledu lze určit z přesného nastavení krokových motorů. Pokud však chceme změnit polohu dalekohledu v manuálním nastavení (tj. v pohybu pomocí vlastních rukou), pak pro určení výsledné nastavené polohy potřebujeme snímač polohy.

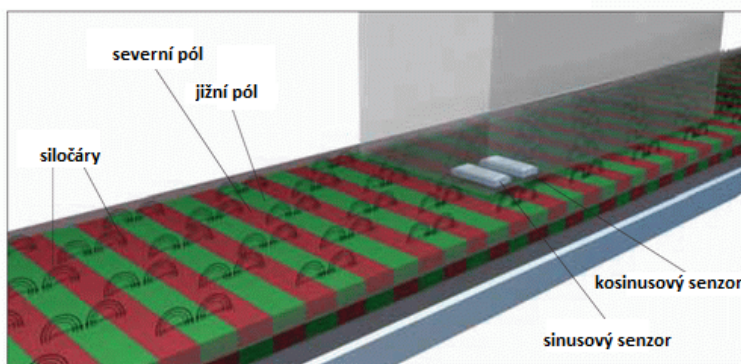
Pro snímání polohy je možné použít:

1. Potenciometrické senzory - mají přesnost až $0,01 \text{ mm}$. Jejich hlavní nevýhoda je omezený úhel otáčení a potřeba použít převodníku.
2. Induktivní senzory - lze použít pouze pro lineární měření a to je pro tuto práci nevhodné
3. Kapacitní senzory - dosahují přesnosti až $0,01 \text{ mm}$. Jejich nevýhoda je, že u nich nelze určit směr pohybu.
4. Optické senzory - jejich přesnost závisí na hustotě pohlcujících/odrazivých ploch.
5. Senzory na principu Hallova jevu - dosahují přesnosti větší než $0,5 \mu\text{m}$. Nevýhoda vyšší přesnosti je pokles maximální rychlosti, při které senzor dokáže správně určit polohu.

Rozhodl jsem se pro magnetické snímače na principu Hallova jevu. Magnetické snímače mají řadu výhod jako vysoká rychlost snímání, teplotní odolnost, odolnost vůči vibracím, malé rozměry a hlavně stále vzrůstající citlivost za přijatelnou cenu.

9.1 Magnetický lineární snímač

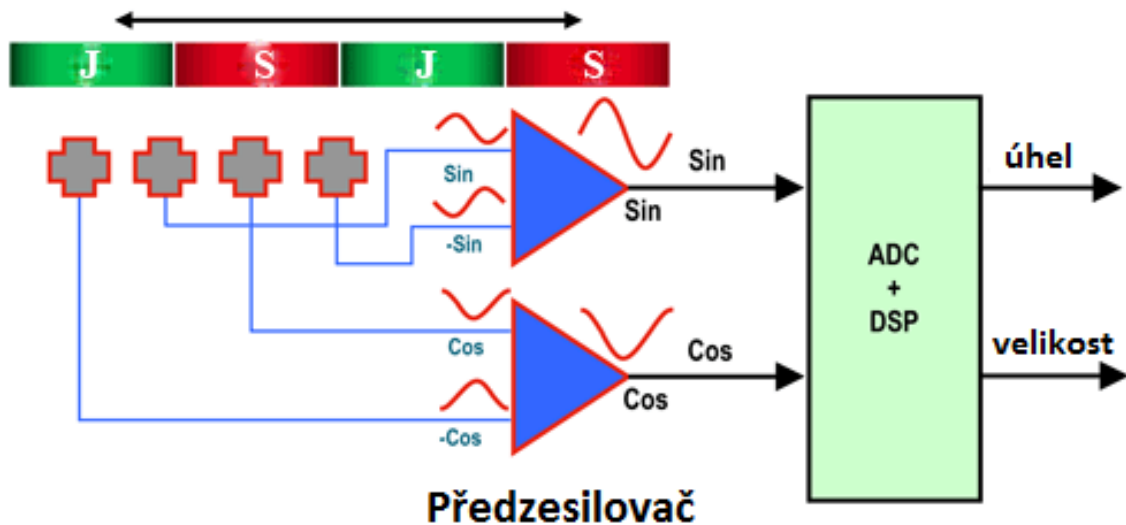
Magnetický lineární senzor detekuje změnu polarity magnetického pole permanentního magnetu snímaného Hallovým senzorem. K měření se využívá dlouhého speciálního magnetického pásku. Pásek se umístí na plochu po celé délce pohybujícího se objektu (např. nosník, kotouč či kryt). Na konstrukci či držák, který je vůči pohyblivé ploše v klidu, umístíme zapouzdřený magnetický snímač, který obsahuje mimo vyhodnocující elektroniky i Hallův senzor. Magnetický pásek je vlastně "nekonečný" permanentní magnet, kde se pravidelně v podélném směru, střídá oblast jižního a severního magnetického pólu. Při jeho pohybu se generuje ve snímáči střídavý impulsní či analogový elektrický signál. Snímač sleduje střídání magnetických pólů na pásku a zjišťuje pohyb pásku vůči snímáči. [64]



Obrázek 9.1: Princip funkce magnetického lineárního senzoru [64]

„Aby bylo možné interpolovat multipolový magnet do mnoha stejně dlouhých kroků, je zapotřebí minimálně 2 (ideálně 4) lineárních Hallových senzorů.“ [64] Lineární Hallové sondy na rozdíl od Hallových spínačů poskytují analogové napětí, které úměrné velikosti magnetického pole kolmému k povrchu senzoru. Každý senzor generuje při pohybu pásky nad soustavou senzorů napětí sinusového (kosinusového) tvaru. [64]

Pokud jsou Hallové senzory vzdáleny na $1/2$ délky magnetického pólu, pak jsou generované sinusové signály, které jsou posunuty o 90° . Signály jsou digitalizovány pomocí A/D převodníků a následně přivedeny do DSP procesoru, který provádí vektorovou transformaci z pravoúhlých souřadnic do polárních souřadnic a výsledkem je fáze (úhel) a velikost. Velikost fáze je mezi 0° až 360° pro každý magnetický pár (jedním párem se rozumí jeden magnetický sever a jeden jih se stejnými délkami). [64]



Obrázek 9.2: Interpolace s použitím lineárních Halloových sensorů [64]

9.2 Lineární magnetický kodér AS5311

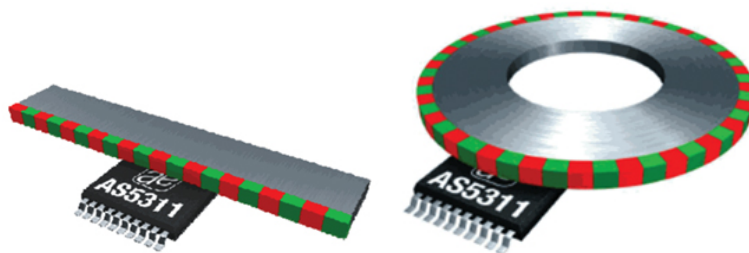
Z řad magnetických sensorů byl vybrán AS5311. Magnetický kodér AS5311 je na světě první magnetický lineární kodér s rozlišením pod $1 \mu\text{m}$ a to je pro snímání aktuální polohy dalekohledu celkem zásadní. Kodér pracuje na principu Hallova jevu, umožňuje realizovat robustní a velmi přesný měřicí systém než optické měřicí senzory. AS5311 je na rozdíl od optického sensoru odolný proti prachu, nečistotám atd. [64]

Magnetický kodér AS5311 pracuje celkem ve třech módech:

1. inkrementální výstup (kvadrurní signály A a B, index signál)
2. PWM výstup
3. Synchronní sériové rozhraní (SSI)

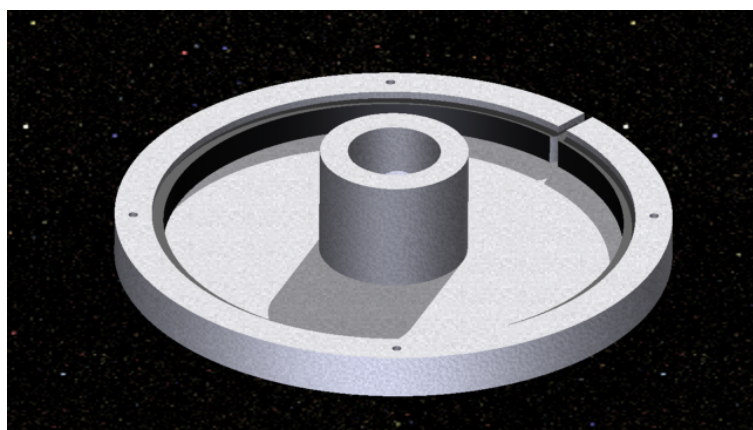
9.3 Návrh kotouče pro lineární magnetický pásek

Pro měření úhlu (rotační měření) se používá multipólový magnetický kroužek a pro lineární měření vzdálenosti se používá lineární multipólová páska. Délka magnetického páru je 2 mm, z toho 1 mm je pól jižní nebo severní. Kodér vůči magnetickému pásku by se neměl pohybovat rychlostí větší než je 650 mm/s a maximální vzdálenost kodéru od magnetické pásky nesmí být větší než 0,6 mm.



Obrázek 9.3: Magnetický kodér AS5311 s multipólovou páskou či kroužkem [64]

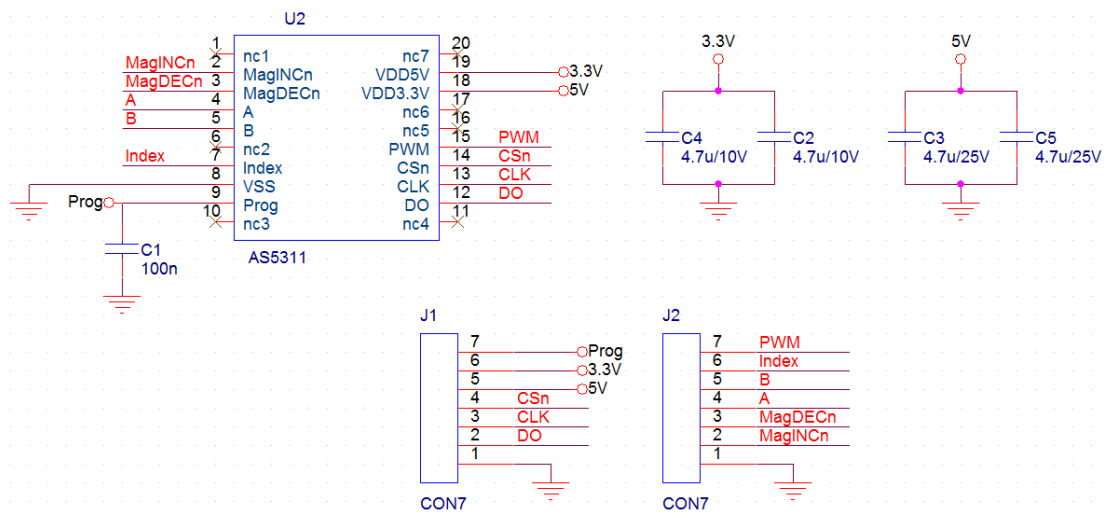
Pro naše účely je vhodný magnetický kroužek, ale jeho dostupnost v české republice je složitější, než dostupnost magnetického pásku. Lineární magnetický pásek však lze použít i pro funkci měření úhlu, jako je k tomu určený magnetický kroužek. Pásek se navine na kotouč, jehož nejmenší poloměr ohybu činí 65 mm a nejmenší průměr kotouče musí být nejméně 130 mm. Kvůli tomu, že kotouč bude v montáži umístěn asi 35 mm pod šnekovým ozubeným kolem a délka šneku je závislá na průměru kotouče, pak je nutné vyrobit kotouč o co nejmenším průměru. Z praktických zkušeností víme, že magnetický pásek špatně drží na vnější straně stěny zaoblených předmětů o minimálním průměru. Z tohoto důvodu byl navržen plastový kotouč o průměru 150 mm o tloušťce stěny 10 mm, na jehož vnitřní straně stěny bude nalepený magnetický pásek, a tím dojde k zamezení odlepování magnetické pásky.



Obrázek 9.4: Návrh kotouče s magnetickým páskem

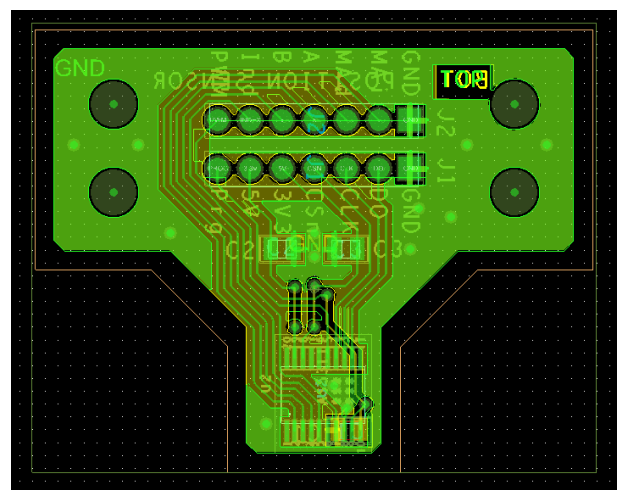
9.4 Návrh obvodu pro snímání polohy

Pro magnetický kódér bylo navrženo schéma podle zapojení katalogového listu. Schéma se skládá z kodéru U2, blokovacího kondenzátoru C1 o kapacitě 100 nF a paralelního zapojení kondenzátoru C2 a C4 (C3 a C5) o výsledné hodnotě 9,4 μF pro napájecí napětí 5V (3,3V).



Obrázek 9.5: Schéma zapojení senzoru AS5311

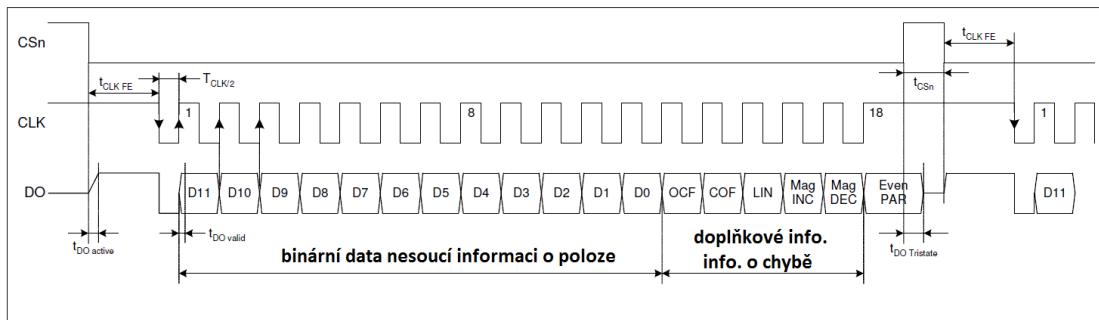
Senzor musí být umístěn ve vzdálenosti nejméně 0,6 mm od magnetické pásky a kondenzátory nesmí bránit jejímu pohybu. Vzhledem k tomu, že je magnetická páska umístěna vně plastového kotouče, musí být plošný spoj k tomu přizpůsoben. Navržený plošný spoj má jednu část užší, kvůli minimálnímu poloměru kotouče a druhou část naopak širší pro připevnění plošného spoje k držáku. Výsledný tvar plošného spoje vidíme na obrázku.



Obrázek 9.6: Návrh plošného spoje s magnetickým kódérem

Plošný spoj byl navržen tak, aby bylo možné zapojit všechny módy senzoru AS5311 k mikrokontroléru. Pro ověření správné funkce kodéru a jeho umístění do správné vzdálenosti od magnetického pásku se hodí inkrementální výstup, kdy sledujeme směr a změnu otáčení kotouče. Pro přesnější vyhodnocování polohy se hodí rozhraní SSI, který využívá 3 vodiče (2 vstupy a 1 výstup):

- DO-(Data OUT) je 18 bit sériový výstup z čidla AS5311, nese data o poloze a data, která informuje mikrokontrolér o stavu čtecího snímače (např. jestli se nebezpečně vzdálil od magnetického pásku)
- CLK-(Clock) hodinový kmitočet, slouží k synchronizaci sériového přenosu
- CSn-(Chip Select negation) zahajuje a ukončuje komunikaci



Obrázek 9.7: Schéma sériové komunikace

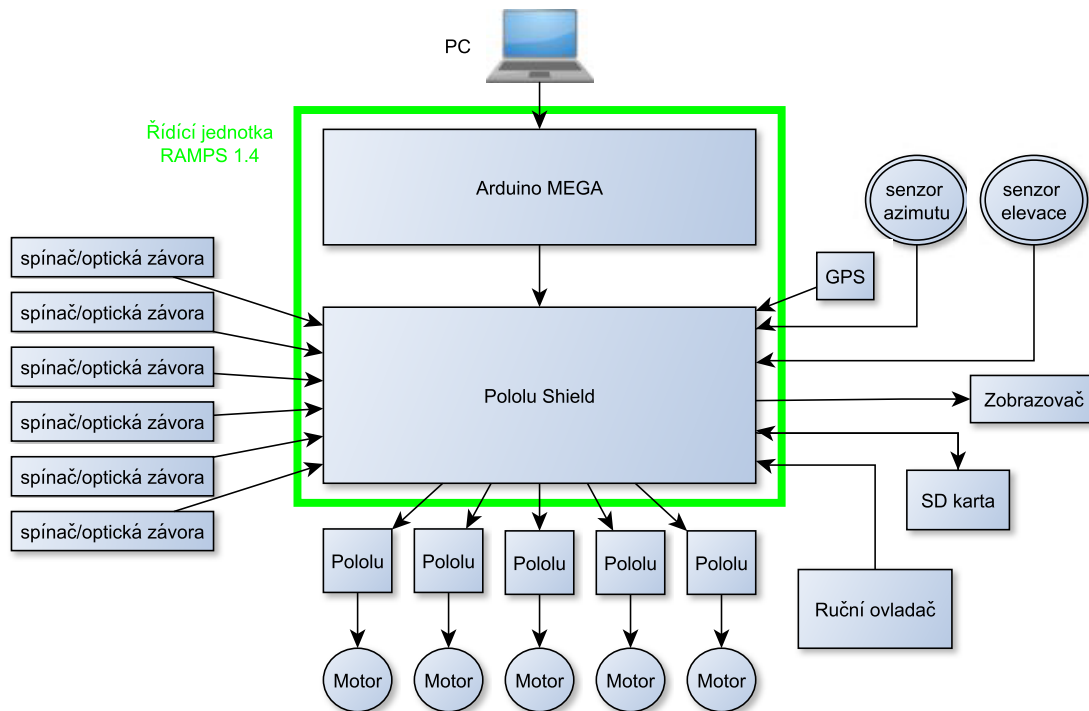
Kapitola 10

Volba řízení pohonu

Celá montáž dalekohledu je poháněná krokovými motory a v manuálním režimu je potřeba vyhodnocovat aktuální polohu obou os dalekohledu (popřípadě polohu natočení motorů) a řídit jejich směr. Montáž je typu azimutální, a musíme tedy zajistit současný pohyb obou os a to různé rychlosti otáčení. V dnešní moderní době je dobré sáhnout po zařízení, které dokáže řídit krokové motory. Zavítáme do oblasti výpočetní techniky a využijeme zařízení jako osobní počítač, notebook nebo PDI. Do tohoto zařízení můžeme stáhnout některý z programů určený pro pozorování noční oblohy, nebo využijeme programu Matlab, ve kterém se dá takový program pro pozorování noční oblohy vlastnoručně vytvořit. Mnoho astronomických dalekohledů se prodává i s možností ovládání pomocí ručního ovladače či joysticku a aktuální hodnotu pozice zobrazují na displeji LCD. Proto se při návrhu počítá i s touto možností rozšíření. Řídicí jednotka by měla umožnit připojení i dalších pohonů pro možnost řízení například okulárového výtahu. Dále by měla umožnit uložit hodnotu aktuální pozice na přenosné médium, jako je v moderní době paměťová karta.

10.1 Schéma zapojení

Pro správnou funkci celé montáže spolu s řídicím programem jsem navrhl toto schéma:



Obrázek 10.1: Blokové schéma zapojení

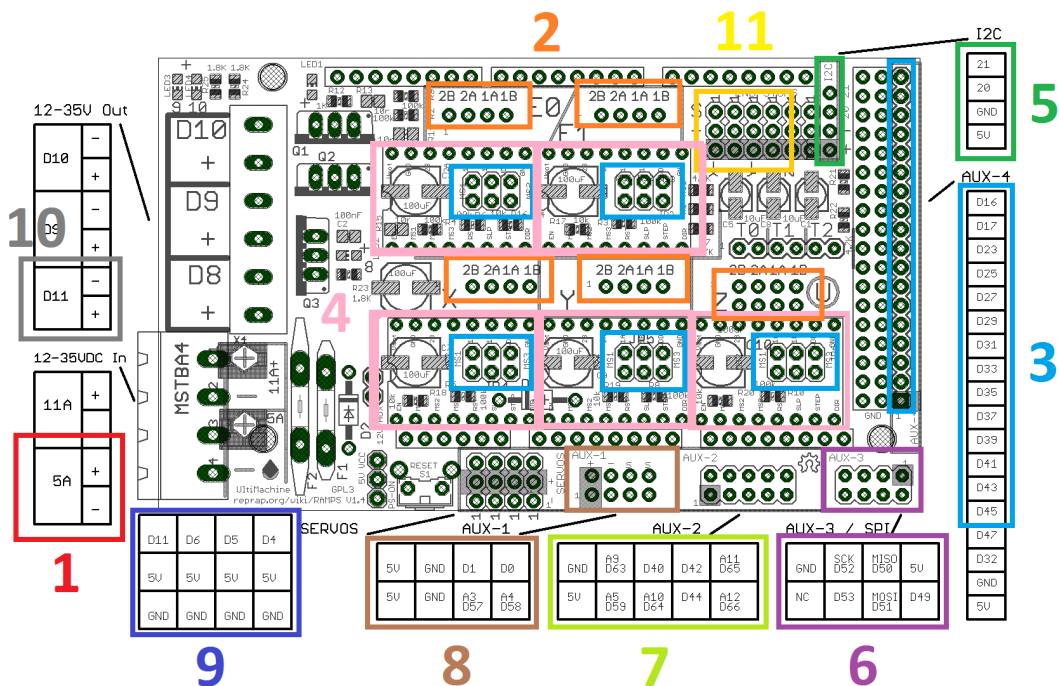
Srdcem zapojení je modul RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield), který se skládá z dvou vývojových desek:

Vývojová deska Arduino Mega 2560

První testování krokových motorů a senzorů polohy se provádělo na vývojové desce Arduino Nano s procesorem ATmega328. Posléze však kvůli malé paměti a nízkému počtu vstupně / výstupních pinů se stala tato deska nevyhovující. Na rozdíl od Arduino Nano má Arduino Mega 2560 rychlejší procesor ATmega2560, větší paměť (256kB flash paměť, 8kB RAM paměť, 4kB EEPROM paměť) a také více vstupních a výstupních pinů (54 digitálních a 16 vstupních analogových). Pro funkci dalekohledu potřebujeme ovládat celkem velké množství periferních zařízení viz. blokové schéma 10.1, a proto se deska Arduino Mega 2560 hodí pro tyto účely.

Pololu Shield

Tento modul je určený původně pro řízení krokových motorů 3D tiskáren. 3D tiskárny totiž využívají podobnou funkci řízení krokových motorů, kterou můžeme aplikovat na řízení pohonu montáže dalekohledu a využít i další funkce tohoto modulu. Rozložení a výběr oblastí z hlediska řízení ukazuje následující schéma:



Obrázek 10.2: Blokové schéma zapojení

1. napájení 12V - slouží hlavně pro napájení krokových motorů z navrženého spínaného zdroje SEPIC
2. výstupy pro motory - pro dalekohled zatím využíváme jen 3 porty (E0, E1 a X), pro pohon osy elevace, azimutu a pohon pro nastavení výšky okuláru. Zbylé porty by sloužily pro přídatné motory, které by dokázaly nastavit úhel naklonění celé vidlice vůči zemi (např. v kopcovitém terénu apod.)
3. výstupy MSx - na původní desce sloužily tyto piny pro pevné nastavení rychlosti pohybu motoru pomocí propojek. Pro možnost nastavení různé rychlosti pohybu za chodu přístroje, byly tyto piny přivedeny na digitální výstupy procesoru, aby mohl uživatel ovládat jejich rychlost pomocí osobního počítače.
4. porty pro připojení řídicích obvodů motorů - jsou zde zapojeny moduly Pololu DRV8825, které byly vybrány jako náhrada za staré moduly A4988. Modul A4988

neumožňuje většího proudového zatížení motorů, jako modul Pololu DRV8825.

5. port pro připojení LCD displeje - zobrazuje aktuální polohu dalekohledu
6. port pro připojení SD karty - pro záznam a čtení dat polohy dalekohledu
7. port pro GPS modul - slouží pro zjištění polohy dalekohledu na zemi a tedy lehčí identifikaci viditelné oblasti nebeské oblohy
8. port pro senzory polohy - senzory lineární magnetický kodér AS5311 s vysokým rozlišením pro snímání aktuální polohy dalekohledu
9. port pro ruční ovladač - zatím nevyužitý, sloužil by pro manuální ovládání montáže bez možnosti připojení k osobnímu počítači
10. výstup pro nahřívání - zatím nevyužitý, sloužil by pro nahřívání objektivu (např. při vzniku kapének v ranních hodinách)
11. port pro spínače/optické závory - využito zatím pro 6 spínačů, pro nastavení konečných poloh motorů při pohybu, aby nedošlo k poškození přístroje. Zbylé porty se mohou využít např. pro optické závory a snímat s nimi polohu úhlu naklonění vůči zemi při použití motorů pro náklon celé vidlice dalekohledu.

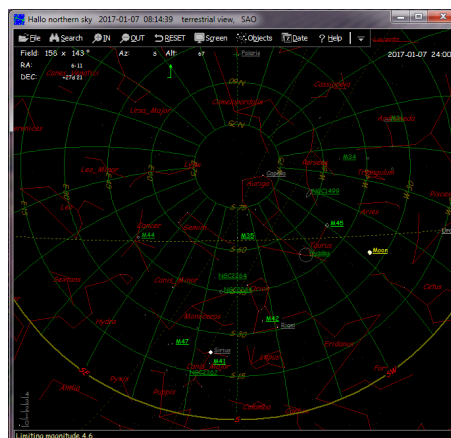
10.2 Softwarové varianty řízení navigace montáže

Pro správnou funkci dalekohledu je potřeba využít některého z programů pro sledování nebeských těles. Program musí obsahovat databázi těchto nebeských těles, jejich polohu a umět tyto informace poslat do dalekohledu, který by se dle těchto informací mohl sám natočit za pozorovaným tělesem a sledovat jej.

Příklady astronomických map a planetárií, kterými lze ovládat dalekohled:

HNSKY (Hallo Northern Sky)

Tycho 2 databáze hvězd, 30 000 Deep Sky objektů. Velmi rychlý a snadno ovladatelný program. Podporuje ovládání dalekohledů počítačem pomocí ovladače ASCOM.



Obrázek 10.3: Program HNSKY

Skymap

Zobrazuje mapu oblohy s více než 15 milióny hvězd. Velmi snadné ovládání, místní nabídky na pravém tlačítku myši, podpora ovládání dalekohledu. Tento vzdělávací program je určen jak pro začátečníky, tak pro profesionály v oboru astronomie. Program je určený pro přenosná zařízení fungující na platformě Windows.



Obrázek 10.4: Program Skymap

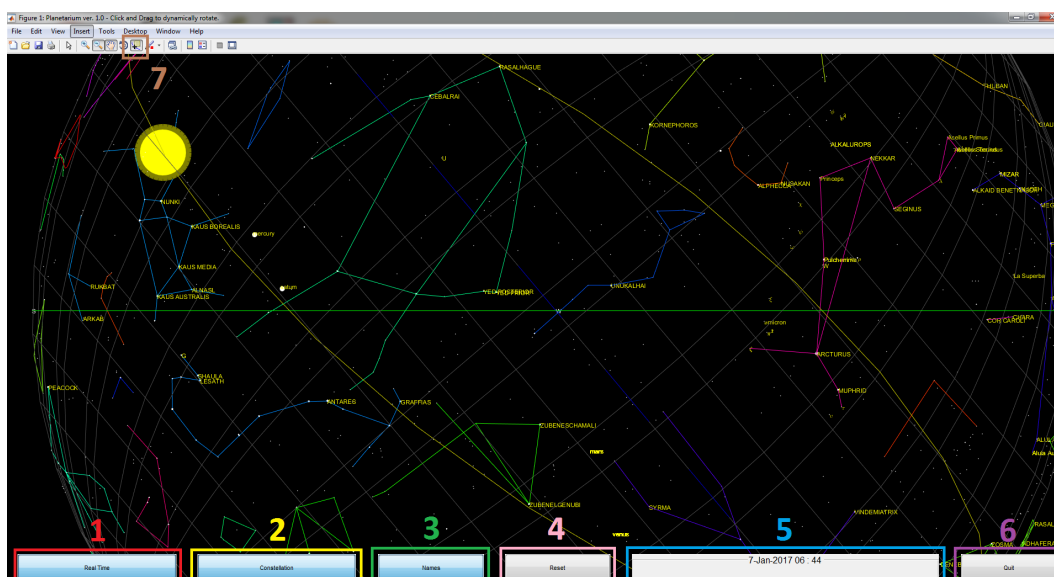
Stellarium

Planetárium je volně ke stažení. V plné verzi obsahuje přes 210 miliónů hvězd z katalogu Hipparcos a realistické 3D zobrazení oblohy. Sledovat je možné dráhu těles, simulovat jejich pozice z různých koutů světa v čase. Samozřejmostí je možnost zobrazit si nejrůznější mřížky nebo oblohu tak, jak ji uvidíte z teleskopu, kterou ocení zejména začínající pozorovatelé. Program podporuje mnoho zařízení na platformě Linux, Mac OS X i Windows. [65]



Obrázek 10.5: Program Stellarium

Rozhodli jsme se vytvořit vlastní navigační program pro řízení montáže, který byl napsán v MATLABu. Program byl inspirován podle projektu, který byl zadán studentům z univerzity Saint Luis, jako semestrální práce. [67] Databázi hvězd jsme čerpali z katalogu Hipparcos. [68] Všechny 88 souhvězdí vykreslujeme pomocí matic s daty, které jsme přepisovali ze serveru Wikipedia. [14] Aktuální data jsou generována pomocí formátu JSON (JavaScript Object Notation) [69], určený pro výměnu dat ze serveru Astro-Phys.com [70]. Výhoda je, že máme aktuální data o poloze nebeských objektů, které pozorujeme a následně je můžeme poslat do řídicí jednotky přes port USB. [66] Nevýhoda je, že vyžaduje připojení k internetu a bez něj námi vytvořený program prostě nefunguje. Popis vytvořeného programu Planetarium:



Obrázek 10.6: Navigační program Planetarium vytvořený v MATLABu

1. Aktuální poloha (Real time) - spustí formát JSON a dochází k následné výměně dat o poloze nebeských objektů přes internet. Planetarium a nebeské objekty se následně natočí do aktuální polohy, které vidí pozorovatel na nebi.
2. Konstelace (Constellation) - zapíná a vypíná vykreslování všech 88 souhvězdí
3. Názvy (Names) - zapíná a vypíná názvy nejjasnějších hvězd
4. Reset - ukončí formát JSON a navrátí polohu planetária na 0° DEC a 0° RA.
5. Aktuální čas - ukazuje datum a čas pro danou polohu pozorovatele
6. Konec (Quit) - ukončí Planetarium
7. Souřadnice - zobrazí souřadnice po kliknutí myši na nebeský objekt, poté dojde k výzvě uživatele, jestli má dojít k přenosu dat do řídicí jednotky přes port USB

Kapitola 11

Závěr

V této diplomové práci byly popsány základní druhy dalekohledů a jejich montáží, které jsou v současné době používány. Shrnutí se zaměřuje na současně používanou pozorovací techniku a příslušenství, výhody a problémy s tím související. Dále také způsoby dosažení požadované souřadnice tělesa. Cílem práce bylo navrhnout a realizovat elektronické ovládací zařízení pro nastavení správné polohy dalekohledu pro sledování pohybu objektu na obloze. Dále systém navrhnout tak, aby do něj bylo možno integrovat další části dnes používaných s dalekohledy, jako CCD kameru, apod.

Nejprve byla navržena optika pro dalekohled typu Newton. Podařilo se vypočítat velikost a umístění sekundárního zrcadla. Výpočet byl zaměřen pro možnost pozorování planet a pro možnost připojení CCD kamery dalekohledu. Optická soustava byla realizována a vyzkoušena na pozorování Měsíce.

Konstrukční návrh dalekohledu je modifikací již existujících řešení s montáží Dobson a je vhodný spíše pro amatérskou astronomii. Při konstrukci zařízení byl brán zřetel zejména na přesnost polohování a montáž s převodem bez vůle.

Pro ověření správné funkce elektronického ovládacího zařízení byla navržena a sestavena azimutální montáž pro pohyb dvou hlavních os. Pro pohyb bylo použito šnekového převodového soustrojí s převodovým poměrem 80:1, a pro připojení šnekového převodového soustrojí k pohonné jednotce bylo využito čelních ozubených kol s převodovým poměrem 4:1. Pro ověření výsledků výpočtu, tvorby 3D modelů a výkresové dokumentace vybraných součástí bylo využito softwaru Autodesk Inventor.

Pro pohon teleskopu bylo zvoleno použití krokových motorů a modulu pro jejich řízení k dosažení dostatečné jemnosti kroku. Toto řešení zabezpečilo dostatečnou přesnost (jemnost kroku) při natáčení os montáže. Nevýhoda je ovšem větší spotřeba a pomalejší pohyb teleskopu v řádu desítek sekund. Pro napájení krokových motorů byla vybrána vhodná

topologie spínaného zdroje a byly vypočteny jeho jednotlivé prvky. Funkce navrženého spínaného zdroje byl ověřen v simulátoru TINA. Ze simulací vyplynulo, že funkce spínaného zdroje je správná a je vhodná i pro napájení řídicí jednotky. Byla navržena a vytvořena deska plošného spoje pro spínaný zdroj. Spínaný zdroj byl odzkoušen na jednoduché umělé zátěži, která byla postavena pro tyto účely. Naměřené výsledky se neshodovaly s výsledky simulace. Účinnost zdroje, při vzrůstajícím odběru proudu, strmě klesala pro vstupní napětí menší než 12 V. Proto se spínaný zdroj využil jen pro napájení krokových motorů. Pro napájení řídicí jednotky se navrhly a zrealizovaly dva nové zdroje, u kterých účinnost tolik neklesala. Všechny tři spínané zdroje byly umístěny do malé plastové krabičky vytisknuté na 3D tiskárně.

Pro přesné snímání polohy byl zvolen lineární magnetický kodér s multipólovou páskou. Multipólová páska byla umístěna do plastového kotouče a připevněn spolu s magnetickým kódérem na montáž dalekohledu. Pro magnetický kodér byl navrhnut a postaven plošný spoj, tvarovaný pro maximální přiblížení k multipólové pásce, aniž by ovlivnil kodér. Měření ukázalo, že na ose elevace magnetický kodér nevykazuje nepřesnosti měření aktuální polohy. Na ose azimutu však dochází k problémům vyhodnocování polohy při pohybu kodéru přes zakončení multipólové pásky. Tento problém by se dal do budoucna vyřešit přidáním dalšího magnetického kodéru, který by byl umístěn na protější straně multipólové pásky. Řídicí jednotka by mezi nimi přepínala vždy, když se jeden kodér přiblíží ke konci pásky.

Pro řízení pohonu bylo navrženo blokové schéma s řídicí jednotkou RAMPS. Při výběru této jednotky byl brán zřetel zejména na možnost rozšíření o další periferie dalekohledu. Řídicí jednotka byla naprogramována tak, aby přijímala signály ze senzorů polohy. Tyto hodnoty dokáže zobrazit na LCD displeji, ukládat data o poloze na SD kartu a opět je z SD karty číst. K řídicí jednotce je připojený GPS modul, který se v budoucnu využije pro zjišťování polohy dalekohledu na Zemi. Do budoucna se také plánuje připojení ručního ovladače, možnost nahřívání primárního zrcadla.

Pro samotné řízení motorů přes řídicí jednotku byl napsán navigační program s astronomickou databází. Program dokáže posílat souřadnice vybraného nebeského objektu do řídicí jednotky a ta následně pohne s krokovým motorem. Nevýhoda je, že program vyžaduje připojení k internetu a bez něj nefunguje. Do budoucna se plánuje rozšíření programu o výpočty trajektorií nebeských objektů bez závislosti na webovém rozhraní.

Tato diplomová práce splnila zadané cíle a navíc v sobě zahrnuje oblast mechaniky, optiky a programování.

Literatura

- [1] *Hans Lippershey* [online]. Dostupné z: <<http://www.micro.magnet.fsu.edu>>.
- [2] *Galileo Galilei* [online]. Dostupné z: <<http://www.micro.magnet.fsu.edu>>.
- [3] *Johannes Kepler* [online]. Dostupné z: <<http://www.micro.magnet.fsu.edu>>.
- [4] *Sir Isaac Newton* [online]. Dostupné z: <<http://www.micro.magnet.fsu.edu>>.
- [5] *Galileo's Refractor: The first telescope opens a window on the universe* [online]. Dostupné z: <<http://www.amazingspace.org>>.
- [6] *barbenpd4: Johann Kepler* [online]. Dostupné z: <<http://www.barbenpd4.wikispaces.com>>.
- [7] *Donald E. Simanek: Lens Basics* [online]. Dostupné z: <<http://www.lhup.edu>>.
- [8] *Amateur Astronomers Group: EM spectrum* [online]. Dostupné z: <<http://www.astronomersgroup.org>>.
- [9] *SIRRAH : Astronomické dalekohledy* [online]. Dostupné z: <<http://www.sirrah.troja.mff.cuni.cz>>.
- [10] *Petr Vašek: D A L E K O H L E D Y* [online]. Dostupné z: <<http://www.v.smid.sk>>.
- [11] *Wikipedie: Refraktor* [online]. Dostupné z: <<http://www.cs.wikipedia.org>>.
- [12] *Wikipedie: Dalekohled* [online]. Dostupné z: <<http://www.cs.wikipedia.org>>.
- [13] *Wikipedie: Newtonian telescope* [online]. Dostupné z: <<http://www.en.wikipedia.org>>.
- [14] *Lists of stars by constellation* [online]. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org>>.

- [15] *George Adcock: The History and Development of Telescopes* [online]. Dostupné z: <<http://www.brighthub.com>>.
- [16] *Supra: Refractory - čočkové dalekohledy* [online]. Dostupné z: <<http://www.supra-dalekohledy.cz>>.
- [17] *Supra: Zrcadlové dalekohledy typu Newton* [online]. Dostupné z: <<http://www.supra-dalekohledy.cz>>.
- [18] *Supra: Dobsony* [online]. Dostupné z: <<http://www.supra-dalekohledy.cz>>.
- [19] *Supra: Dalekohled SKY-WATCHER NEWTON* [online]. Dostupné z: <<http://www.supra-dalekohledy.cz>>.
- [20] *Tools of Cosmology: The First Telescopes* [online]. Dostupné z: <<http://www.history.aip.org>>.
- [21] *José Alberto Villalobos M.: Astronomía 10 grados norte* [online]. Dostupné z: <<http://www.astronomia10norte.blogspot.cz>>.
- [22] *TelescopeS: Maksutov-Cassegrain Telescopes* [online]. Dostupné z: <<http://www.telescopes.net>>.
- [23] *Pikon: Telescope* [online]. Dostupné z: <<http://www.pikonice.com>>.
- [24] *Wiki: Katadioptrický dalekohled* [online]. Dostupné z: <<http://www.wikina.cz>>.
- [25] *Wiki: Katadioptrický dalekohled* [online]. Dostupné z: <<http://www.en.wikipedia.org>>.
- [26] *Observatories and Instruments: Cassegrain Telescope* [online]. Dostupné z: <<http://www.astronomy.snjr.net>>.
- [27] *JURYKO: Montáže astronomické dalekohledu* [online]. Dostupné z: <<http://www.juryko.cz>>.
- [28] *Mark Thompson: Choosing a telescope* [online]. Dostupné z: <<http://www.markthompsonastronomy.com>>.
- [29] *Joe Palca: Hubble's Other Telescope And The Day It Rocked Our World* [online]. Dostupné z: <<http://www.npr.org>>.

- [30] *Montáže dalekohledů* [online]. Dostupné z: <<http://www.astrosvet.cz>>.
- [31] *Russell W. Porter's Palomar Art on Exhibit* [online]. Dostupné z: <<http://www.palomarskies.blogspot.cz>>.
- [32] *Vojtěch Vavřín: Interaktivním modelem dalekohledu D50* [online]. Dostupné z: <<http://www.vojtechvavrin.cz>>.
- [33] *Astronomický koutek: Slovník astronomických pojmů* [online]. Dostupné z: <<http://www.home.zcu.cz>>.
- [34] *Celestial Coordinate Systems and the Precession of Earth Rotation* [online]. Dostupné z: <<http://www.crab0.astr.nthu.edu.tw>>.
- [35] *Scopes Reviewed: Mounts* [online]. Dostupné z: <<http://www.scopesreviewed.com>>.
- [36] *TS Observatory: Montáž...* [online]. Dostupné z: <<http://www.bilek.astronomy.cz>>.
- [37] *Tomáš Maruška: Výpočet velikosti sekundárního zrcadla Newtonovho d'alekohľadu* [online]. Dostupné z: <<http://www.atm.zaciatok.sk>>.
- [38] <http://www.365astronomy.com/Siberia-Mirror-Set-110-fl-800mm-Newton.html> [online]. Dostupné z: <<http://www.365astronomy.com>>.
- [39] Panchártek, P., *Nabíječka článků Li-pol a Li-ion*, ČVUT 2013-07-04
- [40] Husák, M., *Napájecí zdroje v elektronice*, ČVUT 1998, 154 str., ISBN 80-01-01764-8
- [41] Faktor, Z., *Transformátory a cívky*, Praha 1999, BEN, 393 str., ISBN 80-86056-49-X
- [42] Krejčířík, A., *Napájecí zdroje III.*, Praha 1999, BEN, 350 str., ISBN 80-86056-56-2
- [43] Krejčířík, A., *Moderní spínané zdroje*, Praha 1999, BEN, 112 str., ISBN 80-86056-78-3
- [44] Krejčířík, A., *Inteligentní nabíječky s obvody Maxim*, Praha 2000, BEN, 142 str., ISBN 80-86056-83-X
- [45] Krejčířík, A., *DC/DC měniče*, Praha 2001, BEN, 109 str., ISBN 80-7300-045-8

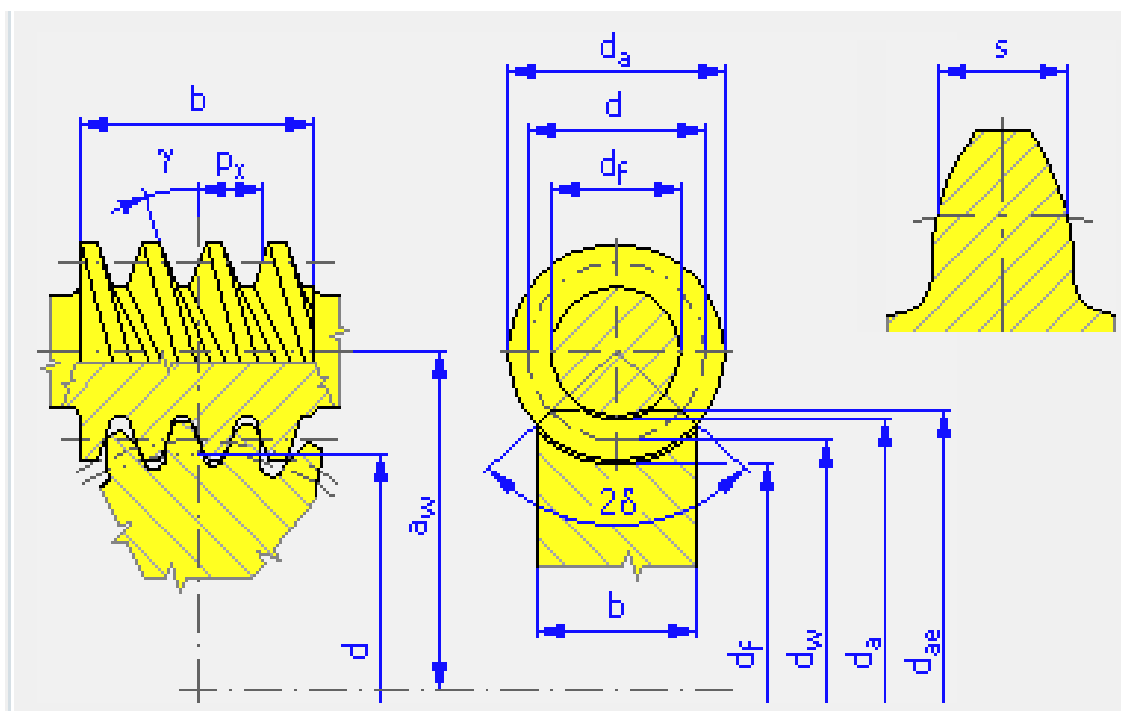
- [46] Šandera, J., *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*, Praha 2006, BEN, 270 str., ISBN 80-7300-181-0
- [47] Záhlava, V., *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*, ČVUT 2005, 77 str., ISBN 80-01-03351-1
- [48] Kyselová, J., *Dalekohledy - optický princip, vývoj, využití v technické a optometrické praxi, metody posouzení kvality výrobku* [online], Dostupné z: <http://www.is.muni.cz>.
- [49] Dostál, J., *Konstrukce vidlicové a azimutální montáže* [online], Dostupné z: <http://www.vutbr.cz>.
- [50] Jančaříkl, J., *Konstrukce německé paraletické montáže astronomického dalekohledu* [online], Dostupné z: <http://www.vutbr.cz>.
- [51] Tůma, J., *Konstrukce paraletické vidlicové montáže astronomického dalekohledu* [online], Dostupné z: <http://www.dspace.vutbr.cz>.
- [52] Spáčil, T., *Testovací plošina se třemi stupni volnosti* [online], Dostupné z: <http://www.dspace.vutbr.cz>.
- [53] *Review: Sky-Watcher SynScan GoTo Dobsonian* [online]. Dostupné z: <http://www.skynews.ca>.
- [54] *Instruction manual* [online]. Dostupné z: <http://www.ca.skywatcher.com>.
- [55] *Spínané zdroje I.* [online]. 24. červen 2009. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/>.
- [56] *Spínané zdroje II.* [online]. 17. říjen 2012 [cit. 20.10.2012]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/>.
- [57] *Cuk, Sepic, Zeta* [online]. 11. březen 2013. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/>.
- [58] *Designing DC/DC converters based on SEPIC topology* [online]. Dostupné z: <http://www.ti.com>.

- [59] *Texas Instruments: LM3481* [online]. Dostupné z: <<http://www.ti.com>>.
- [60] *Kool M μ Powder Cores* [online]. Dostupné z: <<http://mag-inc.com/>>.
- [61] *Impulzní zdroje a měniče II.* [online]. Dostupné z: <<http://danyk.cz/>>.
- [62] *Prášková feromagnetická jádra MPP, HF a KOOL M μ* [online]. Dostupné z: <<http://www.pmec.cz/>>.
- [63] *How To Control a Stepper Motor with A4988 Driver and Arduino* [online]. Dostupné z: <<http://www.howtomechatronics.com>>.
- [64] *Lineární magnetické kodéry s inkrementálním výstupem* [online]. Dostupné z: <<http://www.spezial.cz>>.
- [65] *Stellarium* [online]. Dostupné z: <<http://www.howtomechatronics.com>>.
- [66] *Arduino Tutorial 07: Matlab* [online]. Dostupné z: <<http://www.howtomechatronics.com>>.
- [67] *Michael Goldwasser: Stars and Constellations* [online]. Dostupné z: <<http://www.cs.slu.edu>>.
- [68] *Hipparcos astrometric catalog* [online]. Dostupné z: <<http://tdc-www.harvard.edu>>.
- [69] *Ned Gulley: What's that in the sky? Build a MATLAB Planetarium* [online]. Dostupné z: <<http://www.blogs.mathworks.com>>.
- [70] *Astro-Phys.com Ephemeris API* [online]. Dostupné z: <<http://www.astro-phys.com>>.

Příloha A

Výpočet převodovky

A.1 Parametry šnekového soukolí



Obrázek A.1: Hlavní parametry šnekového ozubeného kola

1. Převodový poměr i :

$$i = \frac{w_s}{w_k} = \frac{z_k}{z_s} = 80 \quad (\text{A.1})$$

Kde:

i ...převodový poměr

w_s ...otáčky šneku (-)

w_k ...otáčky šnekového kola (-)

z_s ...počet chodů šneka (-)

z_k ...počet zubů šnekového kola (-)

2. Počet zubů z :

$$z_k = z_s \cdot i = 80 \quad (\text{A.2})$$

Kde:

$z_k = 1$...zvoleno dle specifikací na výrobu a rad zkušného technika

3. Osový úhel profilu α :

$\alpha = 20^\circ$...zvoleno dle specifikací na výrobu a rad zkušného technika

4. Osový modul m :

$m = 1\text{mm}$...zvoleno dle specifikací na výrobu a rad zkušného technika

5. součinitel průměru šneku q :

$$q = \frac{d_s}{m} \quad (\text{A.3})$$

$$d_s = q \cdot m = 16 \cdot 1 = 16 \text{ mm} \quad (\text{A.4})$$

Kde:

q ...součinitel průměru šneku [-], zvoleno $q = 16$ dle výroby

d_s ...roztečný průměr šneku [mm]

6. úhel sklonu γ :

$$\tan \gamma = \frac{m \cdot z_s}{d_s} = \frac{z_s}{q} = \frac{1}{16} = 0,0625 \quad (\text{A.5})$$

$$\gamma = \arctan 0,0625 = 3,5763^\circ = \quad (\text{A.6})$$

7. rozteč ozubení p_x :

$$p_x = \pi \cdot m = \pi \cdot 1 = 3,1416 \text{ mm} \quad (\text{A.7})$$

8. stoupání šroubovice p_z :

$$p_z = \pi \cdot d_s \cdot \tan \gamma = \pi \cdot 16 \cdot 0,0625 = 3,1416 \text{ mm} \quad (\text{A.8})$$

9. roztečný průměr šnekového kola d_k :

$$d_k = z_k \cdot m = 80 \cdot 1 = 80 \text{ mm} \quad (\text{A.9})$$

10. valivý průměr d_w :

$$d_{ws} = d_s = 16 \text{ mm} \quad (\text{A.10})$$

$$d_{wk} = d_k + 2 \cdot x \cdot m = 80 + 2 \cdot 0 \cdot 1 = 80 \text{ mm} \quad (\text{A.11})$$

Kde:

d_{wk} ...valivý průměru kola (mm)

d_{ws} ...valivý průměru šneku (mm)

x ...jednotkové posunutí (-)

11. vzdálenost os převodu a_w :

$$a_w = \frac{d_s + d_k}{2} = \frac{16 + 80}{2} = 48 \text{ mm} \quad (\text{A.12})$$

12. výška hlavy zubu h_a :

$$h_{as} = h_a \cdot m = 1 \cdot 1 = 1 \text{ mm} \quad (\text{A.13})$$

$$h_{ak} = (h_a + x) \cdot m = (1 + 0) \cdot 1 = 1 \text{ mm} \quad (\text{A.14})$$

Kde:

h_a ...součinitel výšky hlavy zubu (-), zvoleno $h_a = 1$ dle tabulek

h_{as} ...výška hlavy zubu šneku (mm)

h_{ak} ...výška výšky hlavy zubu šnekového kola (mm)

13. výška paty zubu h_f :

$$h_{fs} = h_f \cdot m = (1 + c) \cdot m = (1 + 0,2) \cdot 1 = 1,2 \text{ mm} \quad (\text{A.15})$$

$$h_{fk} = (h_f - x) \cdot m = (1,2 - 0) \cdot 1 = 1,2 \text{ mm} \quad (\text{A.16})$$

Kde:

c ...součinitel hlavové vůle šneku, zvoleno $c = 0,2$ dle tabulek

h_{fs} ...součinitel výšky zubu šneku (-)

h_{fk} ...součinitel výšky zubu šnekového kola (-)

14. průměr hlavové kružnice d_a :

$$d_{as} = d_s + 2 \cdot h_{as} = 16 + 2 \cdot 1 = 18 \text{ mm} \quad (\text{A.17})$$

$$d_{ak} = d_k + 2 \cdot h_{ak} = 80 + 2 \cdot 1 = 82 \text{ mm} \quad (\text{A.18})$$

Kde:

d_{as} ...průměr hlavové kružnice šneku (mm)

d_{ak} ...průměr hlavové kružnice šnekového kola (mm)

15. průměr základní kružnice d_b :

$$d_{bk} = d_k \cdot \cos \alpha = 80 \cdot \cos 20 = 75,1754 \text{ mm} \quad (\text{A.19})$$

$$d_{bs} = d_s \cdot \cos \alpha = 16 \cdot \cos 20 = 15,0351 \text{ mm} \quad (\text{A.20})$$

16. průměr patní kružnice d_f :

$$d_{fs} = d_s - 2 \cdot h_{fs} = 16 - 2 \cdot 1,2 = 13,6 \text{ mm} \quad (\text{A.21})$$

$$d_{fk} = d_k + 2 \cdot h_{fk} = 80 - 2 \cdot 1,2 = 77,6 \text{ mm} \quad (\text{A.22})$$

Kde:

d_{fs} ...průměr patní kružnice šneku (mm)

d_{fk} ...průměr patní kružnice šnekového kola (mm)

17. tloušťka zubů a šířka mezer v osové rovině s_x :

$$s_{xs} = \frac{(\pi \cdot m)}{2} = 1,571 \text{ mm} \quad (\text{A.23})$$

$$s_{xk} = \frac{(\pi \cdot m)}{2} + 2 \cdot x \cdot m \cdot \tan \alpha = \frac{(\pi \cdot 1)}{2} + 2 \cdot 0 \cdot 1 \cdot \tan 20 = 1,571 \text{ mm} \quad (\text{A.24})$$

Kde:

s_{xs} ...tloušťka zubů a šířka mezer v osové rovině šneku (mm)

s_{xk} ...tloušťka zubů a šířka mezer v osové rovině šnekového kola (mm)

18. délka šneku (šroubovice) b_1 :

$$b_1 = (11 + 0,06 \cdot z_k) \cdot m = (11 + 0,06 \cdot 80) \cdot 1 = 15,8 \text{ mm} \quad (\text{A.25})$$

S úvahou nepřesností při skládání celé montáže, jsme zvolili délku šneku 20 mm.

19. šířka věnce kola b_2 :

$$b_2 = (0,75 \cdot (1 + \frac{2}{q}) \cdot d_s) = (0,75 \cdot (1 + \frac{2}{16}) \cdot 16) = 13,5 \text{ mm} \quad (\text{A.26})$$

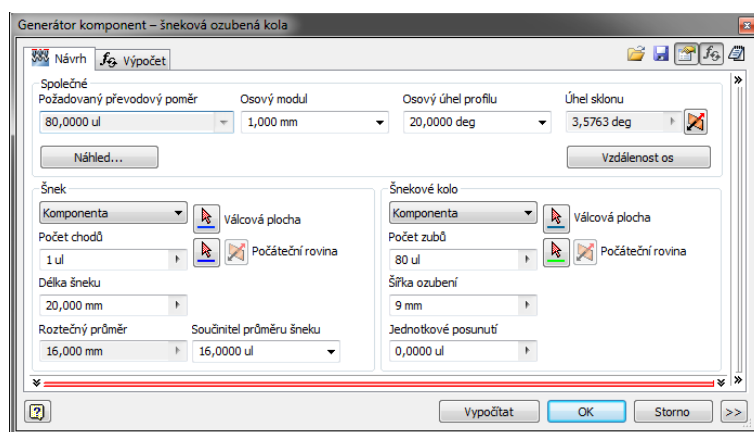
Z důvodu velké hmotnosti a finančních prostředků, jsme zvolili šířku 9 mm.

20. největší průměr kola d_{ae} :

$$d_{aek} = d_{ak} + 2 \cdot v \cdot m = 82 + 2 \cdot 0,75 \cdot 1 = 83,5 \text{ mm} \quad (\text{A.27})$$

Kde:

v ...součinitel hlavového převýšení šnekového kola, zvoleno $v = 0,75$ dle tabulek



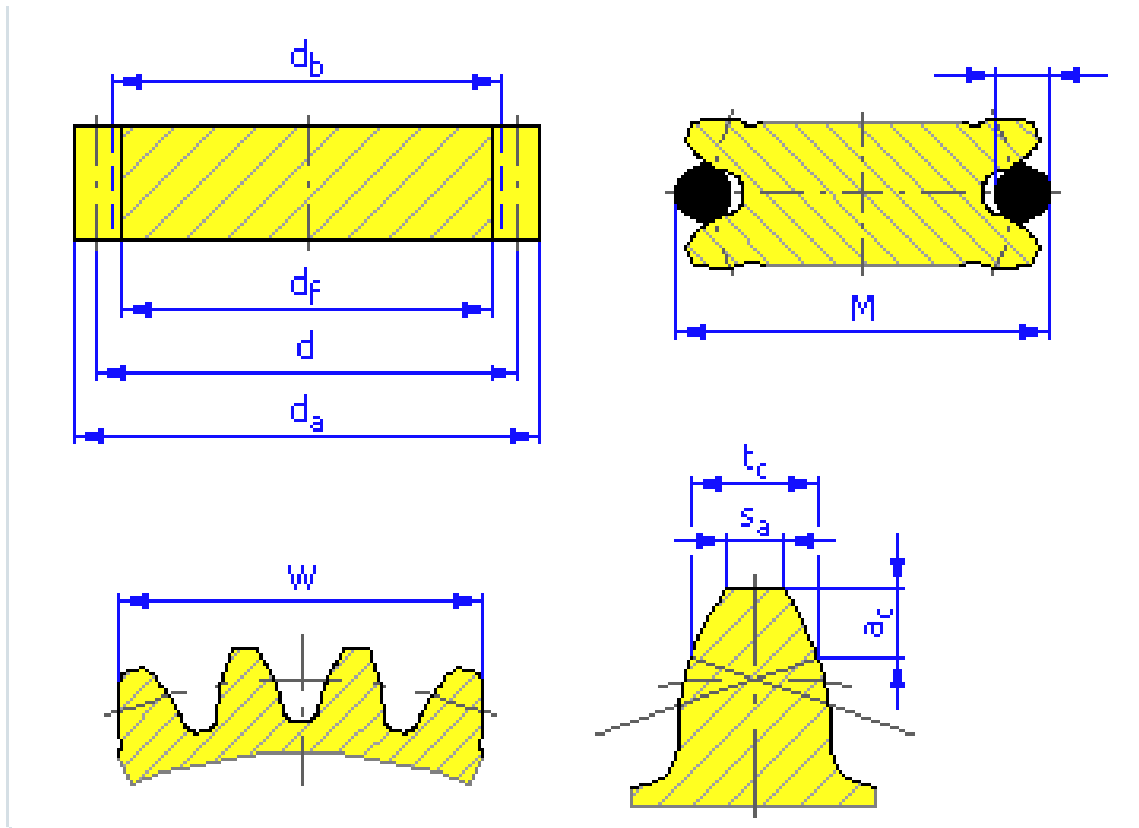
Obrázek A.2: Zadané vstupní hodnoty pro návrh šnekového soukolí

Výsledky		Výsledky	
p_n	3,1355 mm	p_n	3,1355 mm
p_x	3,1416 mm	p_x	3,1416 mm
p_b	2,952 mm	p_b	2,952 mm
γ	3,5763 deg	γ	3,5763 deg
β_b	3,3612 deg	β_b	3,3612 deg
d	16,000 mm	d	80,000 mm
d_f	13,600 mm	d_f	77,600 mm
d_a	18,000 mm	d_a	82,000 mm
d_w	16,000 mm	d_w	80,000 mm
d_b	15,035 mm	d_b	75,175 mm
s	1,568 mm	s	1,568 mm
s_x	1,571 mm	s_x	1,571 mm
b_1	20,000 mm	b_2	9,000 mm
p_z	3,142 mm	d_{ae}	83,000 mm

Obrázek A.3: Vypočítané hodnoty šnekového soukolí programem Autodesk Inventor

Výpočty se shodují s výslednými hodnoty z programu Autodesk Inventor a proto se tyto hodnoty předaly výrobě.

A.2 Parametry čelního ozubeného soukolí



Obrázek A.4: Hlavní parametry čelního ozubeného soukolí

1. Převodový poměr i :

$$i = \frac{z_{k2}}{z_{k1}} = \frac{d_{k2}}{d_{k1}} \quad (\text{A.28})$$

Kde:

i ...převodový poměr (-), zvoleno $i = 4$ kvůli možným odchylkám

z_{k1} ...počet zubů kola 1 (-), zvoleno $z_{k1} = 15$ aby nedocházelo k podřezávání paty zubu

z_{k2} ...počet zubů kola 2 (-), vychází $z_{k2} = 60$ po dosazení do rovnice (A.28)

2. součinitel paty zubu h_f :

$$h_f = h_a + c = 1,25 \quad (\text{A.29})$$

Kde:

h_a ...součinitel výšky hlavy zubu (-), zvoleno $h_a = 1$ dle tabulek

c ...součinitel hlavové vůle (-), $c = 0,25$ dle tabulek

3. modul m :

zvoleno $m = 0,8$ dle tabulek

4. rozteč ozubení p :

$$p = \pi \cdot m = \pi \cdot 0,8 = 2,5133 \text{ mm} \quad (\text{A.30})$$

5. průměr roztečné kružnice d :

$$d_{k1} = z_{k1} \cdot m = 15 \cdot 0,8 = 12 \text{ mm} \quad (\text{A.31})$$

$$d_{k2} = z_{k2} \cdot m = 60 \cdot 0,8 = 48 \text{ mm} \quad (\text{A.32})$$

6. valivý průměr kružnice d_m :

$$d_{wk1} = d_{k1} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = d_{k1} = 12 \text{ mm} \quad (\text{A.33})$$

$$d_{wk2} = d_{k2} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = d_{k2} = 48 \text{ mm} \quad (\text{A.34})$$

Kde:

α ...úhel záběru, uvažujeme stejný valivý úhel $\alpha = \alpha_w$

7. vzdálenost os převodu a_w :

$$a_w = \frac{d_{wk1} \pm d_{wk2}}{2} = \frac{d_{k1} + d_{k2}}{2} = \frac{12 + 48}{2} = 30 \text{ mm} \quad (\text{A.35})$$

8. výška hlavy zubu h_a :

$$h_{ak1} = h_a \cdot m = 1 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ mm} \quad (\text{A.36})$$

$$h_{ak2} = (h_a + x) \cdot m = (1 + 0) \cdot 0,8 = 0,8 \text{ mm} \quad (\text{A.37})$$

Kde:

x ...součinitel posunutí profilu (-), který neuvažujeme

9. výška paty zubu h_f :

$$h_{fk1} = (h_a + c) \cdot m = (1 + 0,25) \cdot 0,8 = 1 \text{ mm} \quad (\text{A.38})$$

$$h_{fk2} = (h_a + c) \cdot m - x \cdot m = (1,25 \cdot 0,8) - (0 \cdot 0,8) = 1 \text{ mm} \quad (\text{A.39})$$

10. průměr základní kružnice d_b :

$$d_{bk1} = d_{k1} \cdot \cos \alpha = 12 \cdot \cos 20 = 4,8 \text{ mm} \quad (\text{A.40})$$

$$d_{bk2} = d_{k2} \cdot \cos \alpha = 48 \cdot \cos 20 = 19,59 \text{ mm} \quad (\text{A.41})$$

11. průměr hlavové kružnice d_a :

$$d_{ak1} = d_{k1} + 2 \cdot h_a \cdot m = 12 + 2 \cdot 1 \cdot 0,8 = 13,6 \text{ mm} \quad (\text{A.42})$$

$$d_{ak2} = d_{k2} + 2 \cdot h_a \cdot m = 48 + 2 \cdot 1 \cdot 0,8 = 49,6 \text{ mm} \quad (\text{A.43})$$

12. průměr hlavové kružnice d_f :

$$d_{fk1} = d_{k1} - 2 \cdot (h_a + c) \cdot m = 12 - 2 \cdot (1 + 0,25) \cdot 0,8 = 10 \text{ mm} \quad (\text{A.44})$$

$$d_{fk2} = d_{k2} - 2 \cdot (h_a + c) \cdot m = 48 - 2 \cdot (1 + 0,25) \cdot 0,8 = 46 \text{ mm} \quad (\text{A.45})$$

13. tloušťka zubů a šířka mezer roztečné kružnice s :

$$s_{k1} = \frac{\pi \cdot m}{2} = \frac{\pi \cdot 0,8}{2} = 1,256 \text{ mm} \quad (\text{A.46})$$

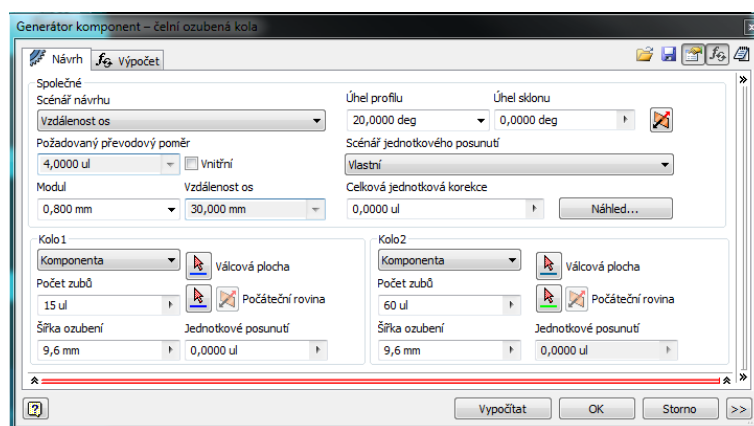
$$s_{k2} = \frac{\pi \cdot m}{2} = \frac{\pi \cdot 0,8}{2} = 1,256 \text{ mm} \quad (\text{A.47})$$

14. šířka zubu b :

$$b_{k1} = \psi \cdot m = 12 \cdot 0,8 = 9,6 \text{ mm} \quad (\text{A.48})$$

$$b_{k2} = \psi \cdot m = 12 \cdot 0,8 = 9,6 \text{ mm} \quad (\text{A.49})$$

ψ se volí nejčastěji mezi hodnotou 10 až 15 dle tabulek, zvoleno $\psi = 12$



Obrázek A.5: Zadané vstupní hodnoty pro návrh čelního ozubeného soukolí

Výsledky		Výsledky	
P_{tb}	2,362 mm	P_{tb}	2,362 mm
p	2,513 mm	p	2,513 mm
P_t	2,513 mm	P_t	2,513 mm
a	30,000 mm	a	30,000 mm
α_t	20,0000 deg	α_t	20,0000 deg
α_w	20,0000 deg	α_w	20,0000 deg
α_{tw}	20,0000 deg	α_{tw}	20,0000 deg
d	12,000 mm	d	48,000 mm
d_b	11,276 mm	d_b	45,105 mm
d_f	10,000 mm	d_f	46,000 mm
d_a	13,600 mm	d_a	49,600 mm
W	3,711 mm	W	16,023 mm
z_w	2,000 ul	z_w	7,000 ul
M	14,206 mm	M	50,360 mm
t_c	1,110 mm	t_c	1,110 mm

Obrázek A.6: Vypočítané hodnoty čelního soukolí programem Autodesk Inventor

Výpočty se shodují s výslednými hodnoty z programu Autodesk Inventor a proto se tyto hodnoty předaly výrobě.

Příloha B

Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy zdrojové kódy.

- Assembly: Layout DPS
- Bill of material: Cenové nabídky objednaného materiálu
- Documentation: Elektronická verze diplomové práce
- Electrical design: Schéma zapojení, návrhy DPS, simulace
- Fabrication outputs: 3D modely pro tisk
- Mechanical design: Výkresová dokumentace a 3D modely
- Photo: Fotografie konstrukce
- Software: Navigační program a strojový kód pro RAMPS