

Politechnika Warszawska
Wydział Mechatroniki

MUM - Miniaturyzacja Urządzeń Mechatroniki

Projekt: Montaż paralaktyczny teleskopu do nadążnych obserwacji
astronomicznych

Autorzy:

Estera Pawlikowska

Filip Łabaj

Michał Wincel

Bartosz Mirecki

Warszawa 2020

Spis treści

1. Wstęp
2. Podstawy teoretyczne
3. Założenia projektu
4. Realizacja
 - a. Mechanika
 - b. Elektronika
 - c. Oprogramowanie
5. Podsumowanie
6. Bibliografia

1. Wstęp

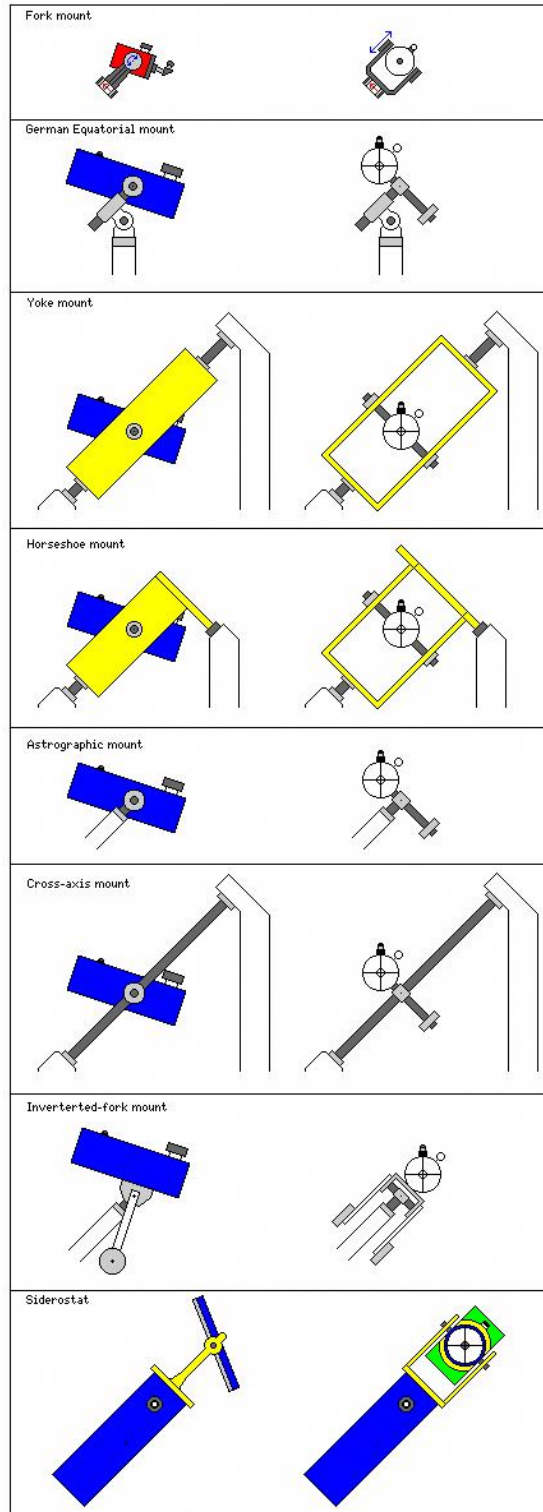
Celem projektu było zaprojektowanie i realizacja montażu równikowego teleskopu mogącego realizować nadążne śledzenie obiektów astronomicznych. Montaż miał być w dużym stopniu autonomiczny, pozwalając na zdalne zaprogramowanie i przeprowadzenie samodzielnych obserwacji wybranego obiektu.

Projekt został zrealizowany jedynie w części projektowej, z uwagi na zmianę trybu realizacji przedmiotów na Politechnice Warszawskiej w semestrze letnim 2020.

2. Podstawy teoretyczne

a. Montaż paralaktyczne

Paralaktyczne montaż teleskopowe są powszechnie wykorzystywane w astronomii z uwagi na możliwość kompensacji ruchu ziemi, a tym samym wydłużenia możliwych czasów naświetlania.



Rys. 1: Różne rodzaje montaży teleskopowych

b. Montaż paralaktyczny niemiecki

Niemiecka odmiana montażu paralaktycznego została wynaleziona przez Josepha von Fraunhofera. Składa się z struktury T-kształtnej, gdzie niższa oś jest osią rektascensji (RA), wyższa oś osią deklinacji (DEK). Struktura jest ustawiona pod kątem odpowiadającym szerokości geograficznej obserwatora za pomocą ruchomego mechanizmu elewacji lub nieruchomych elementów kątowych.

c. Obserwacje nadążne

Obserwacje nadążne kompensują wpływ ruchu obrotowego ziemi pozwalając np. na znaczące wydłużenie czasów naświetlania w przypadku rejestracji analogowej lub cyfrowej.

d. Metody kalibracji

Kalibracja montażu teleskopu może odbywać się na różne sposoby. W projekcie rozważane było zastosowanie kalibracji automatycznej, z wykorzystaniem enkoderów absolutnych oraz kalibracja "trzy punktowa" realizowana przez użytkownika.

Kalibracja automatyczna w założeniu funkcjonowałaby ścztując położenie bieguna geograficznego ziemi z kompasu elektronicznego/GPS lub bieguna magnetycznego (wówczas konieczna byłaby korekta z uwagi na różnicę w położeniu obu biegunów). Następnie wykorzystując enkodery absolutne informujące o położeniu wszystkich osi teleskop zostałby przestawiony w żadaną pozycję.

Kalibracja trzy punktowa polegałaby na wycelowaniu teleskopu w trzy gwiazdy na nieboskłonie przez użytkownika, przy każdorazowym ścztaniu pozycji. Następnie wykorzystując mapę nieboskłonu i triangulację między trzema wyznaczonymi punktami położenie teleskopu zostałoby jednoznacznie wyznaczone.

Na Rys. 2 przedstawiono oznaczenie poszczególnych osi w teleskopie o montażu paralaktycznym.

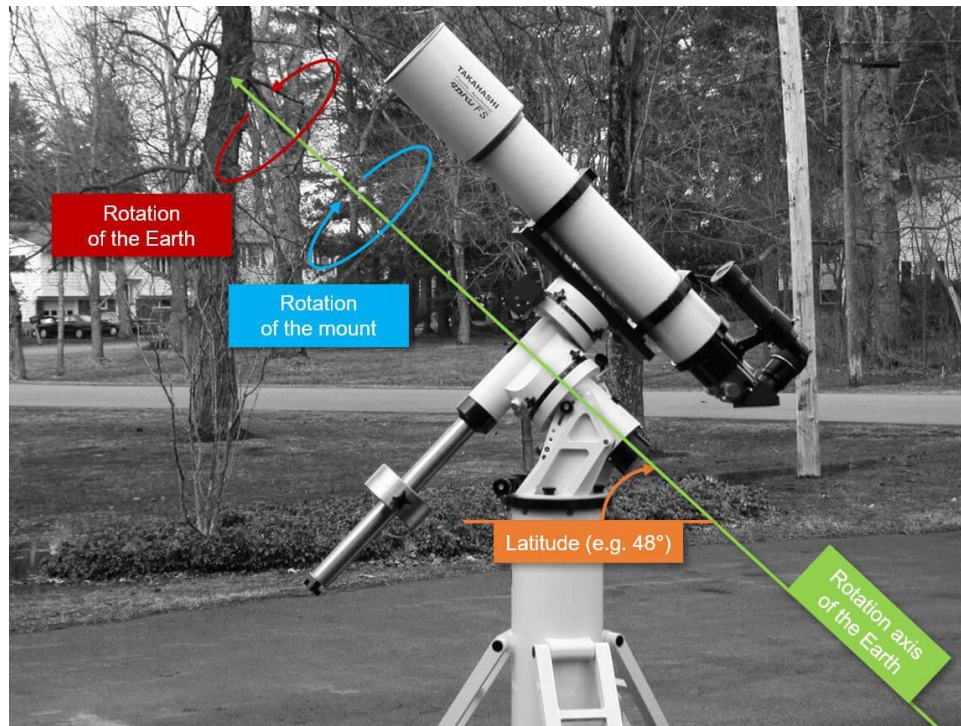


Rys. 2: Osie w teleskopie o montażu paralaktycznym.

Latitude - szerokość geograficzna,

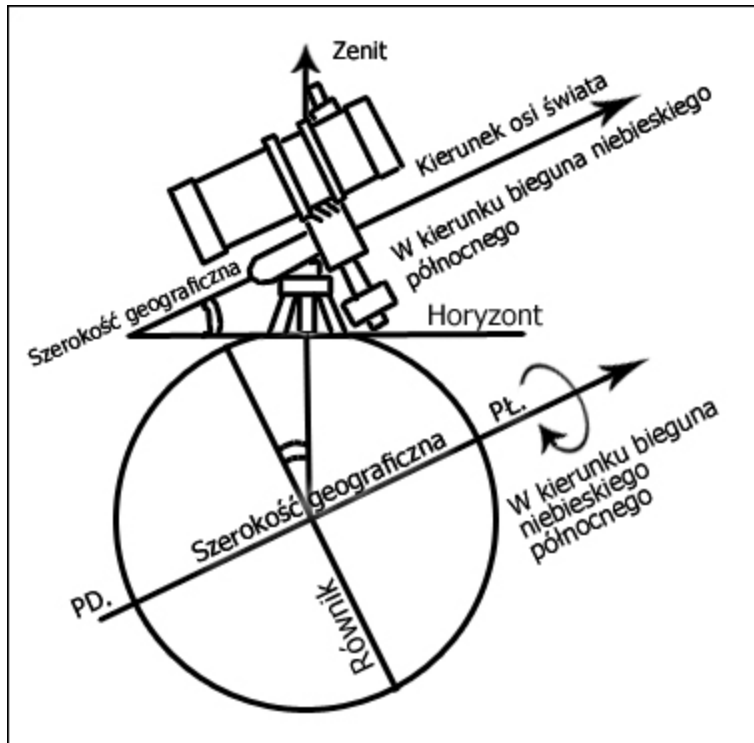
Polar Axis - oś biegunowa;

Declination Axis - oś deklinacji



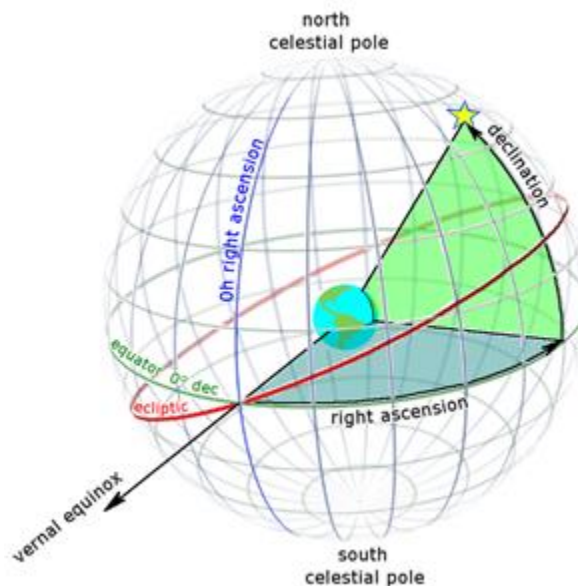
Rys. 3: Przedstawienie relacji poszczególnych osi do warunków obserwacji

Kąt szerokości ustawiamy na zgodny z naszą szerokością geograficzną oraz kątem pochylenia teleskopu. Na Rys. 4 przedstawiono jakie ma znaczenie prawidłowe ustawienie tego kąta.



Rys. 4: Przedstawienie znaczenia nastawienia kąta szerokości

Oś deklinacji ustawiamy na wartość równą pozycji na nieboskłonie naszej obserwowanej gwiazdy. Na Rys. 5 przedstawiono zobrazowanie znaczenia ustawienia kąta deklinacji. Dzięki ustawieniu tych dwóch omówionych parametrów nasz teleskop jest nakierowany na wybrany przez nas punkt – obiekt astronomiczny. Niemniej jednak ze względu na ciągły obrót kuli ziemskiej wokół własnej osi obserwujemy pozorny ruch gwiazd na niebie. Należy stosować w takim wypadku korekcję nadążną, by móc zastosować m.in. długą ekspozycję do zdjęć.



Rys. 5: Przedstawienie znaczenia nastawienia rektascensji i deklinacji

Do w pełni prawidłowego ustawienia teleskopu trzeba ustawić oś biegunową. Możemy ją ustawić zgodnie z wynikiem sumy:

$$LHA_{object} = GST + \lambda_{observer} - \alpha_{object}$$

gdzie:

LHA_{object} – lokalny kąt godzinny

GST – Czas gwiazdowy Greenwich

λ – długość geograficzna obserwatora

α – Rektascensja poszukiwanego obiektu na nieboskłonie

W praktyce błędne ustawienie osi rektascensji teleskopu wpływa jedynie na to, że obraz będzie obrócony o pewien kąt. Niemniej kompensując obrót ziemi względem własnej osi obraz w obiektywie będzie nieruchomy.

Należy nadmienić: powyższy opis teoretyczny skupia się na prostym wytłumaczeniu zjawisk zachodzących podczas ruchu naszej planety bez zagłębiania się w szczegółowe zagadnienia i problemy jak różnica pomiędzy dobą słoneczną, a dobą gwiazdną albo nieliniowość czasu gwiazdnego. Takie podejście wynika z tego, że byłby potrzebny bardzo obszerny opis tych zjawisk, a i tak algorytm programu nie będzie ich brał pod uwagę ze względu na bardzo trudną implementację – przykładowo: doba gwiazdna trwa 23h i 56 minut albo wpływ zmian położenia naszej planety w układzie słonecznym. Uznano, że błędy są pomijalnie małe oraz głównym celem jest obserwacja odległych gwiazd, a nie np. Marsa.

3. Założenia projektu

W poniższej tabeli przedstawiony został podział urządzenia na moduły i ich założenia.

Mechanika	-	Założenia
	Moduł elewacji	<ul style="list-style-type: none"> • Zakres kątowy ruchu 0° - 90° względem poziomu • Dokładność położenia kątowego 0,5° • Zapewnienie możliwości montażu całego urządzenia do standardowych głowic statywowych • Zapewnienie stabilności montażu
	Moduł DEK	<ul style="list-style-type: none"> • Dokładność przesuwu 1'

		<ul style="list-style-type: none"> • Zakres kątowy ruchu: 360° • Możliwość mocowania przeciwwagi • Uniwersalne mocowanie do teleskopu • Maksymalne wykorzystanie części handlowych • Wykorzystanie przekładni pasowej w celu ograniczenia kosztów
	Moduł RET	<ul style="list-style-type: none"> • Prędkość obrotu wału dostosowana do prędkości obrotu Ziemi • Dokładność przesuwu 1' • Zakres kątowy ruchu: 360° • Uniwersalne mocowanie do statywu lub modułu elewacji • Maksymalne wykorzystanie części handlowych • Wykorzystanie przekładni pasowej w celu ograniczenia kosztów
Elektronika	-	-
	-	<ul style="list-style-type: none"> • Umożliwienie ciągłego sterowania silnikami i odczytywania położenia z ich enkoderów • źródło zasilania pozwalające na uzyskanie odpowiednich prądów i napięcia • napięcie bezpieczne • temperatura pracy: od -10 st. C do 30 st. C • łączna waga do 0.5 kg • możliwość uzyskania prądów rozładowywania do 8A • małe wymiary (łączna powierzchnia mniejsza niż 200 cm²) • komunikacja z pulpitem użytkownika

Oprogramowanie	-	-
	-	<ul style="list-style-type: none"> • Realizacja kalibracji i ruchu nadążnego dla parametrów i wymagań zadawanych przez użytkownika

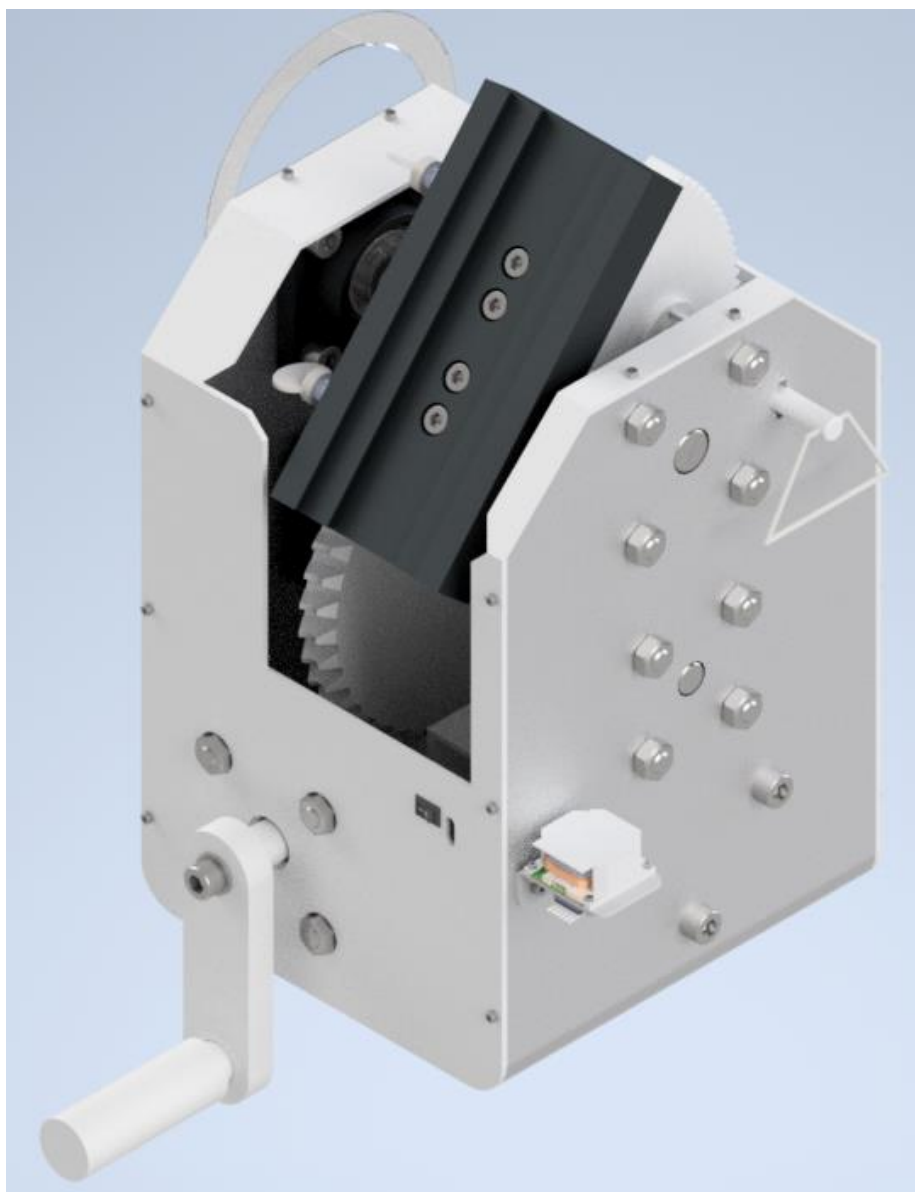
4. Realizacja

a. Mechanika

Moduł elewacji

Moduł elewacji pozwala na nastawienie kąta elewacji montażu paralaktycznego.

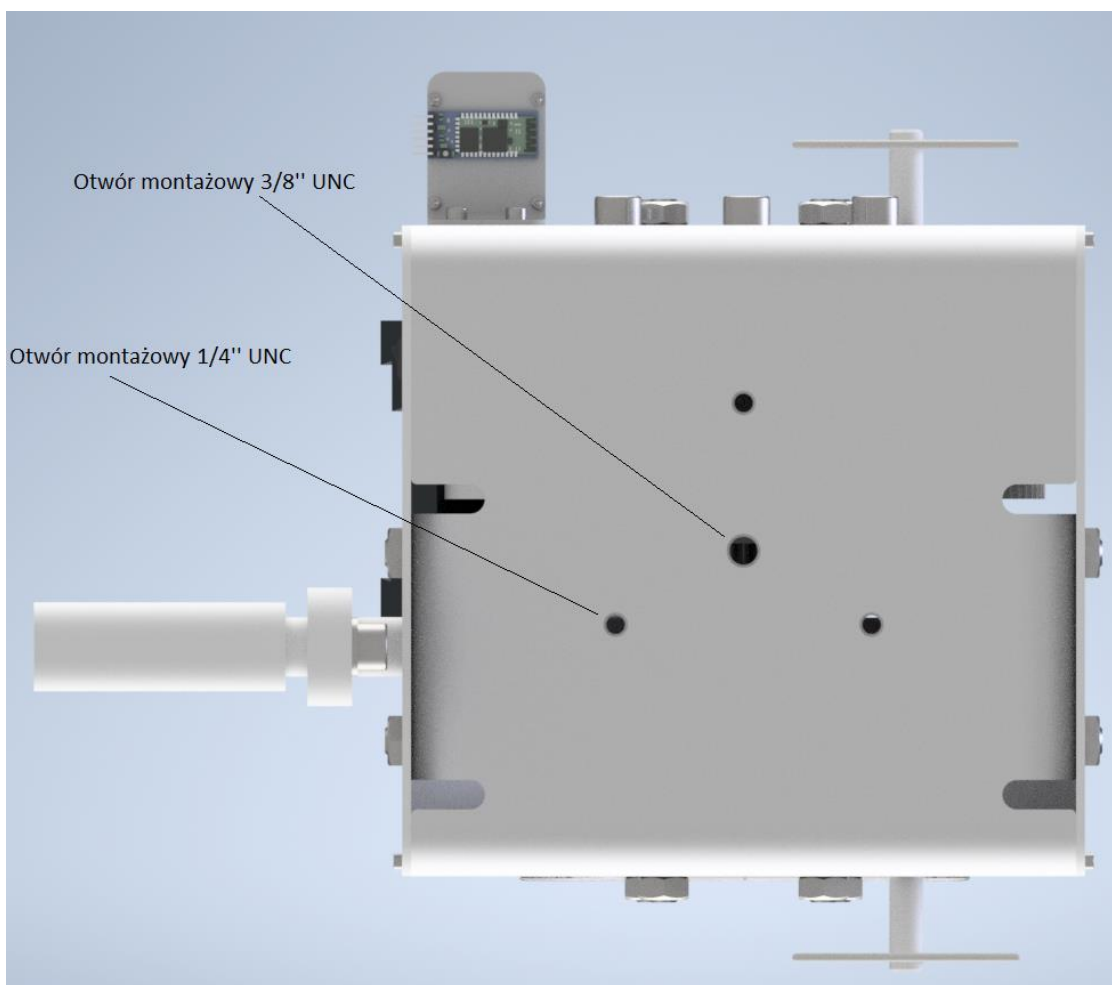
Moduł składa się z trzech głównych podzespołów – mechanizmu elewacji **1**, obudowy **2** i montażu elektroniki **3**. Model 3D modułu został przedstawiony na Rys. 6.



Rys. 6: Model 3D modułu elewacji

W przedstawionej wersji za indikator położenia kątownego służy ekierka **4** dociskana nakrętkami do bocznej ściany obudowy.

Moduł posiada możliwość montażu na standardowych głowicach statywowych 3/8" i 1/4".



Rys. 7: Widok modułu elewacji od spodu przedstawiający otwory montażowe

Cały moduł elewacji wraz z podzespołami i detalami został opisany szczegółowo na rysunkach oznaczonych MPT-03-xx-xx, załączonych do dokumentacji.

a) Mechanizm elewacji

Założenia:

- Zakres kątowy:

Wymagany zakres obrotu powinien zawierać się w przedziale $0^\circ - 90^\circ$ (przyjmując 0° na linii horyzontu).

- Rozdzielczość kątowa:

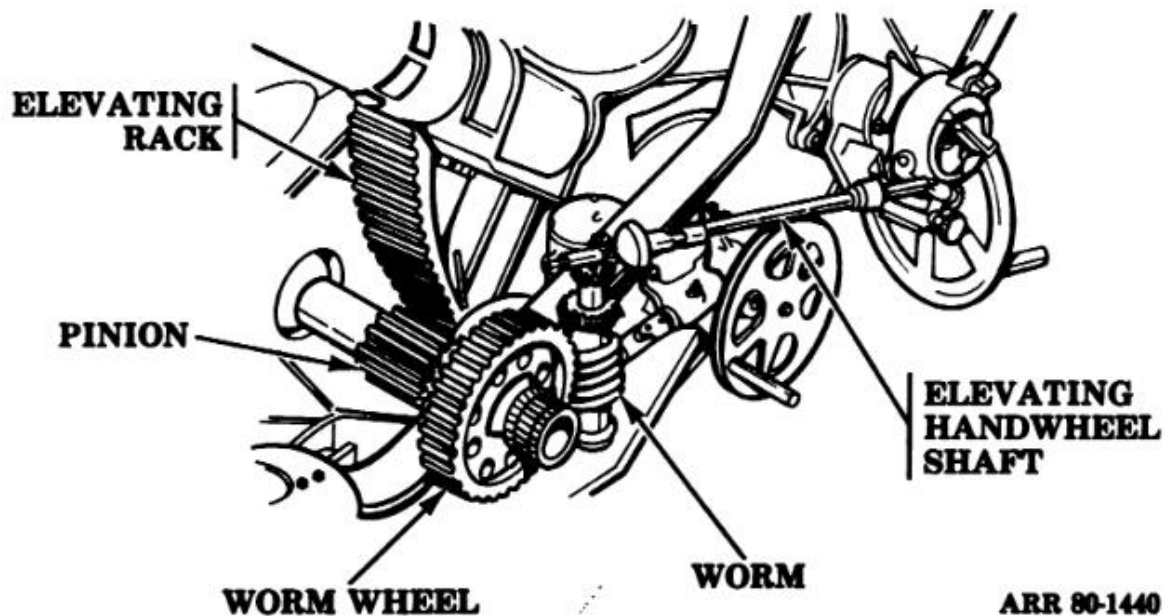
Mechanizm powinien zapewnić możliwość nastawy kąta z rozdzielczością $0,5^\circ$ lub mniejszą w całym zakresie obrotu

- Dodatkowe wymagania:

Mechanizm powinien utrzymywać nastawioną pozycję przy obciążeniu wszystkimi pozostałymi modułami i elementami urządzenia oraz teleskopem.

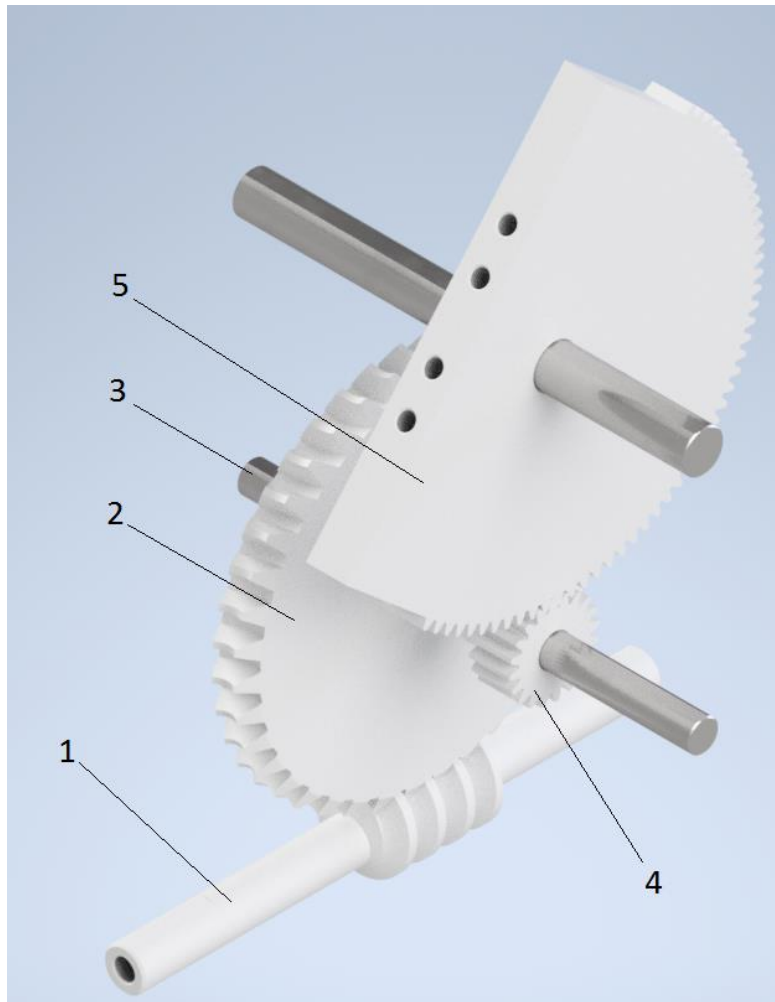
Realizacja

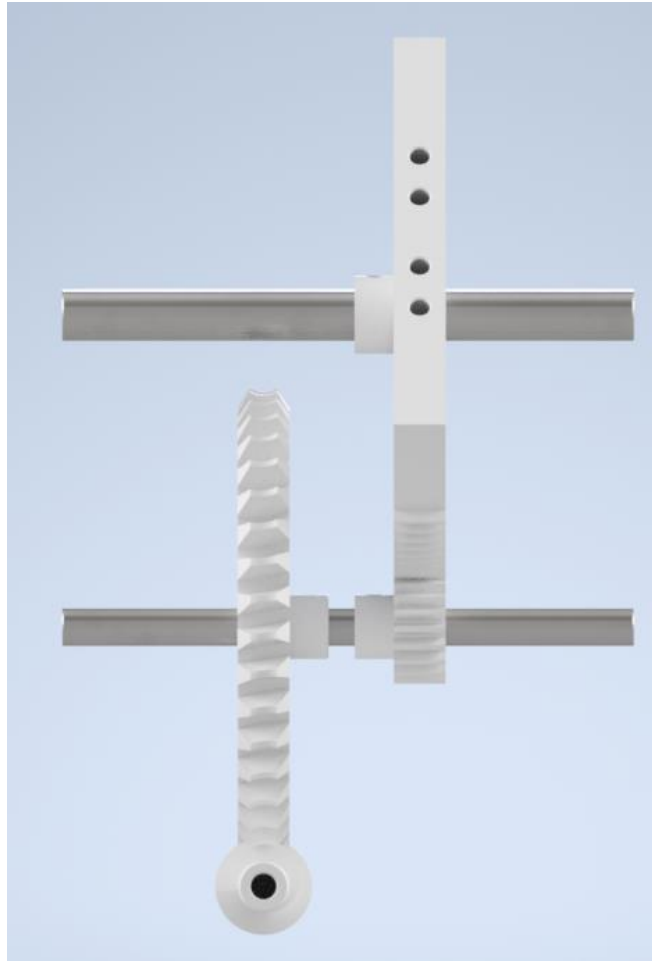
Mechanizm elewacji został oparty na rozwiązaniu stosowanym w niektórych działach artyleryjskich (np. haubica 2A18 (D-30) [1]) wykorzystującym translację mechaniczną ruchu z wykorzystaniem ślimaka i ślimacznicy. Na Rys. 8 przedstawiony został schemat takiego układu.



Rys. 8: Schemat mechanizmu elewacji [2]

Model 3D zaprojektowanego mechanizmu został przedstawiony na Rys. 9.





Rys. 9: Model 3D mechanizmu elewacji

Ruch obrotowy ślimaka **1** wprowadzany z wykorzystaniem korby przymocowanej do jego wału przez użytkownika, jest przekazywany za pomocą ślimacznicy **2** na wał **3** a następnie, z wykorzystaniem zamontowanego na wale koła zębatego **4** na półkole zębate **5** do którego przymocowane są wyższe moduły montażu.

Poszczególne elementy mechanizmu zostały zaprojektowane z wykorzystaniem środowiska Design Accelerator:

Ślimak (*worm*) i ślimacznica (*worm gear*):

Design **Calculation**

Common

Desired Gear Ratio: 39.0000 ul

Tan. Module: 4.500 mm

Tan. Pressure Angle: 20.0000 deg

Helix Angle: 9.0193 deg

Preview... Center Distance

Worm

Component: Cylindrical Face

Number of Threads: 1.00000000 ul

Start plane

Worm Length: 60.000 mm

Pitch Diameter: 28.350 mm

Diameter Factor: 6.3000 ul

Worm gear

Component: Cylindrical Face

Number of Teeth: 39.00000000 ul

Start plane

Facewidth: 20.00000000 mm

Unit Correction: -0.4278 ul

Design **Calculation**

Method of Strength Calculation: Legacy ANSI

Loads

Driving Part: ☒ Worm ☐ Worm gear

Power: P 0.100 kW 0.075 kW

Speed: n 1000.00 rpm 25.64 rpm

Torque: T 0.955 N m 28.096 N m

Efficiency: ☐ η 0.754 ul

Material Values

Worm: ☐ User material

Worm gear: ☐ User material

Bending Fatigue Strength: S_n 165.0 MPa

Contact Fatigue Strength: K_w 0.6 MPa

Modulus of Elasticity: E 206700 MPa 206000 MPa

Poisson's Ratio: μ 0.270 ul 0.300 ul

Worm Material Coefficient: k_{mat} 1.000 ul

Required Life: L_h 10000 hr

Factors Accuracy

Results

F_r	135.930 N
F_n	356.093 N
v_k	1.503 mps
Worm	
F_t	77.953 N
F_a	320.186 N
Worm gear	
F_t	320.186 N
F_a	77.953 N
F_d	388.750 N
F_w	2186.091 N
F_s	5831.581 N

Koło zębate i półkoło zębate:

Design
 Calculation

Method of Strength Calculation

ISO 6336:1996

Loads

	Gear 1	Gear 2
Power	P 1.000 kW	0.980 kW
Speed	n 1000.00 rpm	200.00 rpm
Torque	T 9.549 N m	46.792 N m
Efficiency	η 0.980 ul	

Material Values

Gear 1	<input type="checkbox"/> User material	...
Gear 2	<input type="checkbox"/> User material	...

Bending Fatigue Limit	σ_{Flim}	352.0 MPa	352.0 MPa
Contact Fatigue Limit	σ_{Hlim}	1140.0 MPa	1140.0 MPa
Modulus of Elasticity	E	206000 MPa	206000 MPa
Poisson's Ratio	μ	0.300 ul	0.300 ul
Heat Treatment		2 ul	2 ul

Required Life

L_h 10000 hr

Factors

Accuracy

Results

F_t	477.465 N
F_r	173.783 N
F_a	0.000 N
F_n	508.107 N
v	2.094 mps
n_{E1}	30101.878 rpm
Gear 1	
S_H	1.482 ul
S_F	4.027 ul
S_{Hst}	1.343 ul
S_{Fst}	8.342 ul
Gear 2	
S_H	1.617 ul
S_F	4.533 ul
S_{Hst}	1.466 ul
S_{Fst}	9.183 ul

Rys. 10: Założenia i obliczenia do przekładni ślimak-ślimacznicza i do przekładni koło zębate - półkoła zębate

Obrót korby o 360 stopni powoduje równoważny obrót ślimaka o 360 stopni co z kolei powoduje obrót ślimacznicy o 1 ząb, czyli 9,23 stopnia. Obrót połączonego do tego samego wału koła zębatego powoduje obrót zazębianego z nim półkola zębatego o 1,85 stopnia. Zakładając odpowiednie pasowania poszczególnych elementów mechanizmu, osiągalna rozdzielczość obrotu korby to około 5 stopni, a więc 0,025 stopnia obrotu półkola zębatego - elewacji. Tym samym założenie rozdzielczości modułu elewacji <0,5 stopnia zostało spełnione.

Zarówno wał ślimaka, wał półkola zębatego jak i wał **3** są łożyskowane odpowiednio w łożyskach skośnych kulkowych F4BSS 20M-YTPSS i FY 15 FM [3]. Otwory montażowe obudów łożysk pozwalają na prosty montaż i demontaż do obudowy modułu elewacji.

Wybrane łożyska zapewniają odpowiednio 6,5 i 4,75 kN maksymalnego obciążenia statycznego co wystarcza dla obciążeń rzędu setek niutonów występujących w układzie.



Rys. 11: Łożysko SKF FY 15 FM

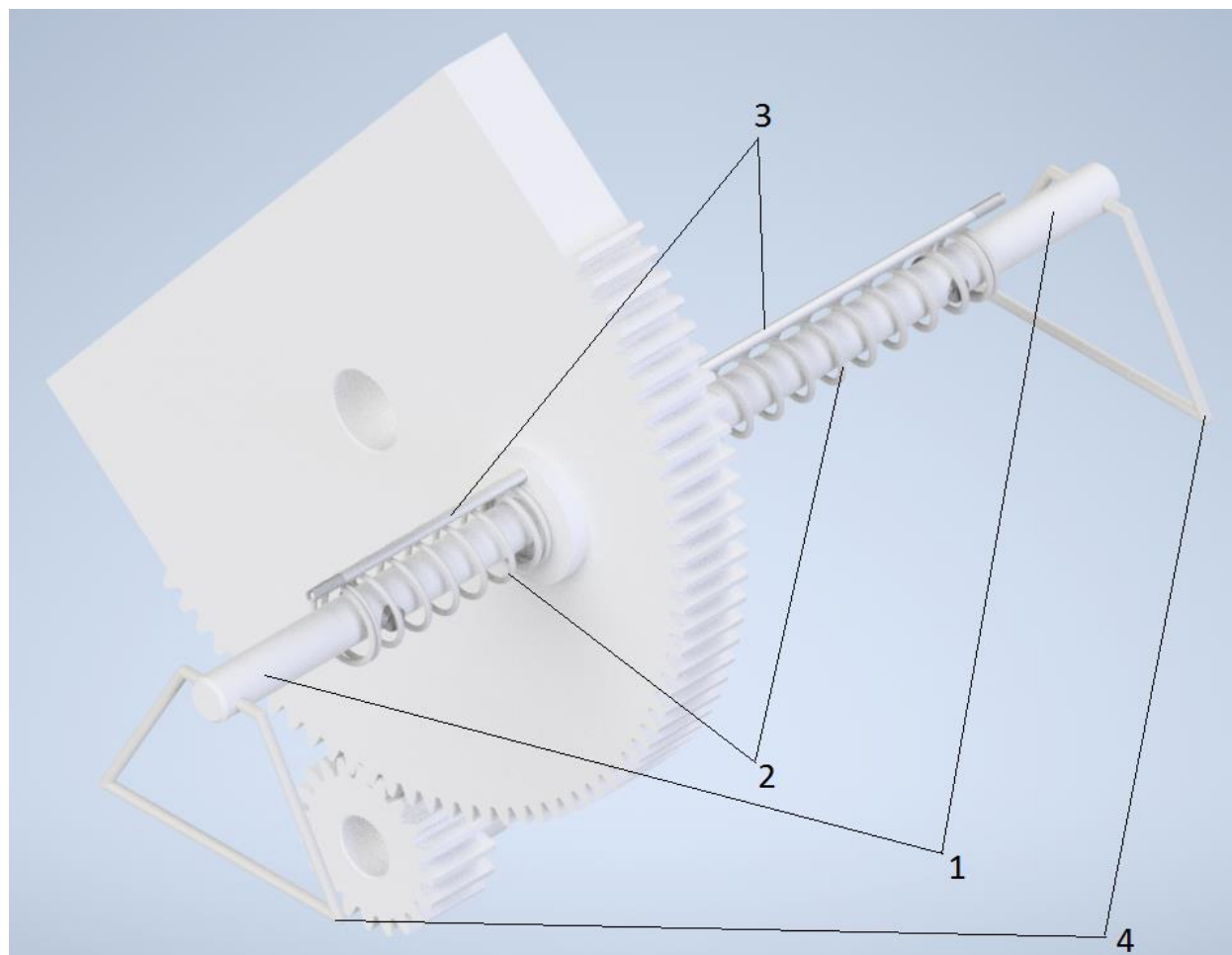


Rys. 12: Łożysko SKF F4BSS 20M-YTPSS

Zaprojektowane elementy mechanizmu zostały zaplanowane jako wykonane z żywicy ceramicznej z wykorzystaniem drukarki SLA. Pozwala to na rezygnację z bardziej tradycyjnych

metod obróbki skrawaniem, przy zachowaniu części z parametrów mechanicznych. Wały zostały zaplanowane jako wykonane z prętów stalowych z C55. Wymagają obróbki polegającej na "ścięciu" kawałka powierzchni bocznej pod elementy montażowe w łożyskach i kołach/ślimacznicy - obróbka ta jest możliwa do realizacji np. pilnikiem, ręcznym lub automatycznym przed hartowaniem C55.

Dodatkowo zaprojektowany został mechanizm kontruający moment wytwarzany przez ciężar modułów montowanych na półkolu zębatym. Model mechanizmu hamującego został przedstawiony na Rys. 10.



Rys. 13: Model 3D mechanizmu hamującego elewacji

Szczęki mechanizmu **1** mocowane w obudowie elewacji są dociskane sprężynami **2** opartymi na powierzchni obudowy. Wałki prowadzące **3** osadzone w otworach gwintowanych w obudowie zabierają stopnie swobody szczękom minimalizując ryzyko wyboczenia. Uchwyty **4** służą do kontroli docisku i montażu/demontażu.

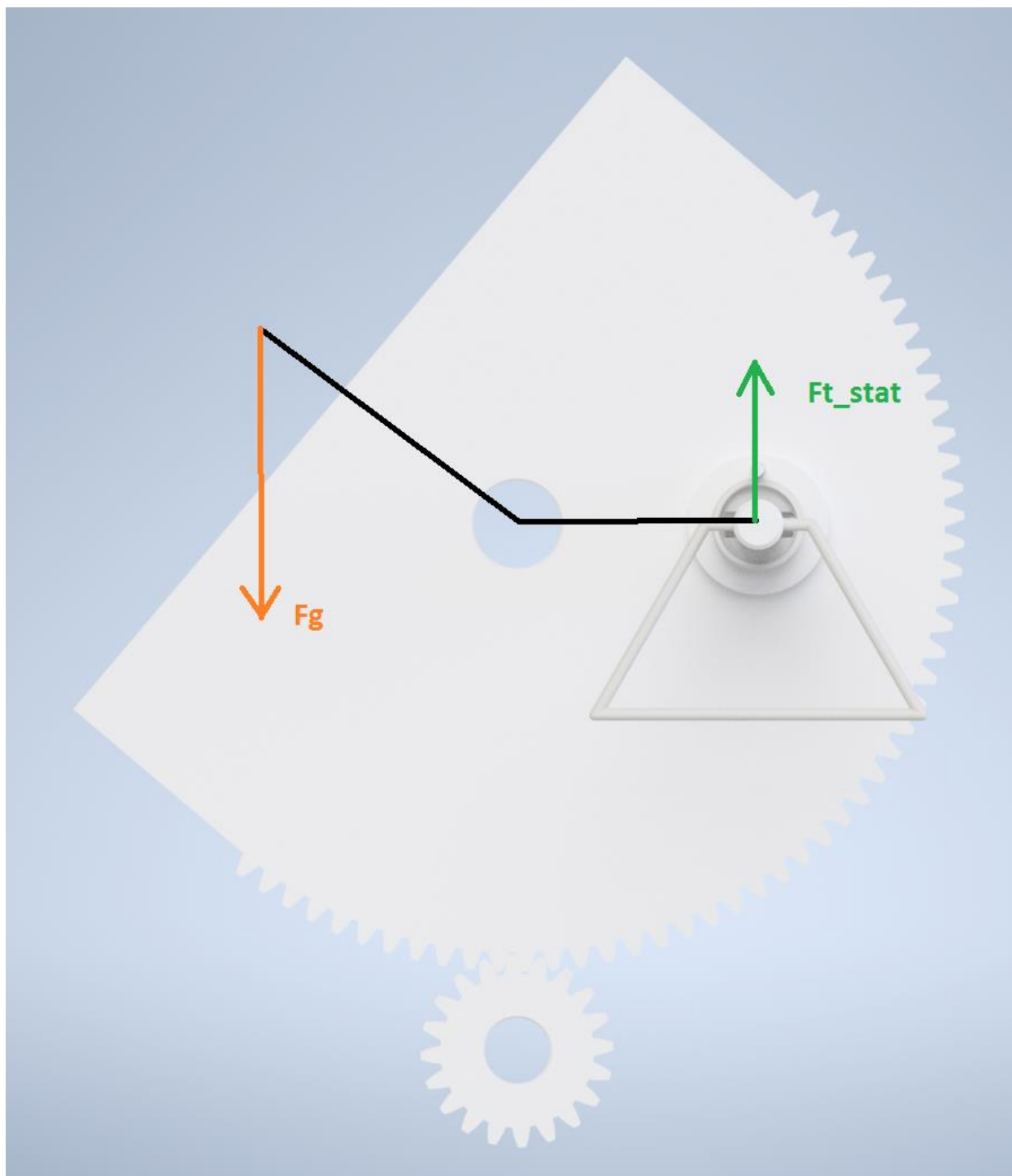
Na końcach szczęk dodane zostały otwory pod przyklejenie wkładek z tworzywa o dużym współczynniku tarcia [4]:



Rys. 14: Przykładowa podkładka tarciowa firmy Montalvo

Siła od dwóch sprężyn naciskowych dociska wkładki do powierzchni koła zębatego co powoduje moment tarcia i kontruje moment powstający przez obciążenie koła pod dużymi kątami.

Na Rys. 11 przedstawiony został schemat sił w układzie w położeniu elewacji pod kątem 45° .



Rys. 15: Schemat sił w mechanizmie elewacji. F_g - siła przyciągania masy modułów wyższych montowanych na półkolu. F_{t_stat} - siła tarcia statycznego kontruująca F_g .

Z wykorzystaniem środowiska Design Accelerator zostały sprężyny **1** i **2** o następujących parametrach:

Sprężyna 1:

Design

Calculation

Axis

Start Plane

Installed Length

Custom Length

57.5 mm

Coil Direction

right

Spring Wire

Wire Diameter

d

1.600 mm

Spring Start

Closed End Coils

n_{z1}

1.5 ul

Transition Coils

n_{t1}

1 ul

Ground Coils

z_{o1}

0.75 ul

Spring End

Closed End Coils

n_{z2}

1 ul

Transition Coils

n_{t2}

0.75 ul

Ground Coils

z_{o2}

0.5 ul

Spring Length

Length Inputs

$L_0, n \rightarrow t$

Loose Spring Length

L_0

82.784 mm

Pitch

t

11.312 mm

Active Coils

n

7.000 ul

Spring Diameter

Diameter

Inner

D_2

18 mm

Design

Calculation

Spring Strength Calculation

Compression Spring Design

Calculation Options

Design Type

F_8, D , Assembly Dimensions $\rightarrow d, L_0, n, F_1$

Method of Stress Curvature Correction

No Correction

Design of Assembly Dimensions

Design of All Assembly Dimensions L_1, L_8, H

Load

Min. Load

F_1

3.397 N

Max. Load

F_8

40 N

Working Load

F

35.000 N

Dimensions

Wire Diameter

d

1.600 mm

Inside Diameter

D_2

18 mm

Loose Spring Length

L_0

82.784 mm

Spring Coils

Rounding of Coil Number

1

Active Coils

n

7.000 ul

Spring Material

☒ Steel Wire, Class 1

Ultimate Tensile Stress

σ_{ult}

2305.000 MPa

Allowable Torsional Stress

τ_A

1152.500 MPa

Modulus of Elasticity in Shear

G

78500.000 MPa

Density

ρ

7860 kg/m³

Utilization Factor of Material

us

0.900 ul

☒ Check of Buckling

Spring Type

Guided mounting - parallel ground ends

☐ Fatigue Loading

Nonshot-peened spring

Spring Life in Thousands of Deflections

N

> 10000

Safety Factor

k_F

1.200 ul

Assembly Dimensions

$L_1, L_8 \rightarrow H$

Min. Load Length

L_1

80.000 mm

Max. Load Length

L_8

50.000 mm

Working Stroke

H

30.000 mm

Working Load Length

L_w

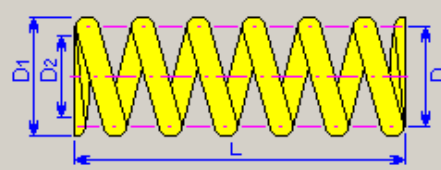
54.098 mm

Results

a	9.712 mm
t	11.312 mm
K_w	1.000 ul
k	1.220 N/mm
s_1	2.784 mm
s_8	32.784 mm
s_9	67.984 mm
s_{work}	0.396 ul
s_{max}	0.578 ul
L_{minf}	17.944 mm
L_9	14.800 mm
F_9	82.947 N
τ_1	41.396 MPa
τ_8	487.412 MPa
τ_9	1010.738 MPa
v	14.897 mps
f	211.611 Hz
W_8	0.656 J
l	595.840 mm
m	0.009 kg

Sprężyna 2:

Design **f_g Calculation**



Placement

Axis ☐ Start Plane ☒

Installed Length

Custom Length

Coil Direction

Spring Wire

Wire Diameter

Spring Start

Closed End Coils

Transition Coils

Ground Coils

Spring End

Closed End Coils

Transition Coils

Ground Coils

Spring Length

Length Inputs

Loose Spring Length

Pitch

Active Coils

Spring Diameter

Diameter

Design **f_g Calculation**

Spring Strength Calculation

Calculation Options

Design Type

Method of Stress Curvature Correction

Design of Assembly Dimensions

Load

Min. Load

Max. Load

Working Load

Dimensions

Wire Diameter

Inside Diameter

Loose Spring Length

Spring Coils

Rounding of Coil Number

Active Coils

Spring Material

☒ Steel Wire, Class 1

Ultimate Tensile Stress

Allowable Torsional Stress

Modulus of Elasticity in Shear

Density

Utilization Factor of Material

☒ Check of Buckling

Spring Type

☐ Fatigue Loading

Nonshot-peened spring

Spring Life in Thousands of Deflections

Safety Factor

Assembly Dimensions

Min. Load Length

Max. Load Length

Working Stroke

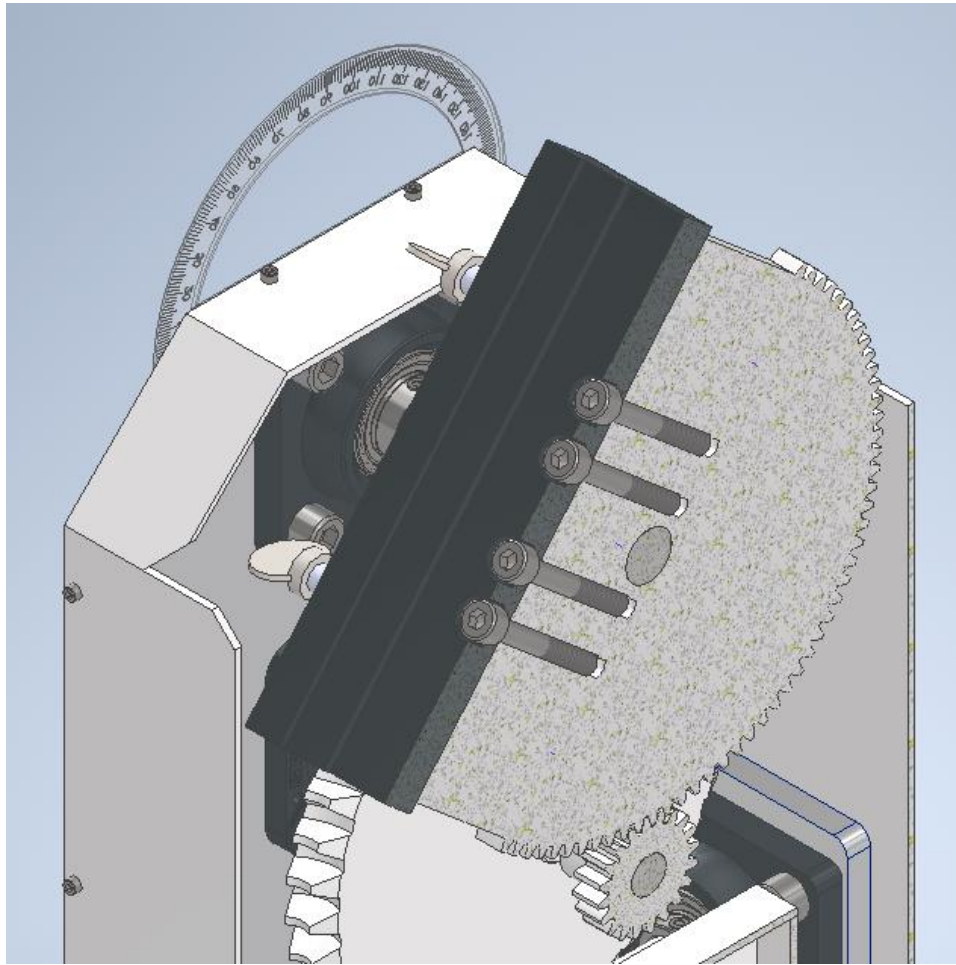
Working Load Length

Results

a	8.037 mm
t	9.837 mm
K _w	1.000 ul
k	1.810 N/mm
s ₁	2.095 mm
s _g	22.095 mm
s _g	96.445 mm
s _{work}	0.181 ul
s _{max}	0.231 ul
L _{minf}	30.965 mm
L _g	25.650 mm
F _g	174.599 N
τ ₁	27.825 MPa
τ _g	293.421 MPa
τ _g	1280.777 MPa
v	28.107 mps
f	189.017 Hz
W _g	0.442 J
l	779.520 mm
m	0.016 kg

Rys. 16: Parametry zadane (pola białe) i wyznaczone (pola szare i Results) w środowisku Design Accelerator

Montaż wyższych modułów montażu jest realizowany poprzez standardowy adapter szyny typu jaskółczy ogon (*dovetail*), połączony z kołem śrubami M9x50 w sposób przedstawiony na Rys. 13.



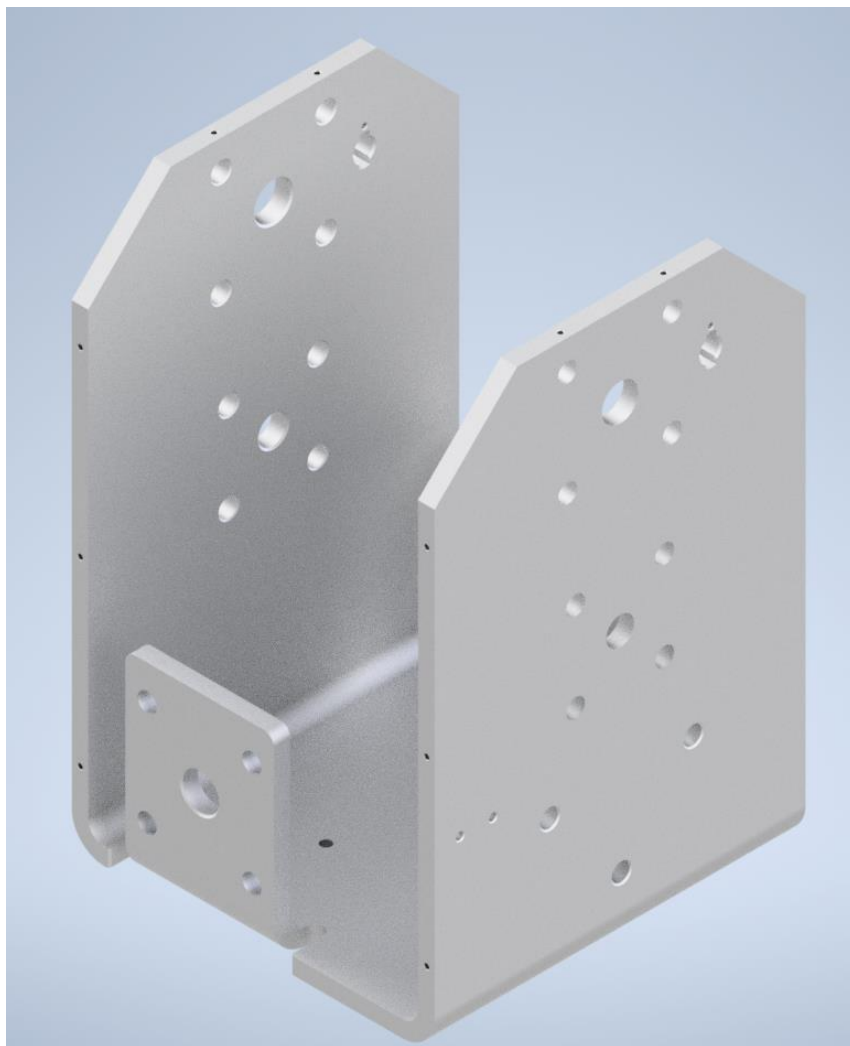
Rys. 17: Schemat montażu uchwyty adaptera dovetail'a w przekroju

Adapter pozwala na mocowanie szyny i jej utwierdzenie przy wykorzystaniu docisków bocznych.

b) Obudowa

Założenia:

- Zapewnienie stabilnego szkieletu do montażu mechanizmu elewacji i pozostałych modułów teleskopu
- Zapewnienie ochrony mechanizmu elewacji przed wpływem czynników zewnętrznych



Rys. 18: Model 3D obudowy elewacji

Obudowa została zaprojektowana jako pojedynczy element z 10 mm aluminiowej blachy giętej, przedstawiony na Rys. 14.

Otworki przelotowe pozwalają na prosty montaż poszczególnych elementów mechanizmu elewacji do obudowy z wykorzystaniem śrub i nakrętek. Otworki gwintowane na powierzchniach bocznych pozwalają na przymocowanie pokryw zewnętrznych modułu.

W dolnej części umieszczone zostały standardowe otworki montażowe 1/4" i 3/8".

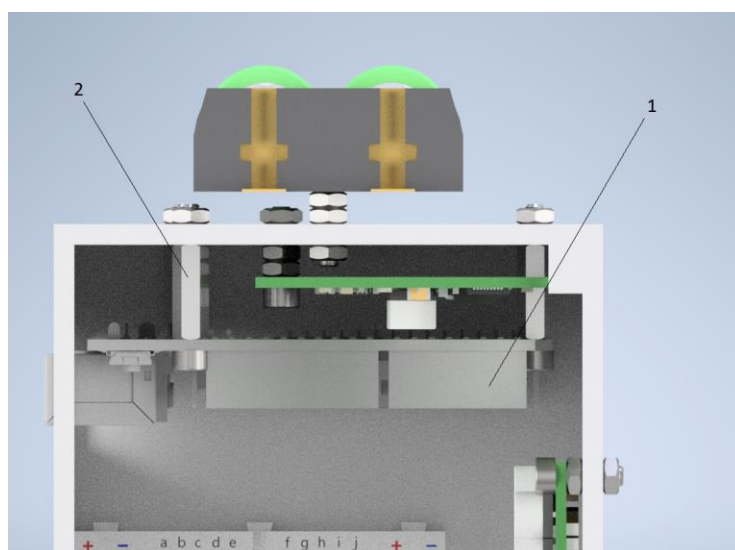
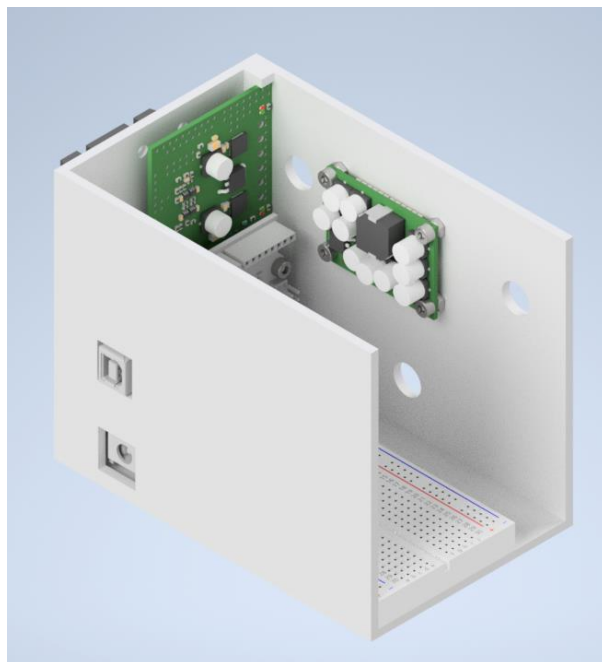
c) Moduł elektroniki

Założenia:

- Zapewnienie stabilnego montażu dla układu elektronicznego
- Umożliwienie prostego montażu połączeń między podzespołami elektronicznymi
- Osłonięcie podzespołów elektronicznych od czynników zewnętrznych

- Zapewnienie warunków pozwalających na działanie podzespołów wykorzystujących GPS i Bluetooth.

Model 3D modułu elektroniki został przedstawiony na Rys. 15.

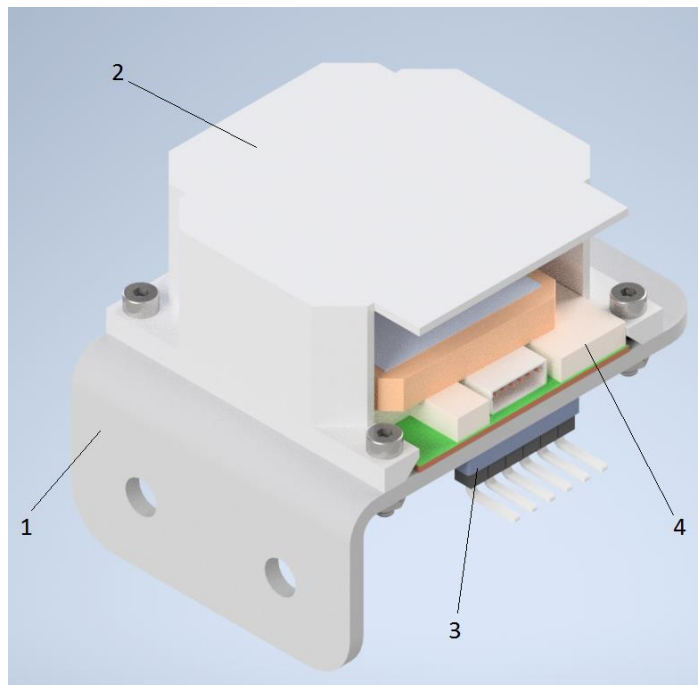


Rys. 19: Model 3D modułu elektroniki

Montaż mikrokontrolera **1** jest realizowany z wykorzystaniem tulejek dystansowych **2**, w celu zapewnienia przerwy powietrznej i lepszej cyrkulacji.

Moduł jest montowany do powierzchni bocznej obudowy elewacji w trzech punktach za pomocą śrub i nakrętek M10.

Elementy elektroniczne wymagające łączności radiowej zostały umieszczone na zewnątrz obudowy w montażu przedstawionym na Rys. 16.



Rys. 20: Montaż zewnętrzny elektroniki wymagającej łączności radiowej

Blaszka **1** jest mocowana z wykorzystaniem śrub i nakrętek do obudowy elewacji. Otwory przeLOTowe w obudowie elewacji pozwalają na połączenie zewnętrznych elementów elektronicznych z głównym modułem elektroniki

Zarówno moduł GPS **4** jak i moduł Bluetooth **3** są mocowane połączeniem klejonym do blaszki. Ponadto moduł Bluetooth posiada własną obudowę, co pozwala na przykrycie jedynie modułu GPS obudową **2**.

Dodatkowo w pełnym złożeniu urządzenia moduł elektroniki jest przykrywany prostokątną pokrywą z wykorzystaniem połączenia klejonego z obudową modułu.

d) Kosztorys

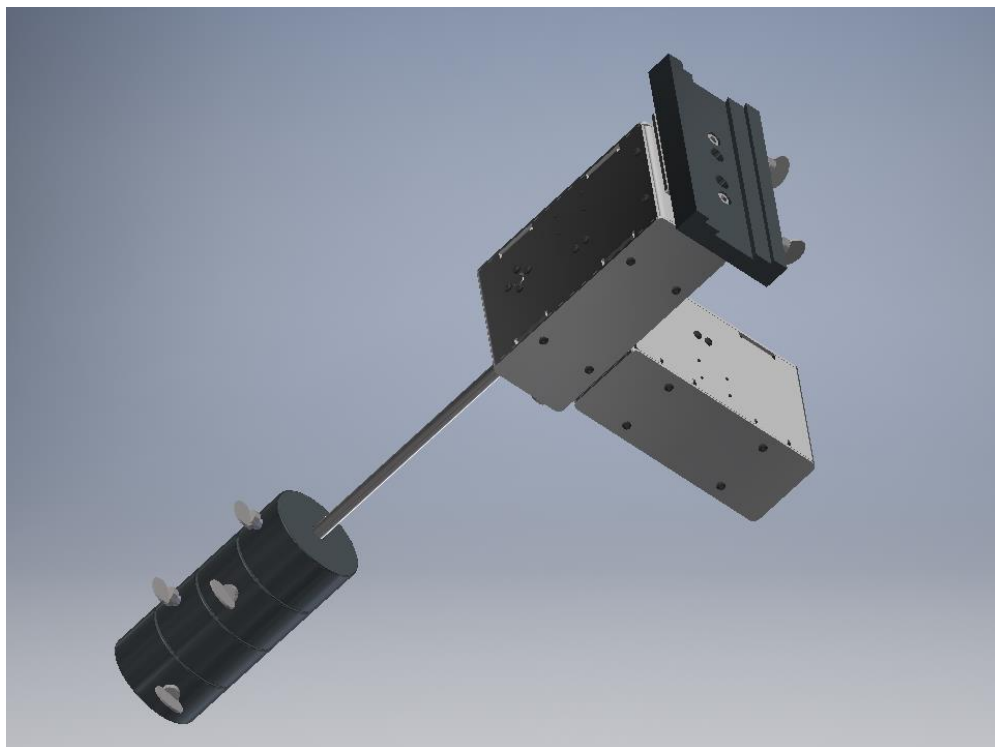
Lp.	Nazwa części	Liczba sztuk	Koszt jednostkowy	Suma
1	Obudowa z blachy giętej wycinana laserowo	1	ok. 500,00 zł	500,00 zł
2	Łożyisko SKF F4BSS 20M-YTPSS [5]	4	ok. 150,00 zł	600,00 zł
3	Łożyisko SKF FY 15 FM [5]	2	ok. 128,00 zł	256,00 zł

4	Elementy drukowane z żywicy ceramicznej (zbiorczo) [6]	1	ok. 500,00 zł	500,00 zł
5	Wałek fi15 [7]	1	15,50 zł	15,50 zł
6	Wałek fi20 [8]	1	53,00 zł	53,00 zł
7	Elementy łącznikowe (śruby, nakrętki; zbiorczo) [9]	1	Ok. 150 zł	150,00 zł
5	Elementy drukowane z ABS (zbiorcze)	1	30,00 zł	30,00 zł
9	Blaszka montażowa adaptowana z kątownika meblowego	1	15,00 zł	15,00 zł
10	Sprężyny [10]	2	ok. 30,00 zł w zależności od długości	60,00 zł
11	Właki prowadzące (materiał i wykonanie)	2	ok. 50,00 zł	100,00 zł
12	Podkładka tarcia [11]	1	Ok. 10 zł	10,00 zł

Szacowany sumaryczny koszt: **2298,50 zł.**

Moduł rektascensji oraz moduł deklinacji

a. Budowa mechanizmów modułu rektascensji i deklinacji



Rys. 21: Moduł rektascensji oraz deklinacji wraz z przeciwwagą i uchwytem na teleskop.

Moduły rektascensji oraz deklinacji zawierają przekładnie pasowe. Składają się z:

- silnika zamocowanego w uchwycie,
- małego koła napędzanego bezpośrednio przez wał silnika,
- paska zębatego,
- dużego koła zębatego napędzanego przez pasek,
- wałka dużego koła,
- napinacza.

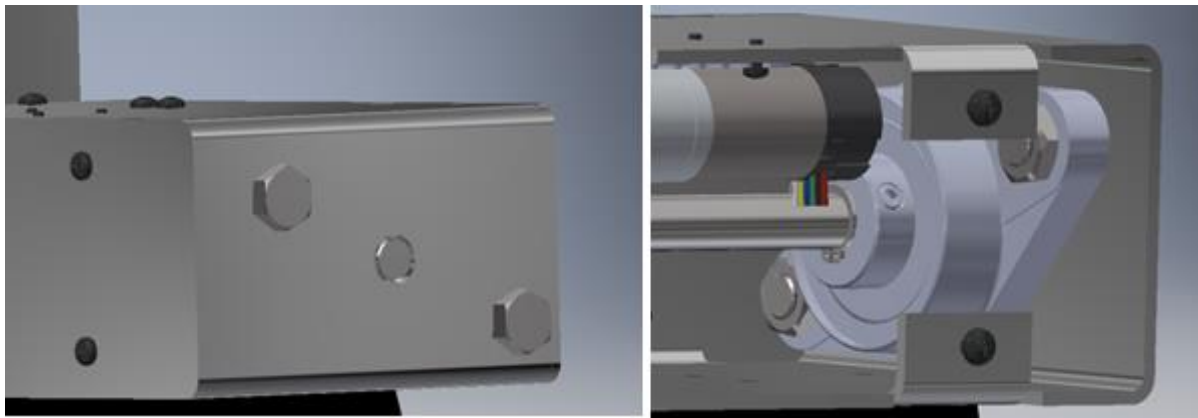
Łożyska samonastawne UCFL 201



Do ustalenia wałów modułu deklinacji i rektascensji w obudowie wykorzystano [12] [13] [14] łożyska samonastawne UCFL 201 . Ustalają one oś wałów i zapewniają ich swobodny obrót względem obudowy. Wykorzystane łożyska są to łożyska kulkowe, razem z oprawą tworzą one samonastawny zespół gotowy do montażu. Z dwóch stron w łożysku umieszczone są uszczelnienia, które pełnią funkcję zabezpieczającą układ łożyska.

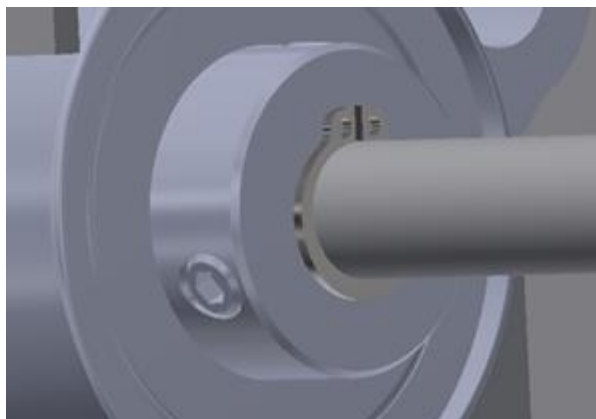
Rys. 22: Łożyska samonastawne UCFL 201.

Wybrano łożyska o średnicy otworu wewnętrznego $\phi=12\text{mm}$ dopasowanej do średnicy wału. Łożyska mocowane są do obudowy za pomocą dwóch wkrętów ISO 8676 M10 x 20 i dokręcane z drugiej strony za pomocą nakrętki gwintowanej ISO 4035 M10.



Rys. 23: Mocowanie łożysk do modułów ruchu.

Mocowanie łożysk do wału w wybranym modelu odbywa się poprzez dwa wkręty dociskowe M6. Dodatkowo łożyska są spozycjonowane za pomocą pierścieni osadczych DIN 471 12x1.



Rys. 24: Zabezpieczenie wału przed przesuwaniem się za pomocą pierścienia osadczego.

Zaletą takich łożysk samonastawnych jest prosta konstrukcja oraz łatwy montaż i demontaż. Dzięki wahliwości zespoły mają możliwość kompensacji błędów niewspółosiowości, korygując w ten sposób niedokładności montażowe wału. Łożyska mają skuteczne uszczelnienie, a ich konstrukcja zapewnia zapas smaru. Powiększony luz promieniowy wpływa korzystnie na kompensację ugięć i odkształceń cieplnych wału. Łożyska kulkowe samonastawne mogą przenosić obciążenia promieniowe i obciążenia osiowe.



Rys. 25: Użyte łożysko

Parametry:

C	12,8 kN
C0	6,65 kN
T min.	-20 °C
T max.	100 °C

Pozostałe dane:

Waga	0,51 kg
-------------	---------

Zalecane momenty dokręcania dla zestawu śrub	5,5 Nm
Oznaczenie oprawy	FL204-
Oznaczenie łożyska	UC201G2

Wybór silnika

Wybrany silnikiem jest Pololu 1591

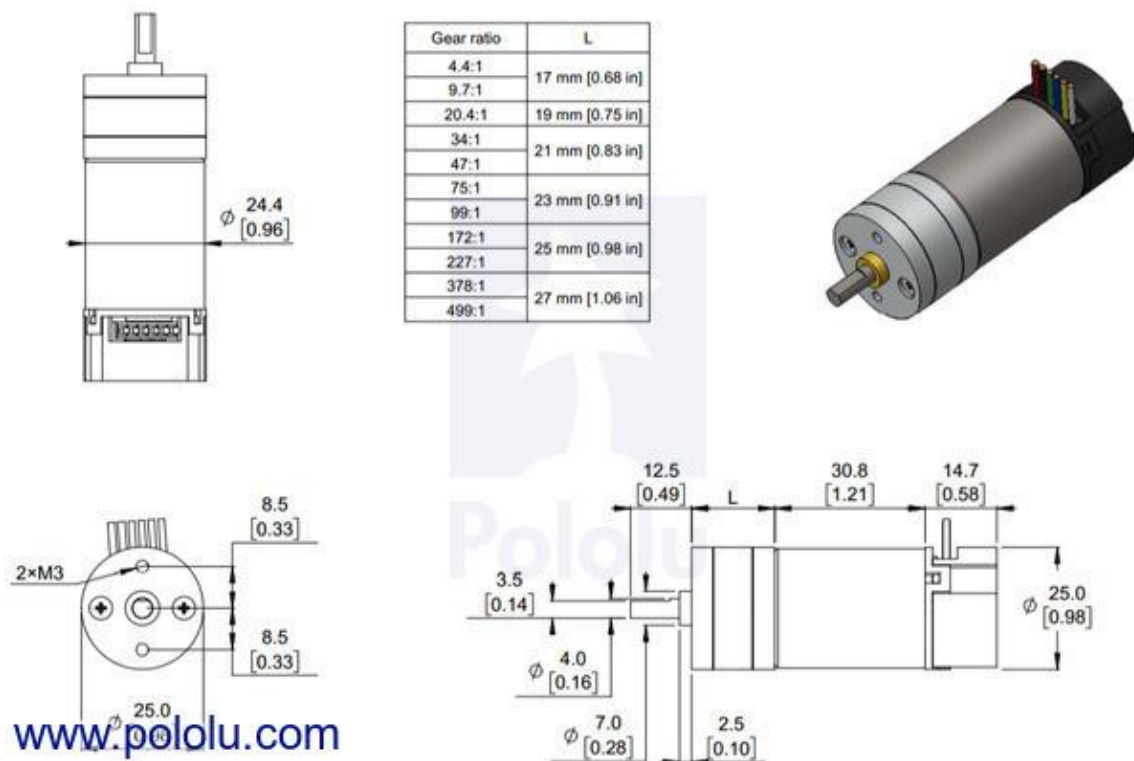


Rys. 26: Silnik Pololu 1591.

Specyfikacja silnika:

	Wartość	Jednostka
Przekładnia	499:1	
Prędkość obrotowa	12	obr/min
Moment obrotowy	2,1	Nm
Max pobór prądu	2,2	A
Napięcie zasilania	6	V
Wymiary		
Średnica	d = 24,4	mm
Długość	L = 70,3	mm
Cena	ok. 85	zł

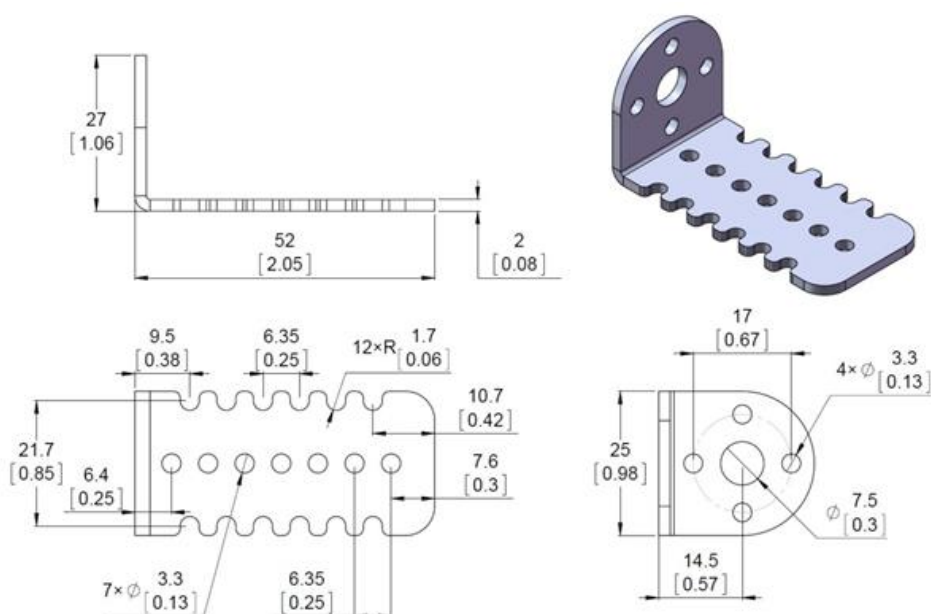
Motywacją do wyboru takiego silnika DC były małe wymiary, niska cena oraz poprzez przekładnię o dużym przełożeniu, duży moment obrotowy, zdolny obrócić moduł deklinacji z teleskopem oraz przeciwwagą.



Rys. 27: Wymiary silnika Pololu.

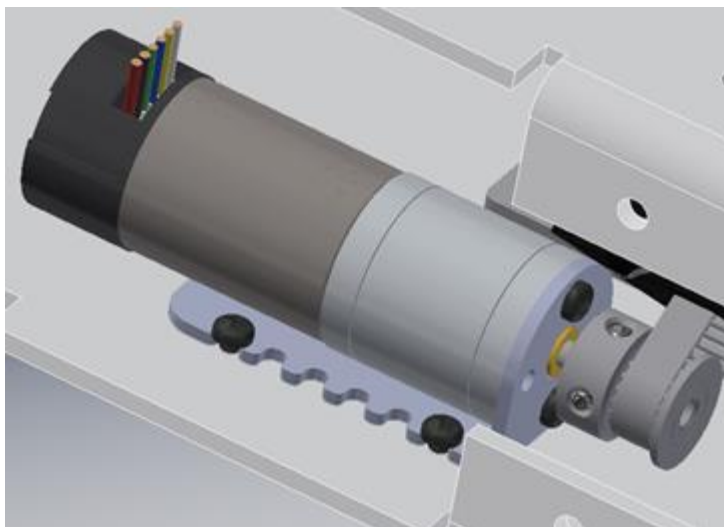
Mocowanie silnika

Do zamocowania silnika w obudowie wykorzystano handlowy uchwyt #2676 Pololu 25D mm Metal Gearmotor Bracket. Uchwyt przytwierdzony jest do obudowy przy pomocy czterech wkrętów ISO 7045 H M3 x 6.



Rys. 28: Dodatkowa część mocująca silnik Pololu.

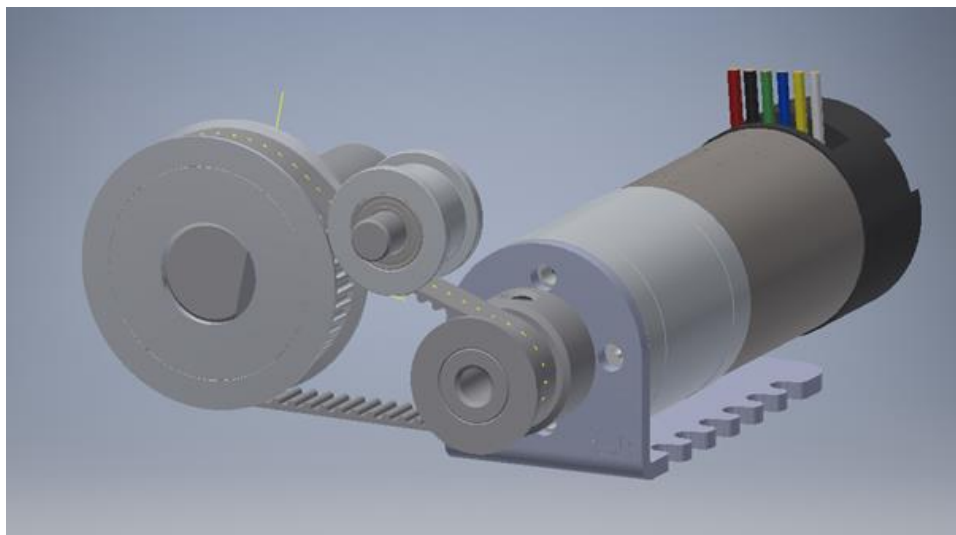
Na czole silnika znajdują się dwa otwory M3, za pomocą których możliwe jest przymocowanie silnika do uchwyty, uniemożliwiające obrót silnika względem układu. Do zamocowania silnika wykorzystano wkręty ISO 7045 Z M3 x 8. Możliwe jest przymocowanie silnika w czterech różnych położeniach względem uchwyty w zależności od tego, jak poprowadzone są przewody zasilające.



Rys. 29: Silnik zamocowany w module ruchu.

Przekładnia

W projekcie między wałem zapewniającym ruch osi rektascensji, a silnikiem znajduje się przekładnia pasowa z zastosowanymi zębami 2GT oraz przełożeniem 5:2.



Rys. 30: Przekładnia pasowa z wałkiem napinającym.

Sprawność przekładni pasowej wynosi około 90 %, dlatego nadaje się ona doskonale do maszyn sterowanych numerycznie.

Aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość przekładni zastosowano pas o szerokości 6 mm

W projekcie zastosowano przekładnię pasową 5:2 składającą się z dwóch kół pasowych: małego koła o 20 zębach i koła dużego o 50 zębach; koła napinającego oraz paska.

Przełożenie:

$$i = \frac{50}{20} = 2,5$$

Moment uzyskany za przekładnią z uwzględnieniem sprawności przekładni.

$$M_{wy} = M_{we} \cdot i \cdot \eta = 2,1 \cdot 2,5 \cdot 0,9 = 4,725 \text{ Nm},$$

gdzie: M_{we} – moment silnika DC
 i – przełożenie przekładni
 η – sprawność

Rozdzielczość enkodera

Założenie zdolności rozdzielczej to jedna minuta kątowa. Oznacza to, że jeden pełen obrót osi rektascensji musi być próbkowany przynajmniej 21600 razy.

$$n = 360 \cdot 60 = 21600$$

Silnik wyposażony jest w enkoder kwadraturowy o rozdzielczości **48 impulsów** na obrót (po przełożeniu 23945,84 impulsów na obrót).

Dodatkowo rozdzielczość wzrośnie po obliczeniu jej uwzględniając przekładnię pasową.

$$k = 23945,84 \cdot i = 95,783,36 = 23945,84 \cdot 2,5 = 59\,864,6$$

Założenia teoretycznie zostały spełnione $k > n$, lecz należy pamiętać, że dokładność pozycjonowania będzie zależała również od mimośrodowości zamocowania kół zębatych. Powoduje to, że faktyczna rozdzielczość położenia teleskopu zmniejsza się. Niemniej jednak jest ona w zupełności wystarczająca i spełnia wymagania postawione urządzeniu.

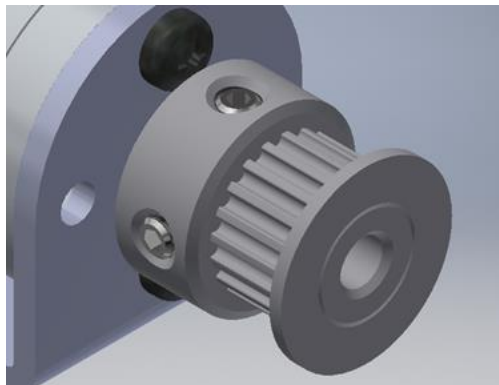
Małe koło



Rys. 31: Koło z 20 zębami używane w przekładni.

Wybrano popularne koło zębate stosowane w drukarkach 3D - **2GT Timing Belt Pulley** o 20 zębach i średnicy otworu wewnętrznego $\phi=5\text{mm}$ odpowiadającej średnicy wałka silnika.

Koło mocowane jest na wałku silnika za pomocą dwóch wkrętów dociskowych ISO 4029 M3 x 6. Wałek silnika ma podcięcie, które umożliwia docisk wkręta do płaskiej powierzchni wałka.



Rys. 32: Koło z 20 zębami używane w przekładni osadzone na silniku.

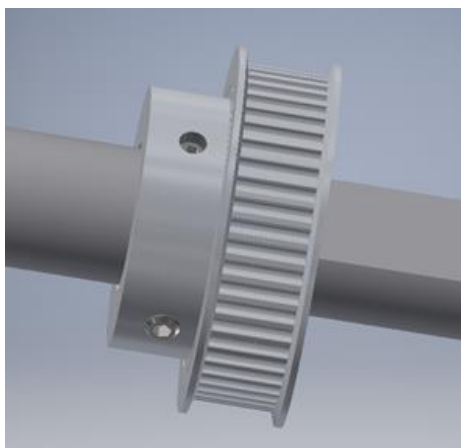
Wybrane zostało takie rozwiązanie ze względu na niską cenę, powszechność stosowania (dostępność) oraz odpowiednią średnicę otworu wewnętrznego. Wybrane koło dostosowane jest do paska **GT2 Timing Belt** 6mm.

Duże koło



Rys. 33: Koło z 50 zębami używane w przekładni.

Zastosowano koło zębate 2GT Timing Belt Pulley o 50 zębach i średnicy otworu wewnętrznego $\phi=12\text{mm}$. Koło mocowane jest na wałku $\phi=12\text{mm}$ przy pomocy dwóch wkrętów ISO 4029 M3 x 6. Na wałku wyfrezowane jest ścięcie, które zapewnia docisk wkręta do płaskiej powierzchni wałka.



Rys. 34: Koło z 50 zębami używane w przekładni osadzone na wałku.

Pasek

W rozwiązaniu zastosowano pasek **GT2 Timing Belt 6mm** typu closed loop o długości 158mm. Pasek opiera się na dwóch kołach zębatych, a jego napięcie regulowane jest za pomocą koła napinającego.



Rys. 35: Pasek używany w przekładni o oznaczeniu 2GT.

Zastosowanie paska typu GT2 ma tę zaletę, że jest to pasek bezluzowy. Jego półokrągłe w przekroju zęby charakteryzują się dłuższym czasem stykania paska z zębami koła oraz „gładkim” przejściem pomiędzy kolejnymi zębami.

Zalety pasków GT2:

- dłuższa żywotność paska
- cicha praca paska
- dokładność ustawiania
- większa zdolność przenoszenia obciążeń

Napinacz

Specyfikacja:

- Materiał: stop aluminium
- Powierzchnia anodyzowana

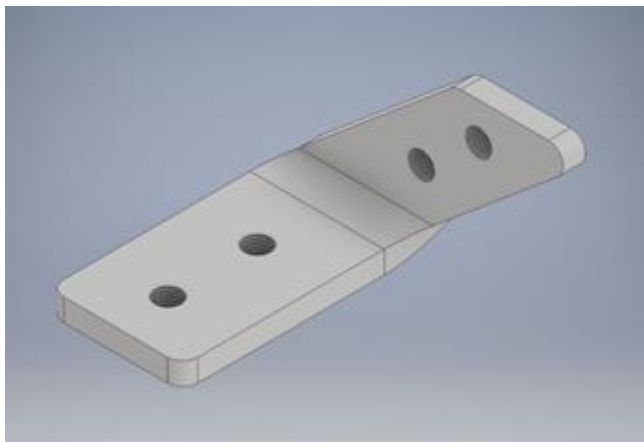


Rys. 36: Napinacz paska przekładni.

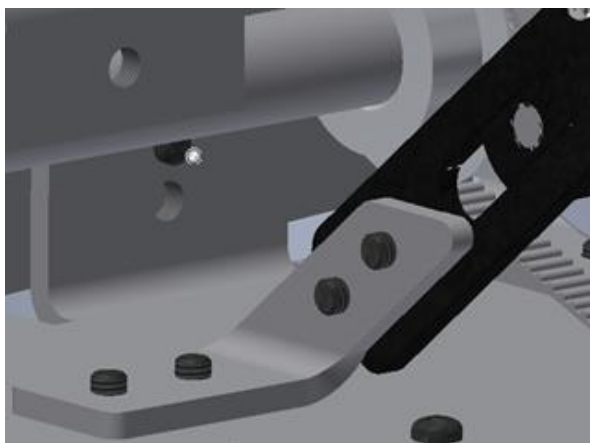
W projekcie zastosowano handlowy aluminiowy napinacz **Sunhokey Upgrade 2020 V-Slot Profile X-axis Synchronous Belt Stretch**. Napinacz ten jest powszechnie wykorzystywany w drukarkach 3D dla pasków 6mm. Wybrane koło napinające jest gładkie – napina pasek poprzez docisk koła do zewnętrznej części paska.

Ramka, do której przymocowane jest koło napinające przesuwana jest wzdłuż otworu fasolkowego za pomocą gwintowanej gałki. W zewnętrznej ramce napinacza umieszczone są dwa otwory pod wkręty mocujące.

Ze względu na upakowanie elementów wewnątrz obudowy modułów uchwyt koła napinającego został zamontowany pod kątem do obudowy za pomocą wygiętej blaszki (nr rysunku) na której zaprojektowano cztery otwory gwintowane. Blaszki zamocowano za pomocą czterech wkrętów ISO 7045 H M4 x 8.



Rys. 37: Element mocujący napinacz paska przekładni.



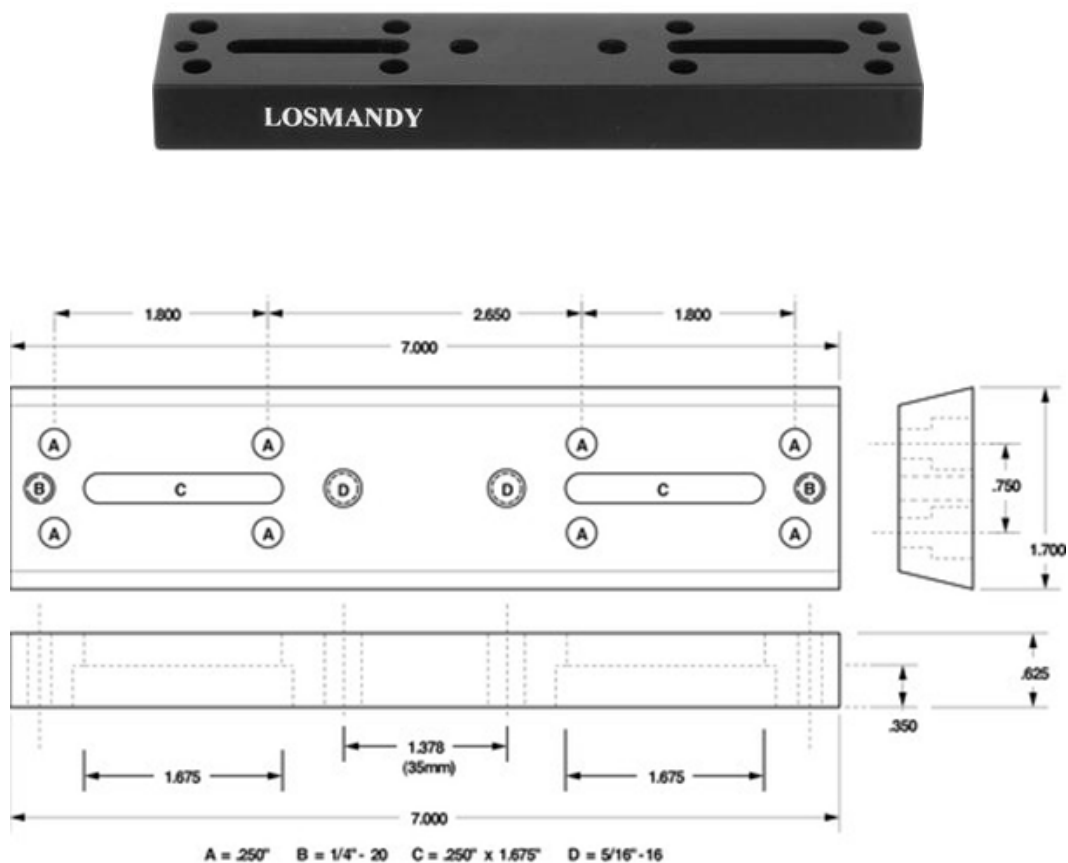
Rys. 38: Element mocujący napinacz paska przekładni zamocowany w module ruchu.

b. Obudowy

Obudowa modułów ruchu, została wykonana z blachy dla maksymalnego zmniejszenia kosztów wykonania w produkcji jednostkowej. Jest to blacha aluminiowa wycinana laserowo o grubości 3 mm, następnie gięta w celu uzyskania odpowiedniej formy.

c. Mocowanie modułu rektascensji:

W projekcie w mocowaniu modułu rektascensji do elewacji zastosowano 7-calową szynę dovetail typu V (Losmandy V-Series Dovetail Plate (7")).



Rys. 39: Jaskółczy ogon wykorzystywany do mocowania układów ruchu na elewacji.

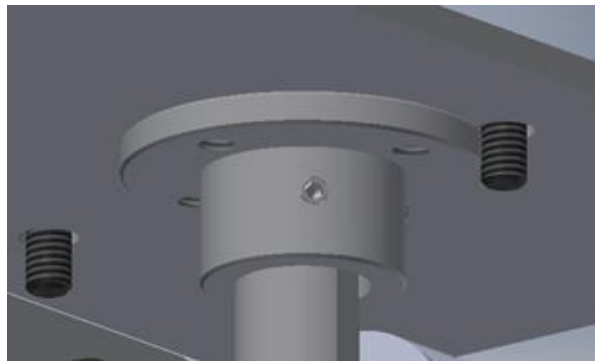
W obudowie modułu rektascensji wykonano 8 otworów gwintowanych $\frac{1}{4}$ ". Rozstaw otworów odpowiada rozmieszczeniu otworów A na dovetailu. Wybraną szynę przykręcono bezpośrednio do obudowy za pomocą 8 wkrętów stalowych $\frac{1}{4}$ ".

d. Połączenie modułu deklinacji z modułem rektascensji:



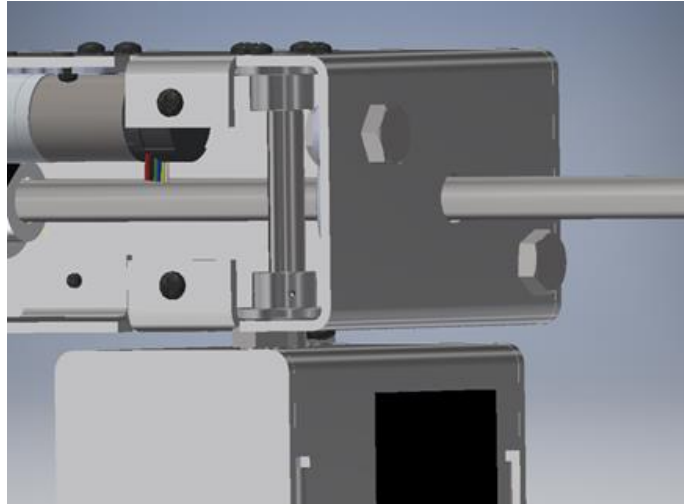
Rys. 40: Kołnierz fi 12.

W obudowie modułu deklinacji zostały zamocowane handlowe kołnierze żeliwne o średnicy otworu wewnętrznego $\phi=12\text{mm}$. Kołnierze przykręcone są do dwóch przeciwległych ścianek obudowy modułu deklinacji za pomocą czterech wkrętów ISO 7045 H M4 x 5.

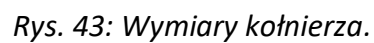


Rys. 41: Kołnierz zamocowany do płytki.

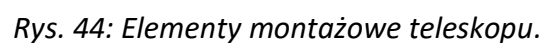
Do mocowania kołnierza do wału wykorzystuje się dwa wkręty dociskowe ISO 4026 M3 x 3 blokujące obrót wałka rektascensji względem modułu deklinacji. W module rektascensji wałek przenoszący obrót został wydłużony o szerokość modułu deklinacji. Zaprojektowano ścięcie służące do uzyskania lepszego docisku wkrętami dociskowymi zarówno koła zębatego jak i kołnierzy.



Rys. 42: Kołnierz $\varnothing 12$ zamocowany do modułów ruchu.



Montaż teleskopu jest zapewniony poprzez uniwersalną szynę dovetail typu V lub D przymocowaną do obudowy teleskopu. W projekcie założono, że teleskop jest umieszczony na szynie typu V o długości 11".



Wybrany został uchwyt do dovetaila z możliwością mocowania obydwu typów szyny, co pozwala zrezygnować z dodatkowych adapterów. Ze względu na duże gabaryty teleskopu oraz samej szyny dopasowany został uchwyt Losmandy G-11 Saddle Plate - G-11SPDV.

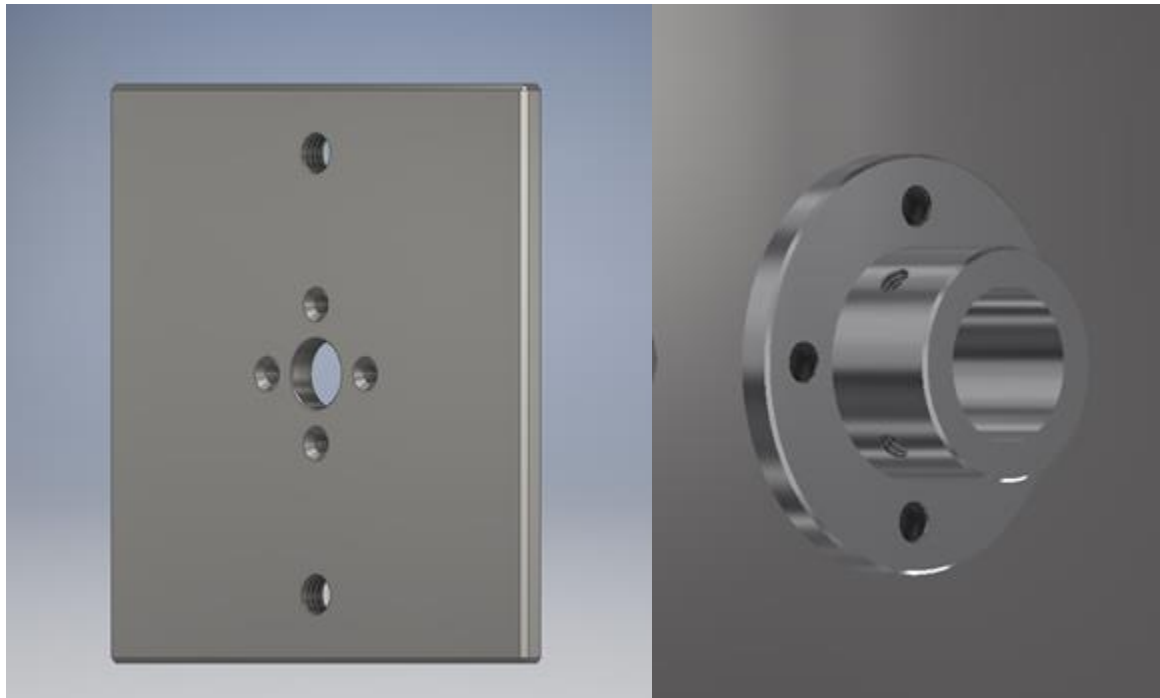
Szyna umieszczana jest w uchwycie, a następnie unieruchamiana przy pomocy dwóch pokręteł dociskających dwie części uchwytu. Zarówno podwójny docisk, jak i długość uchwytu umożliwia mocowanie długich szyn. Na uchwycie umieszczone są dwie pary otworów, służących do zamocowania uchwytu w statywie teleskopu.

Wybrany uchwyt charakteryzuje się wysoką stabilnością, zapewnianą przez dwa pokrętła dociskowe.

Specyfikacja:

- masa: 0,9kg
- grubość: 25mm
- szerokość: 102mm
- długość: 203mm
- zewnętrzne otwory w odległości 3", środkowe otwory w odległości 35mm

Uchwyt na dovetail został połączony z płytką adaptującą za pomocą dwóch wkrętów ISO 4762 M8 x 20 oraz dwóch nakrętek ISO 4032 M8. Płytkę tę ma nawiercone cztery otwory z pogłębieniami walcowymi pod wkręty z łbem M3 łączące płytkę z kołnierzem oraz dwa otwory M8 do mocowania uchwytu na dovetail w odległości 3".



Rys. 45: Płytką przeznaczona do montażu teleskopu.

Płytką adaptującą jest częścią wykonywaną, wycinaną laserowo i wierconą. Centralnie znajduje się otwór $\phi=12\text{mm}$ pod wałek modułu rektascensji. Wałek modułu rektascensji, podobnie jak wałek modułu deklinacji, zamocowany jest do kołnierza o średnicy otworu wewnętrznego $\phi=12\text{mm}$ przykręconego do płytki adaptującej i ustabilizowany za pomocą dwóch wkrętów dociskowych ISO 4626 M3 x 3.



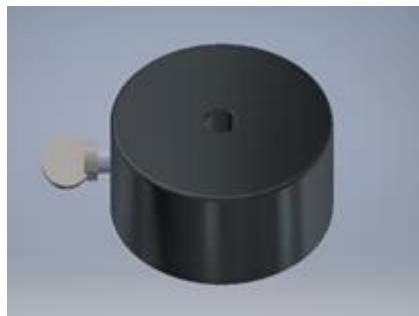
Rys. 46: Moduł mocowania teleskopu.

Przeciwwaga



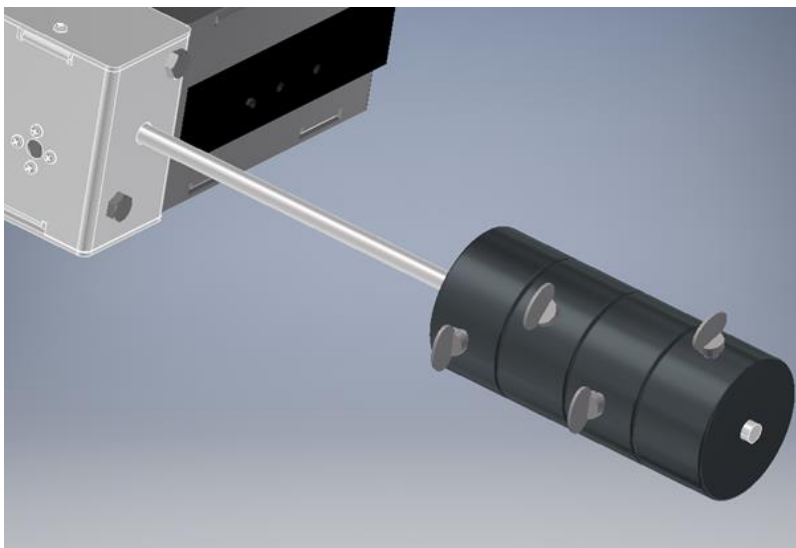
W klasycznym montażu niemieckim – German equatorial mount – istotną rolę pełni przeciwwaga. Służy ona do wyrównania wagi z tubusem teleskopu, dzięki temu przy obrocie w osi rektascensji jest wymagany mały moment obrotowy. Pozwala to na zastosowanie małych silników o niewielkim momencie. Teleskop spoczywa podparty z jednej strony ramienia montażu, a na drugim jego masę równoważy przeciwwaga. Ma ona postać walcowych ciężarków zamontowanych na końcu modułu deklinacji. W projekcie jest to przedłużony wałek w module deklinacji, do którego przymocowane zostały

ciężarki o średnicy otworu wewnętrznego 12,2mm – dopasowane do średnicy wałka, unieruchomione przy pomocy wkręta dociskowego.



Rys. 47: Model przeciwwagi.

Dobór przeciwwagi zależy przede wszystkim od masy teleskopu. Wpływ na niego mają również gabaryty teleskopu – w zależności od średnicy teleskopu będzie się zmieniać położenie środka ciężkości. Ze względu na mały wybór przeciwwagi dla takiej średnicy wałka dobrano cztery ciężarki o masie 2,3kg (TS-Optics Counterweight 2.3 kg for counterweight rod with 10-12 mm diameter).



Rys. 48: Przeciwwagi w modelu systemu paralaktycznego.

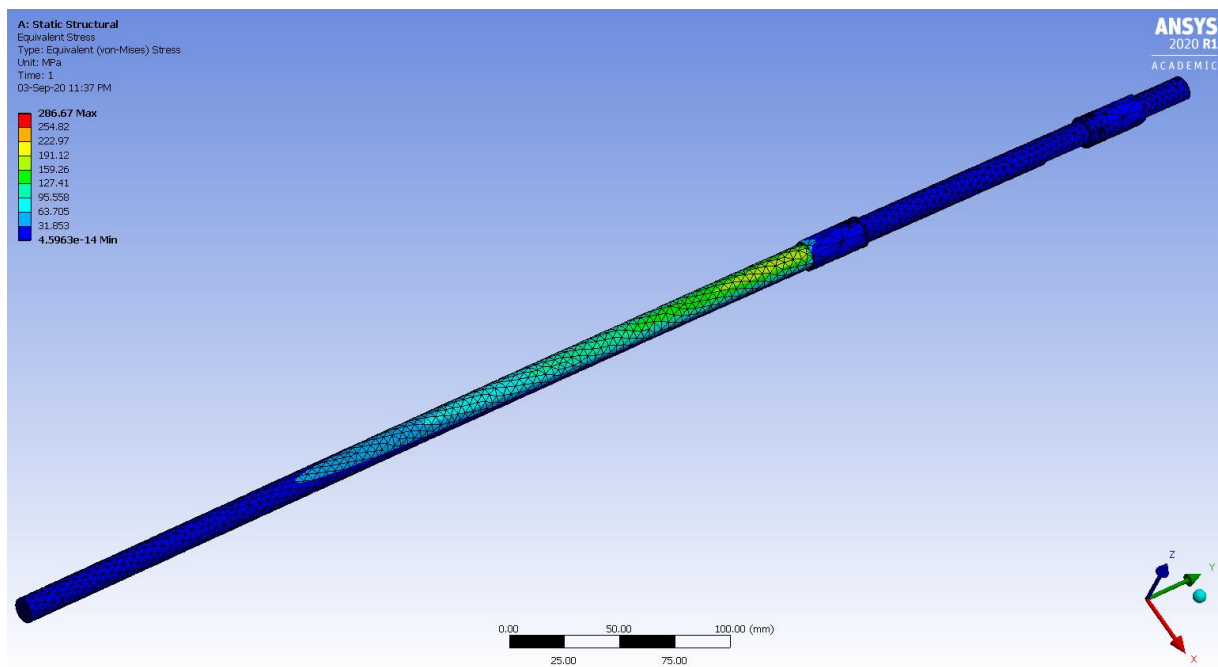
Specyfikacja:

- masa: 2,3kg
- średnica otworu wewnętrznego: 12,2mm
- wymiary: średnica 90mm, wysokość 50mm
- kolor: czarny

- materiał: żeliwo

Obliczenia wytrzymałościowe

Ze względu na wał o małej średnicy, na której zostały osadzone przeciwwagi, została przeprowadzona symulacja w celu dobrania odpowiedniego materiału. Obliczenia zostały przeprowadzone w programie ANSYS wersja studencka.



Rys. 49: Naprężenia Von Mises dla wałka modułu deklinacji.

Ze względu na naprężenia sięgające 300 MPa wałek wykonano ze kwasowaej stali martenzytycznej o granicy plastyczności 650 MPa.

Kosztorys

Nazwa	Liczba sztuk	Cena za 1 szt.	Koszt
Łożysko UCFL 201	4	15,00 zł	60,00 zł

Sunhokey Upgrade 2020 V-Slot Profile X-axis Synchronous Belt Tensioner	2	46,88zł	93,76 zł
Pololu 25D mm Metal Gearmotor Bracket Pair	1	27,94 zł	27,94 zł
Machifit GT2 Timing Pulley 20 Teeth Synchronous Wheel Inner Diameter 5mm/6.35mm/8mm for 6mm Width Belt CNC Parts - 6.35mm	2	11,33 zł	22,66 zł
] BF-type 2GT Timing Belt Pulley 50 Teeth Bore 12mm CNC Synchronous Wheel	2	23,59 zł	47,18 z
[17] iOrion 3D Printer Timing Belt 2GT-6 Closed Loop Rubber Belt 158mm Width 6mm	2	10,00 zł	20,00 zł
[18] Kołnierz $\phi=12\text{mm}$	3	5,18 zł	15,53 zł
[19] Uchwyt Losmandy G-11 Saddle Plate - G-11SPDV	1	487,50 zł	487,50 zł
[20] Losmandy V-Series Dovetail Plate (7")	1	183,75 zł	183,75 zł
[21] Losmandy V-Series Dovetail Plate (11")	1	202,50 zł	202,50 zł
Blacha aluminiowa 25cm x 25cm x 5mm	1	27,00 zł	27,00 zł
[22] Pręt ze stali nierdzewnej martenzytycznej 1.4034 $\phi=12\text{mm}$, 100cm	1	20,00 zł	20,00 zł
Blachy wycinane laserowo o grubości 3 mm	1	300,00 zł	300,00 zł
[23] TS-Optics Counterweight 2,3kg for rod 10-12mm	4	91,46 zł	365,86 zł
Dodatkowe elementy montażowe	-	20,00 zł	20,00 zł
		łącznie:	1893,68 zł

Elektronika i oprogramowanie urządzenia

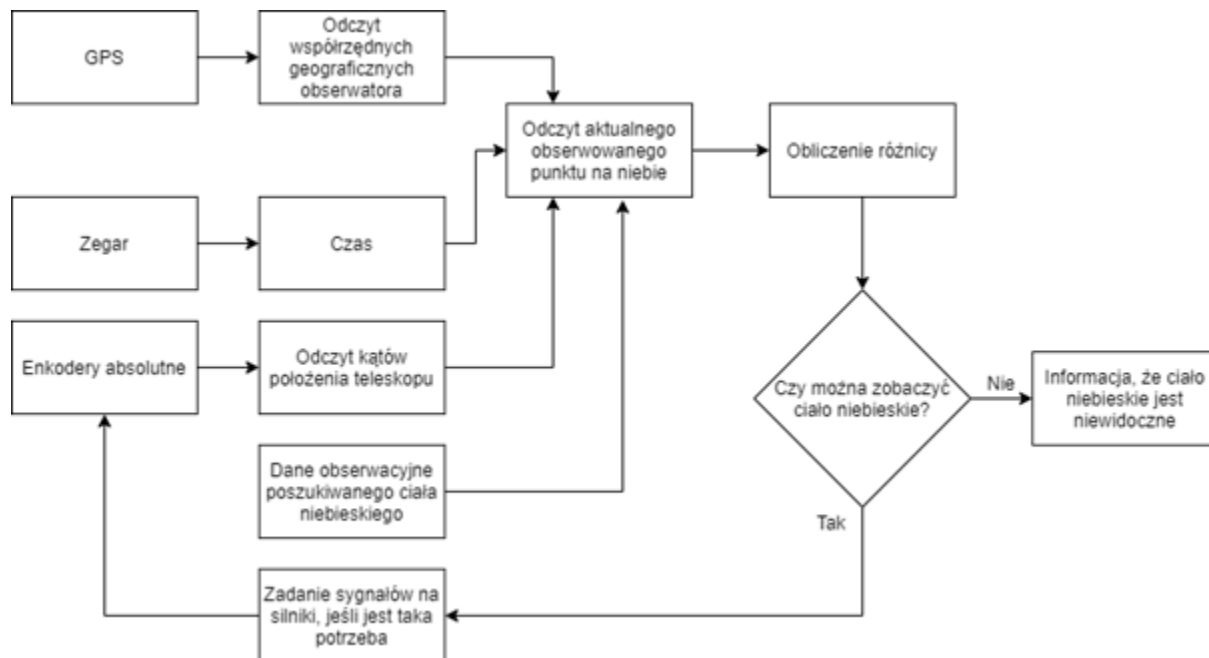
Wstęp:

Głównym zadaniem elektroniki i zaimplementowanego programu jest sterowanie silnikami krokowymi w taki sposób, by teleskop ustawił się na konkretną gwiazdę, a następnie ją śledził w miarę jej ruchu po nocnym niebie. W tym rozdziale będą omówione podstawy teoretyczne, które

posłużą do napisania algorytmów sterowania silnikami, zaprojektowany układ elektroniczny, schemat blokowy sterowania silnikami oraz zademonstrowane zostanie działanie programu.

Schemat blokowy algorytmu

Uwaga, teleskop musi być ustawiony w osi Północ-Południe. Wynika to z tego, że użytkownik będzie wstanie znacznie precyzyjniej ustawić w tej osi niż program oparty o odczyt z GPS.



Rys. 50: Schemat blokowy algorytmu

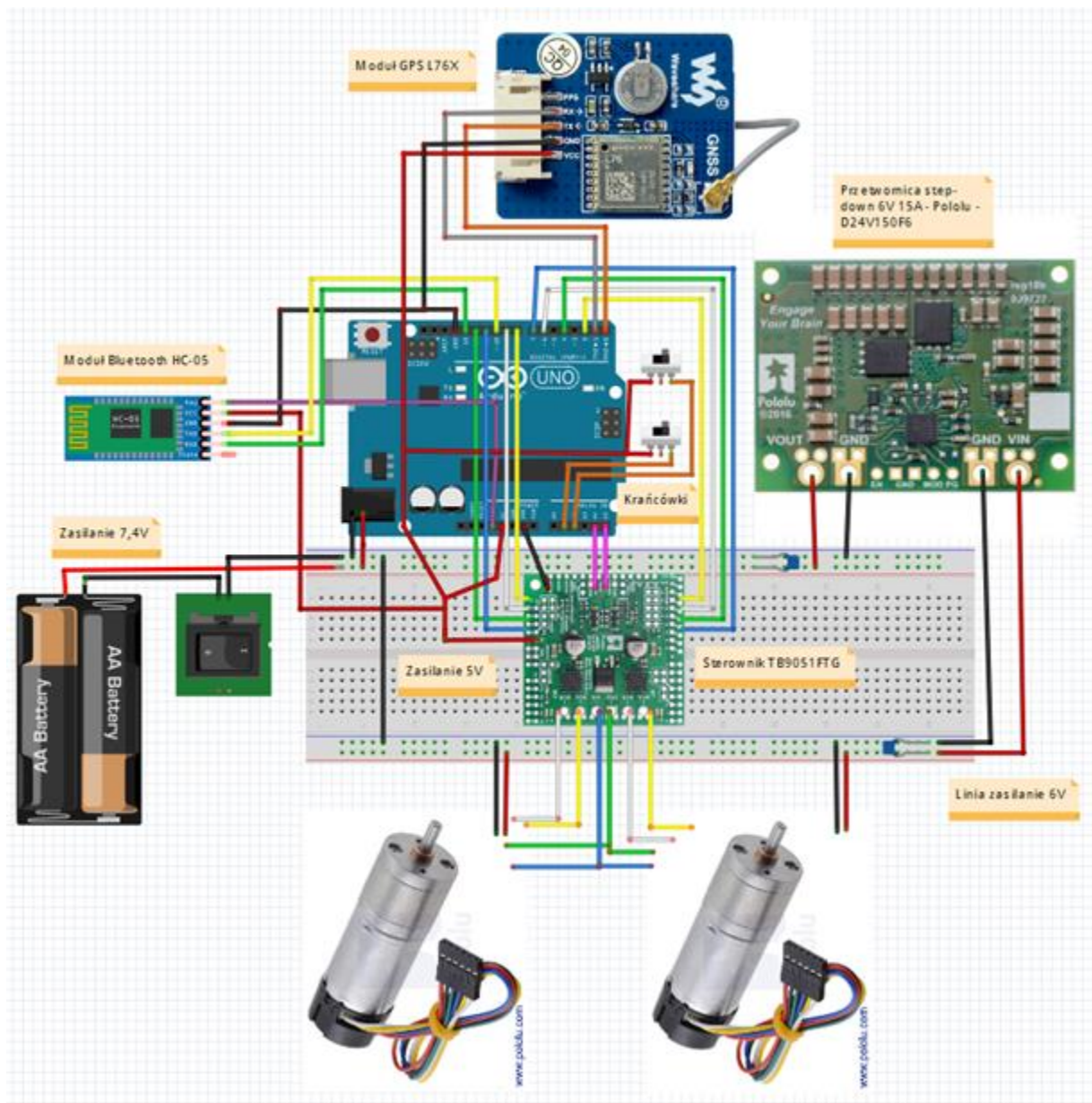
Zaprojektowany układ elektroniczny

Realizowany układ oprócz wykonywanego algorytmu musi spełniać również szereg innych wymogów wynikających z miejsca zastosowania:

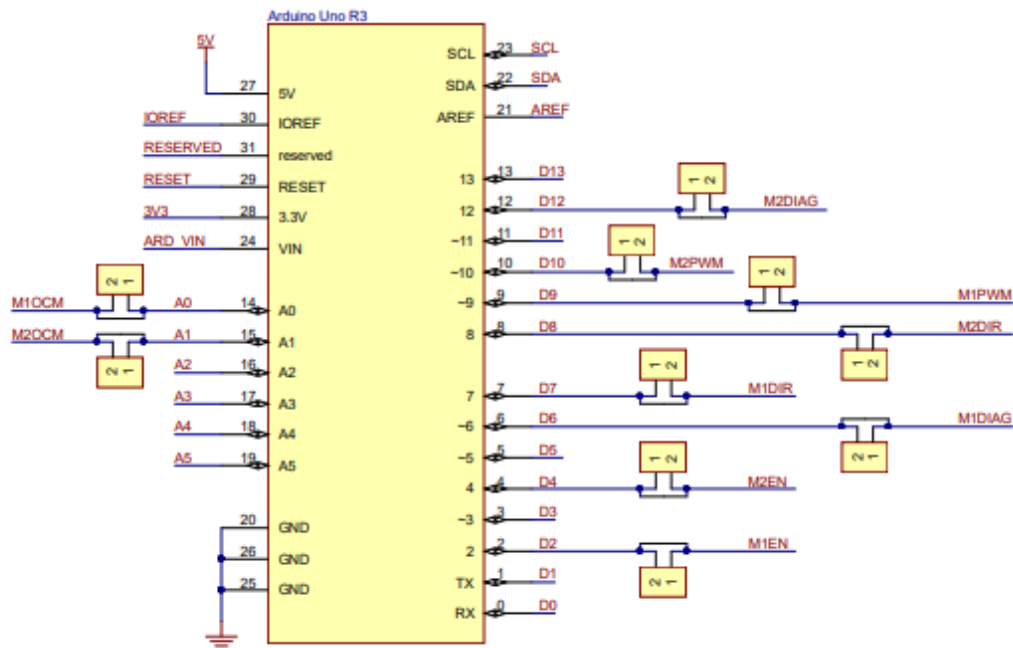
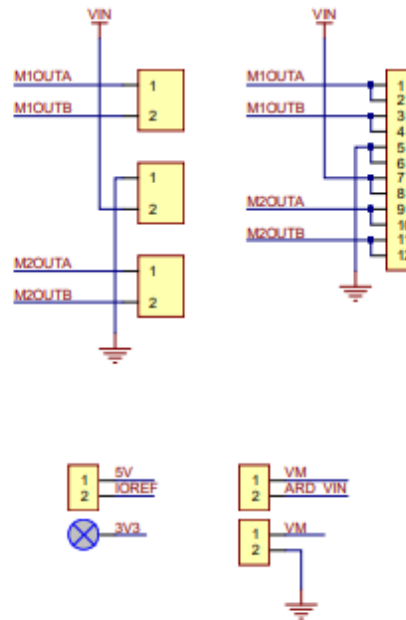
- źródło zasilania pozwalające na uzyskanie odpowiednich prądów i napięcia
- napięcie bezpieczne
- temperatura pracy: od -10 st. C do 30 st. C
- łączna waga do 0.5 kg
- możliwość uzyskania prądów rozładowywania do 8A
- małe wymiary (łączna powierzchnia mniejsza niż 200 cm²)
- komunikacja z pulpitem użytkownika

Wyliczenia sprawdzające spełnienie tych kryteriów będą umieszczone już po opisie zastosowanych części.

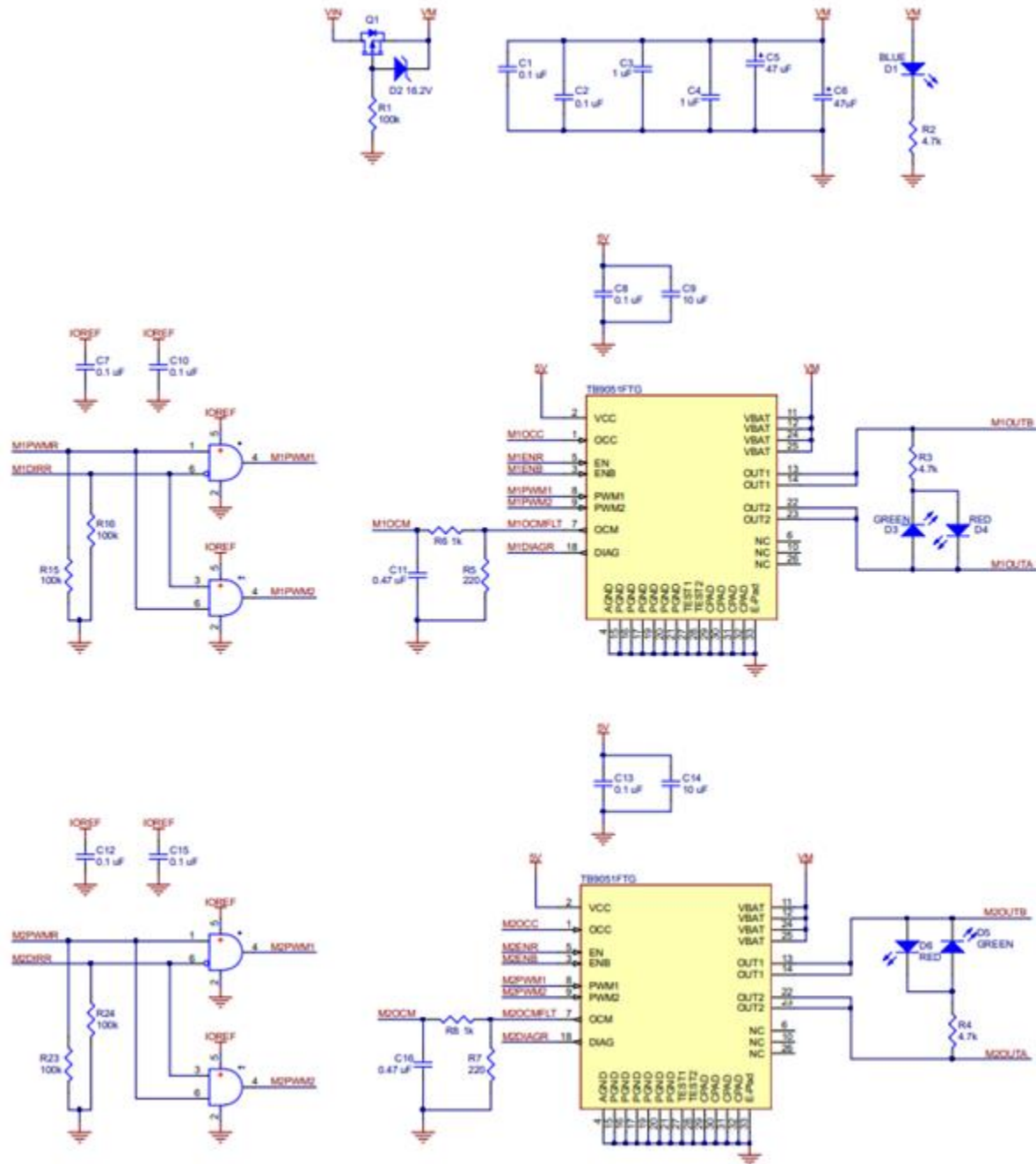
Poniżej są przedstawione schematy połączeń dla całego układu (dla sterownika TB9051FTG z pominięciem dodatkowych komponentów) i szczegółowy schemat dla samego sterownika TB9051FTG. Dwa schematy wynikają, by została zachowana czytelność.



Rys. 51: Schemat połączeń poszczególnych elementów elektronicznych



Rys. 52: Schemat podłączenia TB9051FTG (część 1)



Rys. 53: Schemat podłączenia TB9051FTG (część 2) [35]

Użyte komponenty:

Mikrokontroler - Arduino Uno Rev3 [36]



Rys. 54: Mikrokontroler Arduino Uno Rev3

Został użyty ze względu na odpowiednią moc obliczeniową, wystarczającą ilość wyprowadzeń pinów cyfrowych, posiadanie interfejsów komunikacyjnych UART i USB. Może być zasilane prądem o napięciu 7-12V. Również ważne jest to, że moduł jest bardzo łatwo programować, oraz jest w posiadaniu członków zespołu.

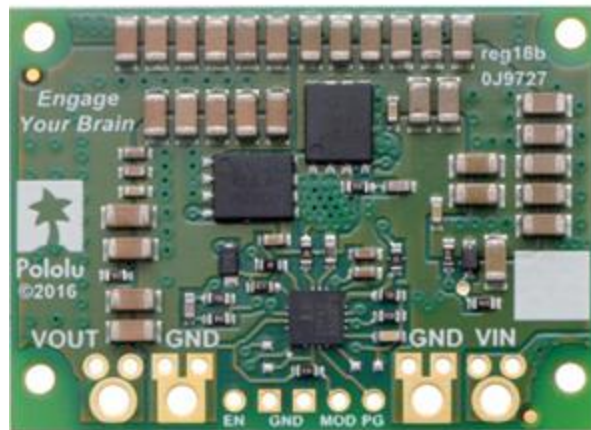
Zasilanie – akumulator Li-Ion LG INR18650 MG1 3,7V 2900mAh 10A [37]



Rys. 55 LG INR18650

Ze względu na to, że teleskop będzie działał bez możliwości pobierania prądu z sieci, postanowiono użyć zasilania akumulatorowego. Parametrami branyymi do wyboru zasilania całej elektroniki i mikrosilników były napięcie znamionowe, pojemność oraz prąd rozładowywania. Do prawidłowego funkcjonowania całej elektroniki napięcie musi być 6V dla silników oraz 7V-12V dla modułu Arduino. Akumulatory są podłączone szeregowo w celu zapewnienia docelowego napięcia 7,4V. Oprócz tego, prądy rozładowania zgodnie z obliczeniami będą wynosiły do 5,8A. Akumulatory to gwarantują z dużą nawiązką, co jest szczególnie ważne w momencie, gdy cały system jest uruchamiany i przez krótki czas są duże prądy rozładowywania. Również ważnym czynnikiem jest pojemność, która powinna być wystarczająca do zasilania całego ponad godzinę. Innym ważną przyczyną wyboru tych ogniw był rozmiar AA, co ułatwia dobór ładowarki przez użytkownika. Pewnym mankament jest to, że ten typ akumulatorów ma zmniejszoną pojemność w temperaturach poniżej 0 stopni Celsjusza.

Przetwornica step down – D24V150F6 6V 15A – Pololu 2882 [38]



Rys. 56: D24V150F6

Wybór tej przetwornicy wynika z posiadania odpowiedniego napięcia wejściowego 7,2V do 40V zasilanego ogniwami, napięcia wyjściowego 6V umożliwiające uzyskanie odpowiednich napięć na silnikach oraz wysoki prąd wyjściowy 15A, co bez problemowo zasili zastosowane silniki i pozwala na ewentualne zastosowanie bardziej prądożernych silników w przyszłych modyfikacjach.

Sterownik silnika krokowego – Dual TB9051FTG Motor Driver Shield [39]



Rys. 57: TB9051FTG

Silniki krokowe wymagają sterowników, by móc łatwiej nimi sterować za pomocą mikrokontrolera. Stosuje się zwykle dedykowany układ elektroniczny. Zastosowanie powyższego układu wynika z tego, że jest dedykowany do zastosowanych silników. Oprócz tego producent zapewnia odpowiednie wsparcie w postaci bibliotek oraz schematy podłączeń do modułu Arduino Uno.

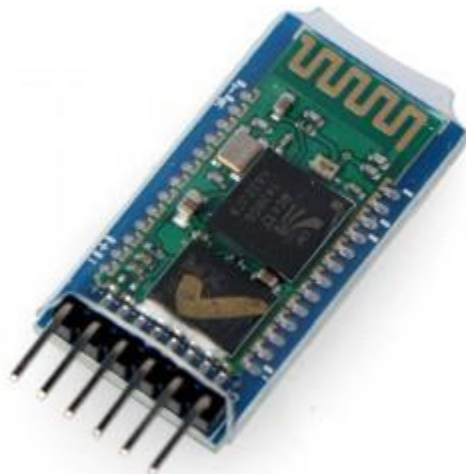
Moduł GPS – L76X Multi GNSS [40]



Rys. 58: L76X Multi GNSS

Powyższy moduł lokalizacyjny zastosowano ze względu na szybkie i dokładne pozycjonowanie (do 30s), małe zużycie energii, napięcie zasilania umożliwiające zasilanie bezpośrednio z pinu Arduino, posiadanie już gotowych bibliotek na Arduino oraz małe rozmiary (32x25 mm).

Moduł Bluetooth – HC-05 [41]



Rys. 59: HC-05

Powyższy moduł do komunikacji Bluetooth zastosowano ze względu na duży zasięg (10 metrów) oraz małe wymiary.

Przełącznik bistabilny SMRS101 250V/6,5A [42]



Rys. 60: SMRS101

Przełącznik został wybrany ze względu na wystarczające obciążenie styków do przewodzenia prądów. Dla niższych napięć np. 125V wynosi one już 13A, co jest wystarczające, by przełącznik. Również ma dużą ilość cykli włącz/wyłącz – ok. 10 000.

Obliczenia sprawdzające czy stawiane wymagania są spełnione:

a. Wymagania prądowe

Maksymalne prądy wymagane przez silniki: $2,4A \times 2 = 4,8 A$

Maksymalne prądy wymagane przez moduł Arduino Uno: 1A

Łączne: 5,8 A

Użyte ogniwa mają dopuszczalne prądy rozładowania do 10 A. A więc uda się zasilić całe urządzenie oraz pozostaje dalej możliwość rozwoju urządzenia dodając kolejne elementy jak np. nowy silnik albo ekran użytkownika.

b. Czas działania

Przy podłączeniu szeregowo dwóch ogniwach ich pojemność łączna wyniesie 5,8Ah. Przy maksymalnym zużyciu prądów całe urządzenie będzie działało co najmniej 1h. Należy pamiętać, że w praktyce tylko jeden silnik będzie cały czas pracował kompensując ruch obrotowy ziemi oraz moduł Arduino w tej aplikacji realnie będzie wymagał dużo mniejszych prądów niż 1A. Realny czas działania należy szacować na 1,5-2h. Nie mniej dodając kolejną parę ogniw, w sposób równoległy, czas ten można zwiększyć do 3-4h

c. Masa

Silniki: 2x108g

Arduino UNO: 25 g

Ogniwa: 2x31g

Przetwornica step down: 19g

Sterownik silnika krokowego: 11g

Moduł GPS: 9g

Moduł Bluetooth: 13g

Krańcówki: 2x10g=20g

Osprzęt dodatkowy (np. kable, kondensatory, płytki stykowe - szacunkowo): do 100g

Łącznię: do 456g

Łączna masa jest wystarczająca, by nie obciążać zbytnio statywu.

d. Powierzchnia

Arduino UNO: 70x55

Ogniwa: 2x 51x15

Przetwornica step down: 43x32

Sterownik silnika krokowego: 50x52

Moduł GPS: 35x26

Moduł Bluetooth: 37x17

Łączna powierzchnia: 108,95 cm²

Przy takiej powierzchni powinno się zastosować pudełko o wymiarach np. 11x11 cm oraz wysokości do 5 cm. Nie mniej należy pamiętać, że elementy nie muszą być umieszczone na jednej płycie, ale już w trójwymiarowym pudełku, co prawdopodobnie zmniejszy jego wymiary.

Implementacja programu w wersji uproszczonej

Poniżej znajduje się kod gotowy do wgrania na mikrokontroler Arduino, który z wykorzystaniem wszystkich elementów teleskopu nakierowuje jego oś optyczną na gwiazdę północną (Polaris), nadążnie ją śledzi oraz odczytuje lokalizacje obserwatora i dokładny czas. Głównym celem algorytmu jest sprawdzenie poprawności działania całego programu zanim będzie rozszerzana jego funkcjonalność. Ze względu na brak części pozwalających na zadowalającą realizację fizyczną, program nie został przetestowany na domyślnej konfiguracji sprzętowej.

```

1 // Do sterowników silnika
2 #include "DualTB9051FTGMotorShield.h"
3 DualTB9051FTGMotorShield md;
4 // Definicja PINÓW do silników jest nie potrzebna. Trzeba połączyć tak jak na schemacie od producenta.
5
6 // Do GPSa
7 #include <SoftwareSerial.h>
8 #include "DEV_Config.h"
9 #include "L76X.h"
10 GPRMC GPS1;
11 //Tutaj też nie trzeba definiować dodatkowych pinów . Wykorzystuje piny RX i TX.
12
13 // Do odczytu danych z Bluetootha
14 #include <SoftwareSerial.h>
15 #define rxPin 10
16 #define txPin 12
17 #define baudrate 38400
18 String msg;
19 SoftwareSerial hc05(rxPin ,txPin);
20
21 //Do obliczeń matematycznych
22 #include <math.h>
23
24 int PolarAxisPin = A3; //piny do krańcówek
25 int DeclinationAxisPin = A4;
26 int PrawdziweZeroEnkoderaM1 = 0;
27 int PrawdziweZeroEnkoderaM2 = 0;
28
29
30 int ImpulsyNaObrót = 45*2.5; // ilość impulsów na jeden obrót całej osi urządzenia
31 int PolarisDeklinacja = 89.26411; //w stopniach
32 int PolarisRaktascensja = 2.53; // w godzinach
33 int GMT_time = 0; // w godzinach: Czas Greenwich
34 int Motor2speed = 12; //RPM: maksymalna prędkość użytego silnika
35 int Motor2const = 400/(Motor2speed/2.5)*60*24; // [-]; Stała prekość silnika od osi raktascensji do nadajnego śledzenia nieba
36 int WyborSilnika = 0;
37
38 int hour = 0;
39 int minute = 0;
40 int second = 0;
41 int temp = 0;
42
43 //Założenie - silnik 1 jest do osi deklinacji, a silnik 2 do osi biegunowej
44 // Stosujemy enkodery inkrementalny
45 void setup() {
46   md.init(); //inicjalizacja sterownika do silników
47
48   pinMode(rxPin,INPUT);
49   pinMode(txPin,OUTPUT);
50
51   Serial.begin(9600); //do wysyłania wiadomości przez bluetootha do aplikacji
52 }
53
54
55 void loop() {
56   md.enableDrivers(); //załadowywanie sterowników silników
57   delay(1); // wait for drivers to be enabled so fault pins are no longer low
58   zerowanie_pozycji() : //zerowanie teleskopu i enkoderów, w celu odnalezienia swojej pozycji.
59
60   while ( ImpulsyNaObrót*PolarisDeklinacja/140 >= readM1Encoder() - PrawdziweZeroEnkoderaM1 ){ // gdy dojdzie to stanu na gwiazdnie polarnej
61     void setM1Speed(400);
62   }
63   void setM1Speed(0) : //ustawiona na deklinacji
64
65   GPS1 = L76X_Get_GPRMC();
66   GMT_time = GPS1.Time_M - 2 + (GPS1.Time_S/60)/60; //czas Greenwich //-2 dla naszej strefy czasowej
67
68   while( readM2Encoder() - PrawdziweZeroEnkoderaM2 - 1 <= ImpulsyNaObrót*(GMT_time + GPS1.Lon - PolarisRaktascensja)/24 <= readM2Encoder() - PrawdziweZeroEnkoderaM2 + 1){
69     //Gdy znajdziemy się widelkach, zatrzymaj się
70     void setM2Speed(400);
71     GPS1 = L76X_Get_GPRMC();
72     GMT_time = GPS1.Time_M + (GPS1.Time_S/60)/60;
73   }
74   void setM2Speed(0+Motor2const); //ustawienie osi biegunowej i nadajnego podążanie
75

```

```

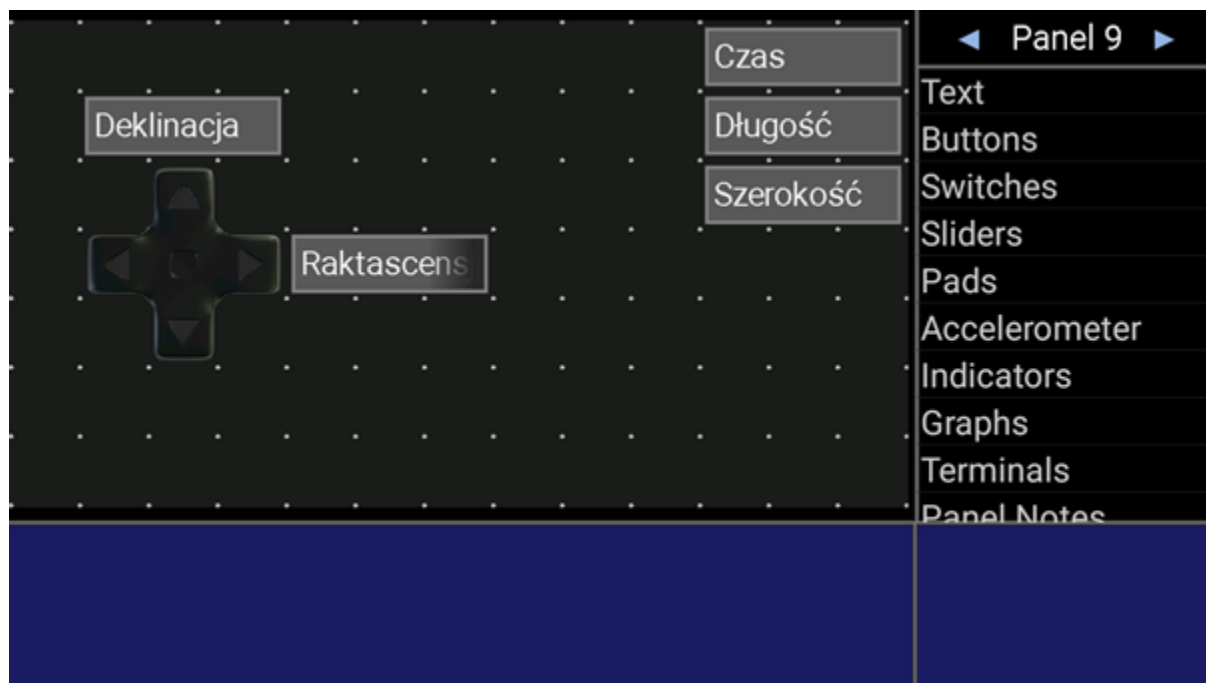
75
76 while(1){ //Wlasciwy nieskonczony program
77     // Sterowanie silnikami
78     if(BluetoothData=='0') {
79         void setM1Speed(0);
80         void setM2Speed(Motor2const);
81     } // Stop
82     if(BluetoothData=='1') {
83         void setM1Speed(400);
84     } //Do gory
85     if(BluetoothData=='3') {
86         void setM1Speed(-400);
87     } //Do dolu
88     if(BluetoothData=='2') {
89         void setM2Speed(400);
90     } //Do gory
91     if(BluetoothData=='4') {
92         void setM2Speed(-400);
93     } //Do dolu
94
95     // Wyświetlenie danych w aplikacji
96     Serial.print("T"+String(GPS1.Time_H)+String(":")+String(GPS1.Time_M)+String(":")+String(GPS1.Time_S)+""); //Wyświetl czas
97     Serial.print("D"+String(GPS1.Lon)+"");
98     Serial.print("S"+String(GPS1.Lan)+"");
99     Serial.print("E"+String(impulsyNaObrot*(readM1Encoder() - PrawdziweZeroEnkoderaM1))+String("st")+"" );
100
101     //Przeliczenie raktascensja na format zapisu godzinowego
102     GPS1 = L76X_Get_GNRMC();
103     temp = GMT_time + GPS.Lon - PolarisRaktascensja)/24;
104     hour = floor(GMT_time);
105     minute = floor((hour-GMT_time)*60);
106     second = minute - (hour-GMT_time)*60;
107
108     Serial.print("R"+String(hour)+String("h")+String(minute)+String("m")+String(second)+String("s")+"" );
109 }
110
111 void zerowanie_pozycji()
112 {
113     while ( 4.8 >= analogRead(DeclinationAxisPin) ){ // gdy dojedzie do krańcówki to stanie
114         void setM1Speed(-400)
115     }
116     void setM1Speed(0)
117
118     while ( 4.8 >= analogRead(PolarAxisPin) ){ // gdy dojedzie do krańcówki to stanie
119         void setM2Speed(400)
120     }
121     void setM2Speed(0)
122
123     PrawdziweZeroEnkoderaM1 = readM1Encoder(); //Zresetowanie enkodera
124     PrawdziweZeroEnkoderaM2 = readM2Encoder(); //Zresetowanie enkodera
125 }
126

```

Powyższy kod skupia się na realizowaniu stawianych przed nim wymagań. Z pewnością kod wymaga zoptymalizowania - mniej pętli, uproszczenie obliczeń, sprawdzenie czy użyte stałe są odpowiednie. Oprócz tego, kod wymaga długotrwałych testów sprawdzających, np. czy po 2 godzinach działania, dalej najeżdżą na tą samą pozycję albo czy nie trzeba wprowadzić jakieś poprawki ze względu na niedoskonałości wykonawczych części mechanicznych oraz silników. Również jest potrzeba zastosowania enkoderów absolutnych zamiast inkrementalnych, co ułatwi odczytywanie danych i rzadszą kalibrację, niż co uruchomienia teleskopu.

Pulpit użytkownika

Wykorzystując aplikację „Bluetooth electronic” zaprojektowano interfejs użytkownika. Telefon użytkownika łączy się poprzez bluetooth z teleskopem, a następnie pobiera potrzebne informacje i umożliwia sterowanie.



Rys. 61: Interfejs użytkownika

Interfejs informuje użytkownika o aktualnym czasie i jego pozycji geograficznej – pobierając dane pochodzące z modułu GPS. Oprócz tego wyświetla informację o aktualnie obserwowanej pozycji na niebie wykorzystując do tego dane z enkoderów. Joystick umożliwia sterowanie silnikami i w ten sposób regulować pozycję na niebie.

Kosztorys

Nazwa	Sztuk	Cena za 1 szt.	Koszt
Arduino UNO	1	92,00 zł	92,00 zł
499:1 Metal Gearmotor 25Dx73L mm LP 6V with 48 CPR Encodera firmy Pololu	2	130,00 zł	260,00 zł
Akumulator LG INR18650 MG1	2	7,00 zł	14,00 zł
L76X GPS Module	1	73,00 zł	73,00 zł
Przetwornica step-down D24V150F6	1	170,00 zł	170,00 zł
Sterownik TB9051FTG	1	75,00 zł	75,00 zł

HC-05 Bluetooth Module	1	35,00 zł	35,00 zł
Drobny osprzęt: kondensatory/rezystory/kable/przełącznik on/off itd.	-	100,00 zł	100,00 zł
		Całość:	819,00 zł

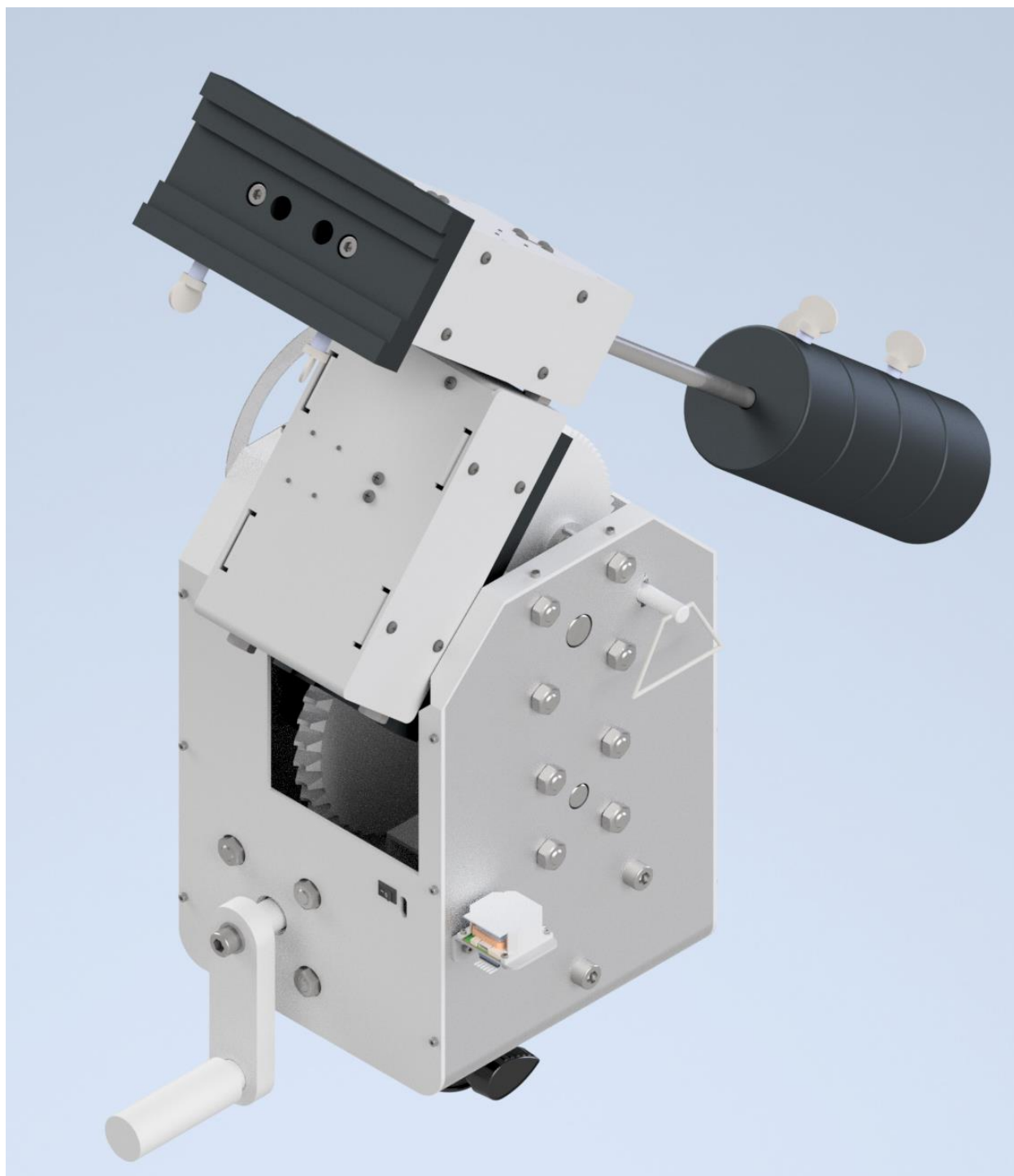
5. Podsumowanie

Całkowity zbiorczy koszt urządzenia (bez teleskopu): $2298,50 + 1893,68 + 819,00 = \mathbf{5011,18 \text{ zł}}$

Całkowita masa urządzenia (bez teleskopu): **33,376 kg**

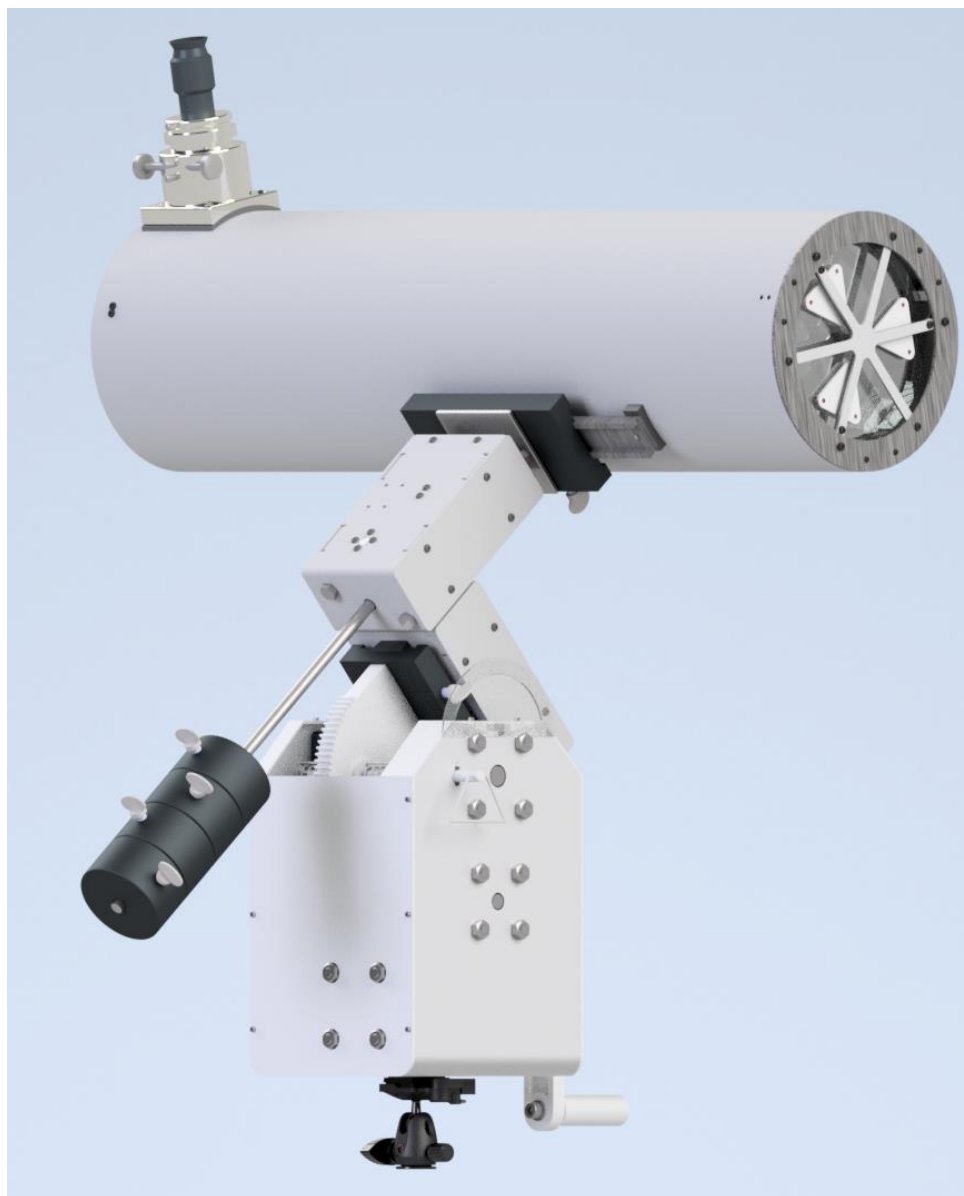
Zrealizowany projekt montażu równikowego pozwala na montaż dowolnego teleskopu posiadającego szynę typu jaskółczy ogon w standardzie *Losmandy*, z wykorzystaniem odpowiednich przeciwwag.

Założenia projektowe zostały zrealizowane, należy jednak nadmienić, że wynikowe urządzenie jest dość drogie i dość masywne. Z pewnością w kolejnych iteracjach projektowania możliwe byłoby uproszczenie konstrukcji i minimalizacja kosztów. Wykorzystanie m.in. blach giętych w projekcie pozwala na rozpoczęcie procesu przygotowania urządzenia do produkcji seryjnej.



Rys. 62: Model 3D całego montażu paralaktycznego





Rys. 63: Model 3D całego montażu paralaktycznego wraz z zamontowanym teleskopem

6. Źródła

[1] <https://fas.org/man/dod-101/sys/land/row/d-30.htm>

[2] United States. Department of the Army 1981. *Principles of Artillery Weapons*. Headquarters, Department of the Army.

[3] Katalog firmy SKF: <https://www.skf.com/group/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/flanged-ball-bearing-units>

[4] <https://www.montalvo.com/products/c-friction-pads/>

- [5] <https://www.123bearing.eu>
- [6] <https://3dprintingindustry.com/news/how-to-accurately-price-for-stereolithography-sla-3d-printing-projects-171977/>
- [7] <https://allegro.pl/oferta/pret-nierdzewny-kwasoodporny-fi-15-mm-50-cm-inox-5642728642>
- [8] <https://allegro.pl/oferta/pret-nierdzewny-kwasoodporny-fi-20-mm-100-cm-inox-5642793413>
- [9] <https://www.ebmia.pl/3480-sruby-nakretki-podkladki-wkrety>
- [10] <https://www.sodemann-sprezyny.pl/produkty/sprezyny-naciskowe/zakres-a-b-stal-nierdzewna>
- [11] <https://www.montalvo.com/products/c-friction-pads/>
<https://www.aliexpress.com/popular/friction-pad.html>
- [12] <https://allegro.pl/oferta/ucfl-201-lozysko-samonastawne-w-oprawie-ucfl201-6521656368>
- [13] <https://grabcad.com/library/complete-library-of-bearings-flange-type-bearing-unit-02-holes-1>
- [14] <https://www.albeco.com.pl/PL-H94/Oferta/Search/catID=16/lozyska-samonastawne.html>
- [15] https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/language/en/info/p4283_TS-Optics-Counterweight-2-3-kg-for-counterweight-rod-with-10-12-mm-diameter.html
- [16] <http://wsinf.edu.pl/assets/img/pdf/Zeszyty%20naukowe/vol.15/art02.pdf>
- [17] <https://grabcad.com/library/thumb-screw-1>
- [18] https://www.bhphotovideo.com/c/product/1279964-REG/losmandy_vup4_v_series_universal_dovetail_plate.html
- [19] <https://pl.aliexpress.com/item/4000221287535.html>
- [20] https://www.bhphotovideo.com/c/product/1279964-REG/losmandy_vup4_v_series_universal_dovetail_plate.html
- [21] <https://www.amazon.com/Sunhokey-Synchronous-Straighten-Compatible-Accessories/dp/B081GW58LZ>
- [22] <https://grabcad.com/library/gates-powergrip-2gt-smooth-idler-6mm-belt-12mm-od-5mm-id-e3d-1>
- [23] <https://grabcad.com/library/star-knob-m6-male>
- [24] <http://poltech24.pl/ucfl-201-lozysko-samonastawne-w-oprawie-zeliwnej-na-walek-fi-12-mm-p-508.html>

- [25] <https://www.robotdigg.com/product/352/158/160/162/164/166mm-closed-loop-GT2-belt>
- [26] <https://www.adverts.ie/other-electronics/gt2-closed-loop-timing-belt-rubber-2gt-6mm-3d-printers-parts/18333325>
- [27] <https://www.ebay.com/itm/BF-type-2GT-Timing-Belt-Pulley-50-Teeth-Bore-5mm-14mm-CNC-Synchronous-Wheel-/174147136564>
- [28] https://grabcad.com/library/pulley-gt2-50-teeth-5mm-bore-personal-request-1/details?folder_id=1102061
- [29] <https://shopee.com.my/60T-2GT-Timing-Pulley-Bore-5-6-8-10-12mm-Aluminum-GT2-60-Teeth-Wheel-Pulley-Fir-for-6mm-Width-Timing-Belt-i.186556596.4405730627>
- [30] <https://grabcad.com/library/timing-pulley-gt2-20-teeth-5mm-bore-2>
- [31] <https://www.robotdigg.com/product/9/GT2-Pulley-20-Tooth-4mm-or-5mm-Bore>
- [32] https://www.banggood.com/Machifit-GT2-Timing-Pulley-20-Teeth-Synchronous-Wheel-Inner-Diameter-5mm6_35mm8mm-for-6mm-Width-Belt-CNC-Parts-p-1527803.html
- [33] <https://www.pololu.com/product/2676>
- [34] <https://www.pololu.com/product/4831/resources>
- [35] <https://www.pololu.com/file/0J1541/dual-tb9051ftg-motor-driver-shield-schematic.pdf>
- [36] <https://botland.com.pl/pl/arduino-moduly-glowne/1060-arduino-uno-rev3-a000066-8058333490090.html>
- [37] https://www.batlit.pl/ogniwa_ICR18650MG1
- [38] <https://botland.com.pl/pl/przetwornice-step-down/7614-d24v150f6-przetwornica-step-down-6v-15a-pololu-2882.html>
- [39] <https://www.pololu.com/product/2520/resources>
- [40] <https://botland.com.pl/pl/moduly-gps/14643-modul-l76x-multi-gnss-gpsbdsqzss-waveshare-16332.html>
- [41] https://botland.com.pl/pl/moduly-bluetooth/2891-modul-bluetooth-hc-05-v2.html?gclid=EAIaIQobChMIuI2j5J7A6wIVkmDmCh2Bdg4oEAQYBiABEgJIhvD_BwE
- [42] <https://botland.com.pl/pl/przelaczniki-kolyskowe/3049-przelacznik-on-off-smrs101-250v65a.html>